

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et la recherche scientifique



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département d'Hydraulique

Laboratoire de Recherches des Sciences de l'Eau

THESE DE DOCTORAT

en Hydraulique

Option : Hydraulique

Présentée par :

CHOUFI Latifa

Magister en Hydraulique de l'ENP Alger

Etude expérimentale de l'effet de la rugosité du fond du réservoir peu profond et géométrie variable sur le champ d'écoulement

M. R. Kherbachi	Professeur ENP Alger	Président
M. A. Kettab	Professeur ENP Alger	Directeur de thèse
M. A. Schleiss	Professeur EPFL Suisse	Co-Directeur
M ^{me} . S. Benmamar	Professeur ENP Alger	Examineur
M. M. K. Mihoubi	Professeur ENSH Blida	Examineur
M. M. Bessenasse	Professeur Université Blida	Examineur
M. H. Yahy	Professeur Université T. Ouzou	Examineur

ENP 2016

Quelle eau potable boirons-nous demain?



UNE EAU PROPRE POUR TOUS,

**Une eau propre est un droit commun
faisons de sorte que toute personne
ait accès à cette source vitale à
la vie, mal distribuée dans
l'espace et dans le temps.
Conservons l'eau**

L'EAU DANS LE CORAN



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

و جعلنا من الماء كل شيء حيّ أفلا يؤمنون
أَنْزَلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً فَسَالَتْ أَوْدِيَةٌ بِقَدَرِهَا فَاحْتَمَلَ السَّيْلَ زَبَدًا رَابِيًا
وَأَنْزَلْنَا مِنَ السَّمَاءِ مَاءً بِقَدَرٍ فَأَسْكَنَاهُ فِي الْأَرْضِ

A la mémoire de mes parents

LATIFA CHOUFI

« To measure is to know »

Lord Kelvin, 1883

REMERCIEMENTS

Ma gratitude au Tout-Puissant " Allah ", Dieu de toute l'humanité qui m'a donné la santé, la foi et surtout la force pour que je puisse finir ce travail de recherche.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon directeur de thèse Professeur A. KETTAB, Directeur du Laboratoire de Recherche des Sciences de l'Eau (*LSR Eau*) Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (*ENP*) pour son a encadrement et surtout pour l'aide qu'il m'a apportée durant tout mon cursus Universitaire, depuis l'Ingéniorat en passant par le Magister jusqu'à la thèse de Doctorat.

Un grand merci Mr Kettab



En partie issue avec l'équipe de recherche dirigée par le Directeur du Laboratoire de Constructions Hydrauliques (*LCH*) Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse (*EPFL*) où j'ai passé 18 mois de travail. Ce séjour scientifique a abouti à la réalisation de l'étude expérimentale de ma thèse et à la rédaction d'un article soumis dans un journal international. Je n'aurai pu réaliser et finaliser mon Doctorat sans l'apport et le soutien de plusieurs personnes notamment la confiance du Professeur A. Schleiss, qui a accepté de m'accueillir dans son Laboratoire afin de réaliser mes essais expérimentaux. Il m'a permis de m'intégrer, pendant ce séjour, dans son équipe de recherche que j'ai beaucoup appréciée et m'aguerrir. J'espère que nos collaborations vont continuer dans le domaine de la recherche et je m'en réjouis.

Thank you Mr Schleiss



J'ai également apprécié la collaboration et l'investissement du Docteur J. L. BOILLAT que je remercie, particulièrement, pour sa vivacité, la qualité de son encadrement, sa disponibilité, sa rigueur professionnelle et surtout pour l'aide prodiguée et l'avancée de cette thèse. Sa contribution scientifique, ses directives et ses conseils précieux donnés jusqu'à la réalisation et l'aboutissement de ce travail expérimental ont beaucoup enrichis ce travail. Encore **Merci Mr Boillat**.

J'exprime ma profonde gratitude pour l'accompagnement de l'adjoint du directeur du laboratoire où je pense fortement au Docteur G. De Cesare pour l'aide et les conseils avisés. Il m'a offert la chance de mettre en place les différents instruments pour réaliser mes expériences où il a largement contribué à l'encadrement et je lui en suis reconnaissante. En ce sens je dis **Merci Giovanni** de m'avoir autorisé de faire mes essais pendant la nuit.

Enfin, je n'oublierais jamais de remercier tous le personnel du laboratoire *LCH* pour l'accueil chaleureux et surtout l'assistance technique afin d'achever ma mission scientifique. Durant mon séjour, j'ai bénéficié d'excellentes conditions de travail où j'ai eu la chance de rencontrer des personnes volontaires, impliquées et surtout très riches sur le plan humain et scientifique notamment les membres de l'atelier.

J'ai beaucoup appréciée l'enthousiasme et la compétence de toute personne qui m'a fait, sincèrement, l'honneur de juger, critiquer et corriger ce travail de recherche. Toutes les personnes qui m'ont aidée de près ou de loin à la préparation de cette thèse sont également destinataires de mes vifs remerciements.

Je tiens également à remercier vivement mon collègue de l'Université Mentouri Constantine 1 : le Professeur H. Houari du département de Génie-Civil pour les suggestions à l'amélioration de ce travail. Sa contribution est très efficace bien que ses échelles de recherche soit celle des temps des Matériaux et la mienne celle de l'Hydraulique mais nos objets d'étude sont communs.

Je tiens à remercier le Président d'avoir accepté la présidence de jury de mon doctorat ainsi que tous les membres et surtout pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux de thèse.

Mes pensées se tournent vers mes proches, plus particulièrement, ma défunte maman qui m'a solidement soutenue et encouragée que je ne la remercierai jamais assez avec ces paroles.

Un grand Merci à toutes les personnes que l'oubli a, ici, trahi mais y se reconnaîtront.

LATIFA CHOUFI

NOMENCLATURE

Notation des symboles

Symbole	Description	Dimension
A_1, A_2	Constantes d'intégration de la méthode des moindres carrés	[-]
B	Largeur du bassin	[m]
b	Largeur du canal	[m]
Br	Constante d'intégration prise pour fond rugueux ($Br = 8.5$)	[-]
Bs	Constante d'intégration pour fond lisse ($Bs = 3.5$)	[-]
C_1	Coefficient de Chezy	$[m^{1/2}/s]$
C	Constante d'intégration	[-]
Cs	Vitesse du son dans le fluide considéré (Célérité)	[m/s]
d_{50}	Diamètre moyen des sédiments	[μm]
D'	Diamètre moyen du traceur (<i>LSPIV</i>)	[pixel]

Nomenclature

d'	Diamètre du transducteur ultrason	[mm]
d	Densité de l'eau	[-]
e	Epaisseur de la surface de la rugosité	[mm]
F_r	Nombre adimensionnel de Froude	[-]
f_0	Fréquence de base de transmission de la sonde acoustique	[Mhz]
f_D	Fréquence ultrason d'émission à effet Doppler	[Mhz]
f_{PRF}	Fréquence des impulsions de répétition des ondes acoustiques	[Mhz]
g	Accélération gravitationnelle	[m/s ²]
h	Profondeur d'eau	[m]
H	Profondeur maximale d'exploration (pénétration)	[mm]
I	Pente du fond du canal	[%]
\bar{k}_0	Rugosité équivalente moyenne expérimentale	[mm]
L	Longueur du bassin	[m]
l	Longueur d'entrée et de sortie du canal	[m]

Nomenclature

l'	Longueur du transducteur <i>US</i>	[mm]
N_{PRF}	Nombre d'émissions par profil	[-]
n	Nombre de découpage de l'écho en intervalles	[-]
N	Nombre de transducteurs	[-]
P	Champ de la pression hydrostatique	[kg/m ²]
P_{ac}	Pression acoustique régnant au sein du liquide	[kg/m ²]
Q	Débit moyen d'alimentation	[l/s]
Re	Nombre adimensionnel de Reynolds	[-]
Re_*	Nombre de Reynolds correspondant à la vitesse de frottement u_*	[-]
Re_{cr}	Nombre de Reynolds critique	[-]
R_H	Rayon hydraulique	[m]
R	Coefficient de corrélation	[-]
$S = B.L$	Surface totale de la section du modèle expérimental	[m ²]
$T^{\circ}c$	Température	[°c]
t'	Durée d'enregistrement suivant la méthode <i>UVP</i>	[ms]

Nomenclature

t	Temps du parcours de l'onde <i>US</i> (durée d'émission temporelle)	[s]
t_{enrg}	Durée d'enregistrement du couple d'images suivant <i>LSPIV</i>	[min]
t_0	Etat initial	[-]
t_f	Etat final	[-]
$u^2/2g$	Energie cinétique	[m]
U	Vitesses moyennes superficielles par <i>LSPIV</i>	[m/s]
u	Vitesses moyennes longitudinales par <i>UVP</i>	[m/s]
u_*	Vitesse de frottement du fond	[m/s]
u_{max}	Vitesse maximale comptée positivement dans le sens du flux	[m/s]
$u(z)$	Profil des vitesses longitudinales	[-]
V_r	Vitesse radiale mesurée par <i>UVP</i> monitor	[m/s]
X	Distance déterminée pour un aller-retour effectué par l'onde <i>US</i>	[m]
x	Coordonnée spatiale selon la direction de vitesse longitudinale	[-]
Z	Altitude verticale à partir du sommet d'aspérités jusqu'au point considéré	[mm]

Nomenclature

z	Coordonnée verticale selon la direction de la vitesse	[-]
y	Coordonnée transversale selon la direction de la vitesse	[-]
$ER = B/b$	Facteur géométrique adimensionnel d'élargissement	[-]
h/b	Rapport d'aspect	[-]
$1/\cos r$	Facteur de projection	[-]
du/dx	Gradient de vitesses	[-]
Δh	Différence de niveau d'eau mesurée à l'amont et l'aval du canal	[mm]
ΔL	Distances cumulées de la longueur totale du canal	[mm]
Δt	Durée de chaque pulsation	[μ s]
Δx	Déplacement du traceur	[mm]
$\frac{\Delta h}{\Delta L} = I$	Pente géométrique du fond du canal	[%]

ABREVIATIONS

<i>CIGB</i>	Comité International des Grands Barrages
<i>ENAC</i>	Faculté d'Environnement Naturel, Architectural et Construit
<i>ENP</i>	Ecole Nationale Polytechnique d'Alger
<i>EPFL</i>	Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne, Suisse
<i>FPS</i>	Fragment Per Seconde
<i>LCH</i>	Laboratoire de Constructions Hydrauliques
<i>LRSE</i>	Laboratoire de Recherche des Sciences de l'Eau
<i>LSPIV</i>	Large Scale Particle Image Velocimetry
<i>PIV</i>	Particle Image Velocimetry
<i>PP</i>	Polypropylène
<i>PRP</i>	Pulse Repetition Frequency
<i>PVC</i>	Poly Chlorure de Vinyle
<i>US</i>	Ultrason
<i>UVP</i>	Ultrasonic Doppler Velocity Profiler

SYMBOLES GRECS

Γ	Angle de projection Doppler par rapport à la verticale Z	[°]
$u(x)$	Epaisseur de la couche limite	[mm]
	Constante universelle de Von Kàrmàn	[-]
~	Viscosité dynamique de l'eau	[Pa.s]
ν	Viscosité cinématique de l'eau	[m ² / s]
... ^s	Masse volumique du réflecteur acoustique des sédiments	[kg/m ³]
...	Masse volumique de l'eau	[kg/m ³]
...'	Masse volumique du traceur (particules blanches flottantes)	[kg/m ³]
\dagger_x	Déviatiòn standard (Ecart type)	[mm]
\ddagger	Contraintes (tensions) tangentièlles	[pascal]
t	Périmètre mouillé	[m]

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Valeurs de l'exposant ($R_H = h$) proposée par différents auteurs

Tableau 1.2 : Viscosité cinématique de l'eau en fonction de la température

Tableau 2.1 : Instrumentation et paramètres de mesure

Tableau 3.1 : Paramètres hydrauliques expérimentales

Tableau 3.2 : Paramètres du système de mesure du transducteur *UVP*

Tableau 3.3 : Rugosité moyenne $\overline{k_0}$ et déviation standard \dagger_x

$$h = 0.200m, Q = 7l/s, l = 6m, b = 0.25m$$

Tableau 3.4 : Rugosité moyenne $\overline{k_0}$ et déviation standard \dagger_x

$$h = 0.100m, Q = 7l/s, l = 6m, b = 0.25m$$

Tableau 4.1 : Analyse statistique des paramètres d'acquisition

Tableau 4.2 : Grandeurs expérimentales étudiées

Tableau 4.3 : Caractéristiques géométriques expérimentales avec une largeur variable

$$L = 6m, B \leq 4m, Q = 7l/s, h = 0.200m$$

Tableau 4.4 : Caractéristiques géométriques expérimentales avec une longueur variable

$$L \leq 6m, B = 4m, Q = 7l/s, h = 0.200m$$

Tableau 4.5 : Grandeurs expérimentales hydrauliques avec un nombre de Reynolds variable

$$L = 6m, B = 4m, L/B = 1.5, B/b = 16, Re \leq 28000$$

Tableau 4.6 : Incertitude des paramètres expérimentaux mesurés

LISTE DES FIGURES

Figure 1. 1 : Rôle de l'eau

Figure 1. 2 : Transducteur utilisé en écoulement à surface libre durant les essais *UVP*
 $l' = 40mm, d' = 5mm$

Figure 1.3 : Diagramme de Moody-Stanton

Figure 1.4 : Réservoir peu profond sur la rivière Lech River en Allemagne
<http://www.ballon-team-ammersee.de/>

Figure 1.5 : Différentes zones de la couche limite

Figure 1.6 : Distribution des vitesses longitudinales dans la couche limite
en écoulement permanent uniforme

Figure 1.7 : Instabilité de la surface libre en écoulement permanent et uniforme

Figure 2.1 : Barrage-réservoir à faible profondeur

Figure 2.2 : Présentation du laboratoire *LCH* , *EPFL*

Figure 2.3 ; Création du laboratoire *LCH*, 75 ans de recherche

Figure 2.4 : Modèle réduit au laboratoire *LCH*

Figure 3.1 : Vue d'aval du canal expérimental
 $L = 6m$, $b = 0.25m$, $Q = 7l / s$, $h \leq 0.200m$

Figure 3.2 : Système de commande du laboratoire *LCH* , *EPFL*

Figure 3.3 : Instrument *UVP X-3PS Monitor*

Figure 3.4 : Connexion du multiplexeur avec les sondes *US*

Figure 3.5: a) Ajustement du niveau d'eau par le déversoir réglable

b) Mesures par limnimétrie à l'amont et à l'aval du canal d'essais

Figure 3.6 : Trois surfaces rugueuses du fond étudié

A) $e_A = 6.2mm$, B) $e_B = 7.9mm$, C) $e_C = 8.1mm$

Figure 3.7: Disposition des sondes *US* dans le canal en présence du réflecteur

pour une profondeur a) $h = 0.100m$, b) $h = 0.200m$

Figure 3.8 : Réflecteur acoustique utilisé durant les mesures *UVP*

$d_{50} = 50\text{-}m$, $\dots s = 1500\text{ kg/m}^3$

Figure 3.9 : Position inclinée des sondes *US* en présence du réflecteur acoustique

dans le canal d'essais ($6m \times 0.25m \times 0.3m$)

Figure 3.10 : Mesure des profils de vitesses par échographie à effet Doppler pulsée

sur une ligne de mesure dans un écoulement à surface libre

(Selon De Cesare, 1997)

Figure 3.11 : Profil de vitesses longitudinales $(u(z), 0, 0)$ enregistrées par *UVP Monitor*

$L = 6m$, $b = 0.25m$ $Q = 7l/s$, $h = 0.200m$, $Re = 28000$

Figure 3.12 : Profil de vitesses longitudinales calculées par la loi de la paroi

$L = 6m$, $b = 0.25m$, $Q = 7l/s$, $h = 0.200m$, $Re = 28000$

Figure 3.13 : Répartition des vitesses moyennes de l'écoulement

à surface libre dans un canal peu profond

Figure 3.14 : Profils de vitesses $u(z)$ en couche limite rugueuse en écoulement

a) bidimensionnel, b) tridimensionnel

Figure 3.15: Principe de mesure des sondes *US* dans le sens d'écoulement

sur fond rugueux $\overline{k_0} = 2.8mm$, $Q = 7l/s$, $L = 6m$, $b = 0.25m$

Figure 3.16 : Distribution des vitesses longitudinales dans la couche limite

en écoulement permanent uniforme

Figure 3.17 : Profil de vitesses longitudinales $(u(z), 0, 0)$ sur fond lisse $\bar{k}_0 = 0.1mm$

$$Q = 7l/s, h = 0.200m, u = 0.140m/s, Re = 28000, Fr = 0.1$$

Figure 3.18 : Profil de vitesses longitudinales $(u(z), 0, 0)$ sur fond lisse $\bar{k}_0 = 0.1mm$

$$Q = 7l/s, h = 0.100m, u = 0.280m/s, Re = 27940, Fr = 0.283$$

Figure 3.19 : Profil de vitesses longitudinales $(u(z), 0, 0)$ sur fond rugueux $\bar{k}_0 = 2.8mm$

$$Q = 7l/s, h = 0.200m, u = 0.140m/s, Re = 28000, Fr = 0.1$$

Figure 3.20 : Profil de vitesses longitudinales $u(z)$ sur fond rugueux $\bar{k}_0 = 2.8mm$

$$Q = 7l/s, h = 0.100m, u = 0.280m/s, Re = 27940, Fr = 0.283$$

Figure 3.21 : Schéma illustrant les régions d'une couche limite

Figure 3.22 : Profils de vitesses longitudinales $(u(z), 0, 0)$ sur deux fonds différents

$$\bar{k}_0 = 0.1mm, \bar{k}_0 = 2.8mm, Q = 7l/s, h = 0.200mm, Re = 28000, Fr = 0.1$$

Figure 3.23 : Profils de vitesses longitudinales $(u(z), 0, 0)$ sur deux fond différents

$$\bar{k}_0 = 0.1mm, \bar{k}_0 = 2.8mm, Q = 7l/s, h = 0.100m, Re = 27940, Fr = 0.283$$

Figure 4.1 : Modèle physique à entrée et sortie symétrique avec un circuit fermé

$$\text{d'hydraulique } (L = 6.00m, B = 4.00m, b = 0.25m, l = 1.00m)$$

Figure 4.2 : Vue générale du réservoir expérimental de référence $L = 6m, B = 4m$

$$a) \text{ Fond lisse } \bar{k}_0 = 0.1mm, b) \text{ fond rugueux } \bar{k}_0 = 2.8mm$$

Figure 4.3 : Ouvrages annexes de l'installation expérimentale

Figure 4.4 : Principe de fonctionnement de l'installation *LSPIV*

au *LCH, EPFL*

Figure 4.5 : Caméra vidéo numérique *SMX 155-1.3 Méga Pixel*

Figure 4.6 : Lors des mesures *LSPIV*, a) Image avec ombre

b) Image sans réflexion

Figure 4.7 : Deux traceurs de couleur différente

a). Noir sur fond blanc, b). Blanc sur fond noir du bassin

Figure 4.8 : Système de la commande des vannes d'alimentation

Figure 4.9 : Visualisation d'un jet tourbillonnaire en présence du traceur dans un fluide homogène

Figure 4.10 : Mesures *LSPIV* a) Image brute enregistrée par la camera

b) Lignes de courant après traitement

Figure 4.11 : Vitesses de surface de surface après traitement des images enregistrées

Figure 4.12 : Visualisation de l'écoulement par la camera dans une lumière pulsée

$$Q = 7 \text{ l/s}, h = 0.200 \text{ m}, L = 6 \text{ m}, B = 4 \text{ m}$$

Figure 4.13 : Vitesses de surface longitudinales traitées par

le logiciel Flow Manager

Figure 4.14 : Configuration d'écoulement dans le réservoir de référence

$$L = 6 \text{ m}, B = 4 \text{ m}, Q = 7 \text{ l/s}, h = 0.200 \text{ m}$$

Figure 4.15 : Vecteurs des vitesses traitées par le logiciel Flow Manager

Figure 4.16 : Ligne de courant dans le champ d'écoulement sur fond lisse

$$\overline{k_0} = 0.1 \text{ mm}, L = 6 \text{ m}, B = 0.5 \text{ m}, Q = 7 \text{ l/s}, h = 0.200 \text{ m}$$

Figure 4.17 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement sur fond lisse

$$\overline{k_0} = 0.1 \text{ mm}, L = 6 \text{ m}, B = 1 \text{ m}, Q = 7 \text{ l/s}, h = 0.200 \text{ m}.$$

Figure 4.18 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement sur fond lisse

$$\overline{k_0} = 0.1 \text{ mm}, L = 6 \text{ m}, B = 2 \text{ m}, Q = 7 \text{ l/s}, h = 0.200 \text{ m}.$$

Figure 4.19 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement sur fond lisse

$$\overline{k_0} = 0.1 \text{ mm}, L = 6 \text{ m}, B = 3 \text{ m}, Q = 7 \text{ l/s}, h = 0.200 \text{ m}$$

Figure 4.20 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement sur fond lisse

$$\bar{k}_0 = 0.1mm \quad L = 6m, B = 4m, Q = 7l/s, h = 0.200m$$

Figure 4.21 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement sur fond lisse

$$\bar{k}_0 = 0.1mm, \quad B = 4m, L = 5m, Q = 7l/s, h = 0.200m.$$

Figure 4.22 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement sur fond lisse

$$\bar{k}_0 = 0.1mm, \quad B = 4m, L = 4m, Q = 7l/s, h = 0.200m.$$

Figure 4.23 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement sur fond lisse

$$\bar{k}_0 = 0.1mm, \quad B = 4m, L = 3m, Q = 7l/s, h = 0.200m.$$

Figure 4.24 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement sur fond lisse

$$\bar{k}_0 = 0.1mm, \quad B = 4m, L = 2m, Q = 7l/s, h = 0.200m.$$

Figure 4.25 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement sur fond rugueux

$$\bar{k}_0 = 2.8mm, \quad L = 6m, B = 0.5m, Q = 7l/s, h = 0.200m.$$

Figure 4.26 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement sur fond rugueux

$$\bar{k}_0 = 2.8mm, \quad L = 6m, B = 1m, Q = 7l/s, h = 0.200m.$$

Figure 4.27 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement sur fond rugueux

$$\bar{k}_0 = 2.8mm, \quad L = 6m, B = 2m, Q = 7l/s, h = 0.200m.$$

Figure 4.28 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement sur fond rugueux

$$\bar{k}_0 = 2.8mm, \quad L = 6m, B = 3m, Q = 7l/s, h = 0.200m.$$

Figure 4.29 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement sur fond rugueux

$$\bar{k}_0 = 2.8mm, \quad L = 6m, B = 4m, Q = 7l/s, h = 0.200m.$$

Figure 4.30 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement sur fond rugueux

$$\bar{k}_0 = 2.8mm, \quad L = 5m, B = 4m, Q = 7l/s, h = 0.200m$$

Figure 4.31 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement sur fond rugueux

$$\overline{k_0} = 2.8mm, L = 4m, B = 4m, Q = 7l/s, h = 0.200m.$$

Figure 4.32 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement sur fond rugueux

$$\overline{k_0} = 2.8mm, L = 3m, B = 4m, Q = 7l/s, h = 0.200m.$$

Figure 4.33 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement sur fond rugueux

$$\overline{k_0} = 2.8mm, L = 2m, B = 4m, Q = 7l/s, h = 0.200m.$$

Figure 4.34 : Turbulence du champ d'écoulement sur fond lisse pour un Reynolds

$$\overline{k_0} = 0.1mm, Q = 7l/s, h = 0.200m, Re = 28000, Fr = 0.1$$

Figure 4.35 : Turbulence du champ d'écoulement sur fond lisse pour un Reynolds

$$\overline{k_0} = 0.1mm, Q = 7l/s, h = 0.150m, Re = 28000, Fr = 0.186$$

Figure 4.36 : Turbulence du champ d'écoulement sur fond lisse pour un Reynolds

$$\overline{k_0} = 0.1mm, Q = 7l/s, h = 0.100m, Re = 28000, Fr = 0.283$$

Figure 4.37 : Turbulence du champ d'écoulement sur fond lisse pour un Reynolds

$$\overline{k_0} = 0.1mm, Q = 3.5l/s, h = 0.200m, Re = 14000, Fr = 0.05$$

Figure 4.38 : Turbulence du champ d'écoulement sur fond lisse pour un Reynolds

$$\overline{k_0} = 0.1mm, Q = 3.5l/s, h = 0.150m, Re = 14000, Fr = 0.07$$

Figure 4.39 : Turbulence du champ d'écoulement sur fond lisse pour un Reynolds

$$\overline{k_0} = 0.1mm, Q = 3.5l/s, h = 0.100m, Re = 14000, Fr = 0.14$$

Figure 4.40 : Turbulence du champ d'écoulement sur fond rugueux pour un Reynolds

$$\overline{k_0} = 2.8mm, Q = 7l/s, h = 0.200m, Re = 28000, Fr = 0.1$$

Figure 4.41 : Turbulence du champ d'écoulement sur fond rugueux pour un Reynolds

$$\overline{k_0} = 2.8mm, Q = 7l/s, h = 0.150m, Re = 28000, Fr = 0.186$$

Figure 4.42 : Turbulence du champ d'écoulement sur fond rugueux pour un Reynolds

$$\overline{k_0} = 2.8mm, Q = 7l/s, h = 0.100m, Re = 28000, Fr = 0.283$$

Figure 4.43 : Turbulence du champ d'écoulement sur fond rugueux pour un Reynolds

$$\overline{k_0} = 2.8mm, Q = 3.5l/s, h = 0.200m, Re = 14000, Fr = 0.05$$

Figure 4.44 : Turbulence du champ d'écoulement sur fond rugueux pour un Reynolds

$$\overline{k_0} = 2.8mm, Q = 3.5l/s, h = 0.150m, Re = 14000, Fr = 0.05$$

Figure 4.45 : Turbulence du champ d'écoulement sur fond rugueux pour un Reynolds

$$\overline{k_0} = 2.8mm, Q = 3.5l/s, h = 0.100m, Re = 14000, Fr = 0.14$$

TABLE DES MATIERES

Nomenclature.....	VIII
Abréviations.....	XIII
Symboles grecs.....	XIV
Liste des tableaux.....	XV
Liste des figures.....	XVI
.....	1
Résumé	2
Abstract	3
INTRODUCTION	4

CHAPITRE. I

REVUE DE LITTERATURE

INTRODUCTION	11
I.1.APPROCHE DE L'EAU	13
I.2.SONDES ULTRASON	16
I.2.1. Caractéristiques des sondes <i>US</i>	16
I.2.2. Propriétés des ondes acoustiques.....	17

I.3. RUGOSITE THEORIQUE.....	18
I.4. REGIME D'ECOULEMENT	22
I.4.1. Nombre de Reynolds Re	23
I.4.2. Nombre de Froude Fr	26
I.5. ECOULEMENT DANS LES LARGES RESERVOIRS.....	27
I.5.1. Ecoulements bidimensionnels.....	27
I.5.2. Ecoulements tourbillonnaires.....	28
I.5.3. Décollement des écoulements.....	30
I.5.4. Ecoulement dans la couche limite.....	31
I.6. EQUATIONS GENERALES DU MOUVEMENT.....	35
I.6.1. Principe de continuité.....	36
I.6.2. Principe de quantité de mouvement.....	38
I.7. INSTABILITE HYDRODYNAMIQUE.....	39
I.7.1. Effet de la surface libre	39
I.7.2. Effet de la viscosité cinématique.....	41
I.7.3. Effet des conditions aux limites.....	42
CONCLUSION.....	43

CHAPITRE. II

METHODES DE MESURE AU LCH

II.1. VISION HISTORIQUE SUR LES BARRAGES.....	45
II.2. ALLUVIONNEMENT DES BARRAGES-RESERVOIRS.....	46
II.3. TRAVAUX DE RECHERCHE AU LCH.....	48
II.4. TECHNIQUES DE MESURE.....	49
II.4.1. Ultrasonic Velocity Profiler <i>UVP</i>	51
II.4.1.1. Avantages de la méthode.....	52
II.4.2. Particle Image Velocimetry <i>PIV</i>	53
II.4.2.1. Historique.....	53
II.4.2.2. Large Scale Particle image Velocimetry (<i>LSPIV</i>).....	54
II.4.2.3. Avantages et inconvénients de la <i>PIV</i>	56
II. 4. 2. 2. Recommandations.....	57
II.5. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	58
II.5.1. Objectif de la thèse.....	58
CONCLUSION.....	60

CHAPITRE. III

MESURES VIA ULTRASONIC VELOCITY PROFILER (UVP)

INTRODUCTION	61
III.1. INSTALLATION DE MESURE	64
III.1.1. Montage du dispositif d'essais.....	64
III.1.2. Instrumentations et moyens de mesure.....	66
III.2. MESURES EXPERIMENTALES	69
III.2.1. Choix de la rugosité du fond.....	69
III.2.2. Disposition des sondes <i>US</i>	70
III.3. ESSAIS PRELEMINAIRES	71
III.3.1. Description des essais.....	73
III.3.2. Technique de mesure <i>UVP</i>	74
III.3.3. Principe de fonctionnement.....	76
III.4. LOI DE LA PAROI	81
III.4.1. Profils des vitesses instantanées.....	84
III.4.2. Distribution des vitesses d'écoulement.....	85
III.4.2.1. Altitudes.....	86
III.4.2.2. Vitesses longitudinales.....	87
III.4.2.3. Vitesses verticales.....	88
III.4.2.4. Vitesse de frottement	89

III.5. RUGOSITE EQUIVALENTE EXPERIMENTALE.....	91
III.6. RESULTATS.....	96
III.6.1. Effet du fond lisse sur le champ d'écoulement.....	97
III.6.2. Effet du fond rugueux sur le champ d'écoulement.....	99
III.6.3. Effet de l'écoulement au voisinage du fond.....	101
III.6.4. Etude comparative des profils de vitesses.....	103
CONCLUSION.....	106

CHAPITRE. IV

MESURES A L'AIDE DE LA VELOCIMETRIE PAR IMAGERIE DE PARTICULES A LARGE ECHELLE (LSPIV)

INTRODUCTION.....	108
IV.1. INSTALLATION D'ESSAIS.....	110
IV.1.1. Modèle physique et annexes.....	110
IV.2. INSTRUMENTATION.....	114
VI.2.1. Matériels de mesure.....	114
IV.2.2 Installation expérimentale de <i>LSPIV</i>	114
IV.2.2.1. Caméra vidéo.....	116
IV.2.3. Illumination du volume de mesure.....	117
IV.2.2.3. Traceur et ensemencement.....	119

IV.2.2.4. Prise d'images.....	121
IV.2.2.5. Analyse statistique.....	121
IV.3. METHODE DE MESURE <i>LSPIV</i>	122
IV.3.1. Protocole de mesure.....	123
IV.3.2. Mise en œuvre.....	125
IV.3.2.1. Enregistrement des images.....	125
IV.3.2.2. Analyse des images capturées.....	126
IV.3.2.3. Prétraitement.....	127
IV.3.2.4. Correction.....	128
IV.3.3. Algorithme du <i>LSPIV</i>	129
IV.4. ETUDE EXPERIMENTALE.....	130
IV.4.1. Séries d'essais.....	132
IV.4.2. Impact des fluctuations sur l'écoulement.....	136
IV.4.2.1. Estimations d'incertitudes.....	136
IV.5. RESULTATS.....	138
IV.5.1. Effet de l'écoulement sur la stabilité de la surface libre.....	140
IV.5.2. Effet de la rugosité sur le champ des vitesses superficielles	143
IV.5.3. Effet du facteur de forme L/B	145
IV.5.4. Effet de la turbulence.....	172
CONCLUSION.....	184

CONCLUSION GENERALE.....185

RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES189

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....192

تحميل الرواسب في المياه الضحلة هي قضية حرجة. لكن لخفض أو السيطرة على هذه الظاهرة المعقدة، هناك حلول للحد منها والتي ليست سهلة التنفيذ خصوصا في الخزانات التي يجتازها التدفق محمل بالرواسب المعلقة. في هذا المعنى، تم إجراء دراسة تجريبية على أسفل ذو خلفية خشنة على نحو سلس في البداية في خزان مستطيل ذو الهندسة المتغيرة وذلك لدراسة أنماط الدوران المتطورة في هندسة متناظرة.

وقد أجريت دراسة أولية بتقنية حديثة *UVP* بسرعة ما يعادل الموجات فوق الصوتية دوبلر لتعريف و لتحديد متوسط خشونة السطح السفلي لقاع الخزان من خلال خمسة محولات ذو تأثير دوبلر. في هذا السياق تمت دراسة تحليل تأثير متوسط خشونة السطح السفلي للخزان المستطيل والهندسة المتغيرة على السرعة السطحية و قد درست على نطاق واسع بواسطة *LSPIV* عن طريقة سرعة صور الجسيمات. الصور القادمة الذروة سجلتها كاميرا الفيديو بأن النتائج يتم تفسيرها باستخدام ارتباط تدفق البرمجيات التي وضعها (Dantec dynamics, S/A., 2007)

و لقد أظهرت نتائج الاختبار أن نظام التدفق في الخزانات الضحلة حساس جدا لشروط الحدود التي تؤثر بشكل كبير على مجال السرعة السطحية علاوة على ذلك فإن زيادة خشونة السطح السفلي للخزان يزيد من قوى الاحتكاك وسمك الطبقة الحدودية و النتيجة لاستعادة التناظر لإعادة و تكوين جريان متماثل

خزان ضحل، خلفية خشنة، مجال تدفق , *UVP* , *LSPIV* اضطراب

RESUME

La charge sédimentaire en eau peu profonde est un problème crucial. Des solutions existent pour réduire ce phénomène complexe, mais elles ne sont pas faciles à mettre en place surtout dans les réservoirs traversés par un écoulement chargé en sédiments en suspensions. Dans ce sens, une étude expérimentale a été menée sur un fond rugueux initialement lisse dans un réservoir rectangulaire peu profond et géométrie variable afin d'examiner les configurations de recirculation développées dans une géométrie symétrique.

Une étude préliminaire a été effectuée avec la technique *UVP* (Ultrasonic Doppler Velocity Profiler) pour déterminer la rugosité équivalente moyenne de la surface du fond au moyen de cinq transducteurs *US* à effet Doppler pulsé. L'analyse de l'effet rugueux de la paroi du fond du réservoir rectangulaire peu profond et géométrie variable sur le champ des vitesses superficielles a été étudiée par la méthode *LSPIV* (Large Scale Particles Images Velocimetry). Suivant des images zénithales enregistrées par une caméra vidéo que les résultats sont interprétés via un logiciel de corrélation Flow Manager, développé par (Dantec dynamics, S/A., 2007).

Les résultats d'essais ont montré que dans un réservoir peu profond le régime d'écoulement est très sensible aux conditions de bords qui influencent, significativement, le champ des vitesses de superficielles. En effet, l'augmentation de la rugosité du fond accroît les forces de frottement et l'épaisseur de la couche limite, avec comme conséquence de rétablir la configuration de l'écoulement symétrique.

Mots-clés :

Écoulement peu profond, turbulence, fond rugueux, *UVP*, *LSPIV*, géométrie du réservoir.

ABSTRACT

Sediment load in shallow water is a critical issue. To reduce or master this very complex phenomenon, solutions exist, but they are not easy to explain implement especially in reservoirs through which a flow laden sediments suspensions. In this sense, an experimental study was carried out on a rough background initially smooth in a shallow rectangular reservoir to examine different configurations of recirculating developed in a symmetrical geometry. A preliminary study was conducted with the technical Ultrasonic Doppler Velocity Profiler (*UVP*) to determine the average equivalent roughness of bottom surface using five transducers *US* pulsed Doppler effect.

Analysis of the effect of the roughness bottom surface of shallow reservoir and variable geometry on the velocity field of surface was investigated by the method Large Scale Particles Image Velocimetry (*LSPIV*). With zenith images recorded by a video camera that the test results are interpreted by software correlation Flow Manager, developed by Dantec Dynamics, (2007)

Test results showed the flow regime in the shallow reservoir is very sensitive to boundary conditions, which significantly influence the velocity field surface. However, increasing the roughness of the bottom increases the frictional forces and the thickness of the boundary layer, with the result of restoring the symmetrical flow pattern.

Keywords:

Shallow flow, bottom roughness, turbulence, *UVP*, *LSPIV*, reservoir geometry.

INTRODUCTION

Le phénomène de la sédimentation des réservoirs est une grave menace pour les lacs artificiels qui servent comme réservoirs pour l'approvisionnement en eau potable, la production hydroélectrique ou bien la protection contre les inondations. A long terme, ce processus est devenu à l'échelle mondiale un des problèmes majeurs de l'ingénierie Hydraulique du XXI^{ème} siècle, il est avec des conséquences économiques requiert donc une solution durable. Cependant,, il affecte, non seulement, la sécurité du point de vue structural et exploitation mais aussi la fiabilité et la durée de vie des aménagements hydro-électriques. En effet, les mécanismes physiques permettant la mise en suspension des sédiments sont, à ce jour-là, mal connus et il restera du chemin à faire pour maîtriser le processus de la sédimentation. Par ailleurs, les problèmes de la sédimentation des barrages-réservoirs sont relativement peu connus sous l'effet des changements opérationnels répétés. Cependant, l'influence du frottement des sédiments déposés au fond du bassin sur le champ de l'écoulement bidimensionnel ($2D$), peut être expliquée théoriquement au moyen des instabilités absolues qui décrit l'évolution spatiale et temporelle des perturbations. Toutefois, l'instabilité des écoulements latéralement cisailés a été, ainsi, expliquée théoriquement par l'équation d'Orr-Sommerfeld moyennée toute la profondeur d'eau. Alors que, l'analyse de la stabilité linéaire des profils de vitesses dans des canaux à ciel ouvert examinée par (Chu et al, 1983) a été basée sur Runge-Kutta. Néanmoins, en utilisant un algorithme portant sur les éléments finis, le problème des écoulements asymétriques a été déterminé par (Shapira et al, 1990) dans un élargissement progressif d'entrée et de sortie symétrique afin de montrer l'évolution de la stabilité pour un nombre de Reynolds ($50 < R_e < 300$). Dès lors, le procédé d'application des volumes finis dans les canaux avec élargissement brusque a été examiné par (Battaglia et al, 1997) où les codes commerciaux ont été utilisés par (Kantoush et al, 2005) dans la modélisation numérique afin de confirmer les résultats expérimentaux de sa thèse. Tandis que, la stabilité linéaire des écoulements montrée par (Chen & Jirka, 1998) présente les effets de la viscosité de l'eau et le frottement du fond. Néanmoins, (Jirka, 2001) a montré que le frottement dans les canaux peut jouer un rôle important dans l'échange de quantités de mouvement. Cependant, en modélisation numérique, l'analyse d'un écoulement turbulent traversant un brusque élargissement asymétrique a été examinée par (Vikram et al, 2010) afin de montrer la réduction de la force de passage dans la recirculation qui augmente avec la croissance du rapport d'élargissement.

L'évolution de la stabilité non linéaire dans les écoulements peu profonds de sillage a été validée par (Kolyshkin & Ghidaoui, 2003) où ils ont montrés que la formulation de l'instabilité hydrodynamique est régit de l'équation de Ginzburg-Landau. Par ailleurs, les résultats de l'étude expérimentale présentée par (Jiménez, 2004) ont montré que l'effet rugueux situé dans la couche limite est contrôlé par le nombre de Reynolds et la surface du fond. Dès lors, des simulations numériques directes révèlent, à travers la couche limite, que les fluctuations des vitesses dans l'écoulement turbulent possèdent un ensemble d'effet sur l'introduction des éléments rugueux (Akinlade, 2005). Cependant, des recherches théoriques, expérimentales et numériques relativement à la stabilité des écoulements peu profonds ont été largement évoqués par la communauté scientifique cette dernière décennie. Dans ce contexte, la littérature a fait référence aux conclusions d'analyses des résultats des travaux de recherche réalisés, particulièrement, par (Chu et al, 1983), (Chen & Jirka, 1998–2002), (Ghidaoui & Kolyshkin, 1999) & (Uijtewaal et al, 2003).

Pour étudier l'influence de la stabilité des écoulements turbulents sur le phénomène de l'alluvionnement et le dépôt des sédiments en suspensions dans des réservoirs peu profonds et géométrie variable, des essais expérimentaux ont été menés au laboratoire *LCH*, *EPFL* par (Kantoush, 2008). Il a montré que lorsque l'écoulement devient pleinement turbulent des configurations asymétriques se développent en dépit des conditions géométriques expérimentales identifiées initialement symétriques. Cependant, un large éventail d'informations données par les combinaisons des paramètres adimensionnels géométriques testés dans des conditions hydrauliques constantes et variables. Néanmoins, son travail est devenu une référence pour de nombreux chercheurs qui ont basés leurs résultats de travail sur la vérification des études théoriques, essais expérimentaux et des modélisations numériques.

Avec des simulations numériques, un autre examen basé sur la stabilité linéaire des écoulements bidimensionnels a été donné dans les réservoirs peu profonds d'entrée et sortie symétrique. Ce modèle numérique a été basé sur un arrangement original des volumes finis développées à l'Université de Liège. (Dewals et al, 2008) a pu examiner la distribution d'un écoulement légèrement perturbé à l'entrée du réservoir afin de comparer la solution théorique à l'application expérimentale avec la validation numérique. Il a confirmé que le mode d'écoulement asymétrique développé dans une géométrie symétrique a été examiné par la profondeur moyenne d'écoulement, décrivant la croissance de perturbations transversales résultant, principalement, des conditions initiales et aux limites.

Un modèle similaire a été conçu par (Dufresne et al, 2010) à l'Université de Liège (Belgique) pour élargir son étude expérimentale. Par l'introduction d'un critère beaucoup plus général, il a impliqué, à la fois, la longueur et la largeur du bassin ainsi que le facteur d'élargissement. La comparaison des résultats obtenus ont été également présentés bien que les expériences aient été portées sur la longueur de rattachement. Cet effet a montré, par l'analyse adimensionnelle, la classification des écoulements ($2D$) dans les réservoirs peu profonds afin de prédire la transition asymétrique et symétrique observée dans une section géométriquement symétrique. Cependant, l'accord entre les résultats de l'antérieur trouvés par Dufresne confirme la validité des essais effectués, en renforçant la confiance de ces résultats, tels qu'ils ressortent de deux installations similaires et indépendantes. Par ailleurs, un autre thème de recherche a été donné, principalement, sur la stabilité linéaire des écoulements bi-phasiques dans les réservoirs peu profonds.

Ce travail de laboratoire a été appuyé par une recherche de (Camnasio et al, 2011) qui a étudié l'effet de la validité du critère mentionné par Dufresne pour analyser la position asymétrique des canaux d'entrée et de sortie du canal sur le champ des vitesses superficielles. Par ailleurs, le volume et l'apport des sédiments en suspensions emprisonné dans le réservoir a permis de mettre en évidence la formation d'une zone de recirculation au milieu du bassin, principalement, dans la partie latérale pour des configurations géométriques identifiées initialement asymétriques. A cet effet, les résultats d'observations donnés par (Kantoush et al, 2008), (Dewals et al, 2008) & (Dufresne et al, 2010) sont pratiquement similaires soit en essais expérimentaux qu'en modélisations numériques. Ils ont montrés un parfait accord entre la recirculation d'écoulement observée dans le bassin peu profond d'entrée et sortie symétrique, exceptionnellement (Camnasio et al, 2011) a pris une entrée et sortie asymétriques.

En faisant appel à certains concepts physiques, géométriques et hydrodynamiques, l'influence des combinaisons géométriques des parois du réservoir rectangulaire sur le champ des vitesses est l'un de **nos principaux objectifs**. Ces objectifs présentés dans ce travail permettent d'examiner l'impact de la variation des paramètres de la géométrie de forme, le nombre de Reynolds sur le champ d'un écoulement bidimensionnel. Cependant, les résultats disponibles au *LCH* ont fait l'objet d'une autre prolongation d'un travail théorique et essais expérimentaux afin d'analyser le domaine de la stabilité linéaire des écoulements peu profonds sur un fond lisse et rugueux.

Notre contribution a été motivée par une étude axée sur les effets d'une turbulence pleinement développée dans un convergent d'entrée et sortie symétrique avec différentes données hydrauliques. En effet, le suivi de l'évolution de la morphologie du fond est l'information clé pour l'interprétation et l'évaluation des flux du transport de sédiments. A cet égard, le tourbillon, le nombre de recirculation et le mode d'écoulement sont très significatifs car la prévision correcte de ces caractéristiques est une condition nécessaire pour faire correspondre la phase moyenne de l'écoulement. De ce fait, les structures cohérentes influençant la direction du jet contrôle, fortement, le cisaillement du fond du bassin. Néanmoins, l'identification correcte de la configuration du mouvement, la quantification des vitesses moyennes d'écoulement caractérisant le jet principal, les tourbillons et les zones de recirculation sont d'une importante influence dans les applications hydrodynamiques. En effet, la stabilité linéaire des écoulements superficiels évalue une transition au-dessus d'un fond lisse et rugueux lorsque les conditions hydrauliques et géométriques expérimentales sont conservées. Dans ce sens, notre thèse s'appuie, essentiellement, sur des résultats expérimentaux déjà acquis auparavant dont l'approche développée comporte le volet de mesure *in situ* afin d'étudier l'influence de la rugosité du fond sur la transition du champ d'écoulement symétrique et asymétrique dans une géométrie symétrique.

L'effet de la dynamique tourbillonnaire sur le champ des vitesses de surface dans les réservoirs peu profond et géométrie variable a fait l'objet d'une recherche plus élargie. Avec des approches théoriques et expérimentales par rapport à celle mentionnées dans la littérature dans le but de valider les résultats expérimentaux obtenus sur un fond lisse et rugueux. Ce travail a permis une évaluation des modèles d'écoulements qui se développent en fonction du rapport longueur-largeur ainsi que du rapport d'élargissement dans la même installation et pour les mêmes conditions hydrauliques. En effet, la rugosité du fond a été testée sur trois surfaces rugueuses différentes, disposées d'une façon homogène et collées sur toute la totalité du fond. Toutefois, l'effet du frottement du fond a été étudié par des essais menés dans un réservoir rectangulaire peu profond d'entrée et sortie symétrique au-dessus d'un fond lisse et rugueux. Néanmoins, pour un liquide de viscosité relativement faible, l'influence du frottement interne n'est appréciable qu'à proximité des parois solides limitant la section occupée par un l'écoulement. La mise en place des dispositifs d'essais instrumentés par les deux techniques (*UVP*, *LSPIV*) ont été décrites dans les prochains chapitres en s'appuyant sur une synthèse bibliographique approfondie.

Avec des mesures expérimentales, le domaine de la stabilité linéaire des écoulements bidimensionnels a été analysé pour déterminer la rugosité équivalente moyenne du fond. Le programme expérimental, la configuration d'écoulement, la géométrie du bassin ainsi que les différentes procédures d'essais sont décrits. A la fin, nous pouvons conclure que la stabilité linéaire des écoulements superficiels évalue une transition au-dessus d'un fond lisse et rugueux lorsque les conditions hydrauliques et géométriques expérimentales sont conservées.

Plan de la thèse

Le présent travail se concentre sur le traitement des données et l'analyse des vitesses obtenues à partir des mesures *LSPIV*. Par ailleurs, nous avons tenté d'élargir ces travaux de laboratoire menés par (Kantoush, 2008) & (Camnasio et al, 2011) afin de comparer les résultats obtenus dans un modèle similaire fabriqué à l'Université de Liège (Belgique) par (Dufresne et al, 2010). En effet, les bases de la mécanique des fluides sont des procédés qui permettent des études paramétriques systématiques ainsi que l'utilisation du concept des lois fondamentales des écoulements sont également discutées.

Notre travail de recherche s'articule d'une manière générale autour de quatre chapitres. Notre travail de recherche s'articule d'une manière générale autour de cinq chapitres montrés, essentiellement, comme suit :

- **Le premier chapitre** se compose d'un état d'art où une synthèse bibliographique est passée en revue, après avoir mis la lumière sur les études théorique et différentes applications expérimentales et numériques. Ainsi, cette revue de littérature portant sur des travaux antérieurs menés dans des réservoirs peu profonds et géométrie variable sont donnés par ordre chronologique. Des notions de base liées aux écoulements bidimensionnels et à la turbulence des écoulements ont été, essentiellement, défini. Ces brefs rappels d'analyse des travaux antérieurs, particulièrement, ceux menés par (Kantoush, 2008) et (Camnasio et al, 2011) visent à établir les connaissances de la recirculation dans une eau peu profonde.
- **Le deuxième chapitre** décrit la recherche au sein du laboratoire *LCH* qui définit ultérieurement deux techniques de mesure optiques et ultrasons. Une présentation de la synergie du laboratoire a été brièvement décrite. L'examen fournit par les chercheurs où de différents travaux ont été mentionnés au laboratoire. L'analyse d'une synthèse bibliographique a été examinée en donnant l'objectif et le but de ce travail de recherche.

- **Le troisième chapitre** est consacré à l'étude préliminaire menée dans une installation d'essais via la méthode *UVP* (Ultrasonic Velocity Profiler) afin de déterminer la rugosité équivalente moyenne. Le choix des instruments de mesure de résolution spatiale et temporelle qui fixent les limites de l'étude sont montrés. Les caractéristiques des instruments de mesure sont également décrites et leurs capacités sont discutées. La présentation des outils expérimentaux ayant permis la réalisation de ce travail a été mentionnée. Trois surfaces rugueuses du fond ont été étudiées dans le réservoir peu profond et géométrie variable. Les capacités et paramètres testés, la procédure d'essai et la technique de mesure sont décrits.

Le principe de mesure fonctionnant par échographie à effet Doppler pulsé et l'hypothèse de Prandtl ont été aussi mentionnés dans ce travail. Néanmoins, la notion de base de la couche limite sur un fond lisse et rugueux, est liée à la conception de la formulation de la loi de la paroi relative à la vitesse d'écoulement. Les résultats de mesures des paramètres hydrodynamiques pour définir les conditions aux limites des écoulements sont montrés. Une synthèse des essais réalisés est présentée dans cette partie. Ce chapitre présente la première phase des analyses des résultats expérimentaux sur fond lisse et rugueux.

- **Le quatrième chapitre** dans la première partie, la technique du *PIV* (Particle Image Velocimetry) est développée pour l'étude des liquides basés sur l'image classiquement utilisée en laboratoire. Cette méthode non-intrusive et innovante permet de mesurer les champs de vitesses de surface par analyse d'images nommée Large-Scale Particle Image Velocimetry. Durant l'expérimentation, cette méthode a été mise en place avec une instrumentation qui a été développée pour mesurer les vitesses de surface pour les différentes géométries de réservoirs.

Pour mieux maîtriser le processus physique des écoulements bidimensionnels dans les réservoirs peu profonds, des essais ont été réalisés avec la *LSPIV*. Ensuite, les moyens mis en œuvre sont détaillés. Les caractéristiques des instruments de mesure sont également discutées. Par ailleurs, le modèle physique, les techniques utilisées et les caractéristiques de mesure ainsi que les procédures d'essais ont été également montrés dans cette partie. Parmi les techniques en développement, la méthode de mesure des vitesses en surface qui décrit les dans un réservoir peu profond et géométrie variable associé à un logiciel utilisé dans le traitement et le calcul.

Par voie expérimentale, un important travail de recherche porte sur l'étude de l'écoulement superficiel au-dessus d'un fond rugueux et lisse est mentionné. Des écoulements superficiels résultant des zones de recirculation symétrique et asymétrique ont été montrés. En outre, les phénomènes observés au cours des essais (modèles asymétriques en géométrie symétrique), les mesures et les résultats des différents réservoirs à géométries variables sont comparés et discutés. Influence de la longueur, la largeur de la géométrie du réservoir sont clairement analysée. La classification des régimes d'écoulement sont donnés en fonction de la géométrie du réservoir et des conditions d'écoulement hydraulique. Pour décrire l'effet de la géométrie du réservoir sur le régime d'écoulement à fond lisse et rugueux sont développées. Dans la deuxième partie de ce chapitre, la discussion des résultats obtenus, montrent l'influence de la géométrie du réservoir rectangulaire peu profond sur le mode d'écoulement. Par la suite, l'effet du fond rugueux sur la configuration de la recirculation asymétrique dans une géométrie symétrique a été étudié en détail.

La présente partie introductive montre que les tourbillons observés en écoulement peu profond sont associés à un fond lisse et rugueux. Celui-ci est lié à une recirculation exercée par le cisaillement générée par ce type d'écoulement. Les études antérieures ont montré qu'il existe une relation entre la topographie du fond et la distribution de vitesses à la surface libre et que cette information peut être utilisée pour estimer les variations de la surface du fond du réservoir (topographie du lit dans le cas d'une rivière) de géométrie simple (Muste et al, 2000). La comparaison des deux fonds lisse et rugueux a été ensuite évaluée par le changement de la longueur et largeur du réservoir qui ont été diminuées systématiquement pour un débit maintenu constant. En dépit d'une géométrie symétrique, des champs d'écoulement asymétriques ont été développés par rapport à l'axe central du bassin. Par la suite, le sens des lignes de courants ont été montrées par l'examen d'un débit réduit à la moitié avec une profondeur d'eau variable, montrant que les tourbillons observés en écoulement peu profond sont associés à un fond différent.

- **La dernière partie** de ce travail expose également les principaux résultats de cette étude qui sont regroupés dans une conclusion générale et accompagnés d'une discussion sur les perspectives envisagés. Des recommandations sont proposées pour les recherches futures.

Chapitre I

REVUE DE LITTERATURE

INTRODUCTION

Durant cette dernière décennie, les progrès techniques ont permis la validation des processus de contrôle plus complexe où ces progrès ont été réalisés pour la prédétermination de beaucoup de paramètres et phénomènes. Dans ce sens, une étude bibliographique a été développée dans le but de regrouper les différents travaux de recherche ainsi que les résultats expérimentaux relativement aux écoulements turbulents dans les réservoirs peu profonds. D'autres recherches bibliographiques ont été menées afin d'examiner les caractéristiques géométriques et hydrodynamiques du champ de l'écoulement bidimensionnel. A cet effet, l'étude du processus de la sédimentation des barrages-réservoirs se concentre sur les notions de la turbulence, la modélisation physique et l'analyse du phénomène.

Ce chapitre consiste en un dénombrement sur les domaines interférant avec les écoulements turbulents pleinement développé ($h = u$) dans des réservoirs à fond lisse et rugueux. Parallèlement, cette partie résume les différentes approches de la turbulence où nous donnons un aperçu théorique sur la particularité des études expérimentales effectuées sur un fond lisse et rugueux des écoulements turbulents. L'art de mesurer les caractéristiques relatives aux écoulements à surface libre s'intéresse, néanmoins, aux nombreuses valeurs mesurables qui se distinguent par : les grandeurs spécifiques regroupant le transport solide par suspensions telles que ($B, L, l, b, h, I, k_0, u, Q$). Par ailleurs, les valeurs du réservoir données par la hauteur d'eau, la pente du fond, la rugosité du lit et la vitesse moyenne d'écoulement en un point ainsi que le débit moyen d'alimentation à travers une section montre le volume d'eau passant durant une unité de temps par la relation suivante:

$$Q = V/t \quad (1.1)$$

La majeure partie de notre travail s'articule, essentiellement, autour de la première classe des mesurables, principalement, la vitesse moyenne d'écoulement et la vitesse superficielle

déterminées sur les deux fonds lisse et rugueux. L'effet de la rugosité du fond, examinée expérimentalement, sur le champ d'écoulement de surface a été examiné par des techniques des mesures des vitesses. Suivant la surface plane, la répartition de ces vitesses en écoulement turbulent peu profond à fond lisse et rugueux a été menée par une étude expérimentale. Cependant, nous donnons une description relative au champ des vitesses superficielles dans les réservoirs à faible profondeur pour montrer le mode de recirculation asymétrique dans une géométrie symétrique. Nous définissons la couche limite par les différentes hypothèses et équations de la mécanique des fluides. Les phénomènes physiques sont brièvement introduits avec l'illustration des formulations, par ailleurs, les hypothèses sont les conditions qui permettent de résoudre ces équations, ne sont que la continuité et la quantité de mouvement.

Ce travail repose sur une étude expérimentale du champ de vitesses dans le bassin peu profond à fond lisse et rugueux. Par ailleurs, l'écoulement permanent et uniforme a été décrit par deux facteurs géométriques adimensionnels de forme et d'élargissement dans le but de montrer les conditions sous lesquelles le champ d'écoulement bascule d'une asymétrie instable vers une symétrie plus stable. Une série d'essais favorablement chronologique correspondante aux combinaisons géométriques exprimées sous la forme de longueurs et largeurs (L/B) a été étudiée. Avec le changement des paramètres géométriques plusieurs champs d'écoulement ont été obtenus, ce ci convient à décrire l'effet de la variation d'une longueur variable sur le champ des vitesses superficielles pour une largeur maintenue constante le contraire est vrai. Les principales zones observées le long du réservoir rectangulaire à large échelle se sont rétrécies pour donner une seule configuration de recirculation pour un facteur d'élargissement constant. Dès lors, le jet principal observé dans le réservoir se dirige tout droit de l'entrée vers la sortie le long de l'axe central avec comme conséquence deux zones de recirculation notée symétrique. Si le facteur de forme diminue, l'écoulement donne lieu à une déviation sur l'un des deux côté du jet principal, cela peut conduire à la formation d'une configuration asymétrique en dépit de la symétrie géométrique du bassin. Alors que dans le coin amont du bassin dit « zone morte » sont positionnés les deux petits tourbillons de forme triangulaire en changeant alternativement de taille et de forme en tournant dans le sens contraire des deux principales.

Pendant, les deux premières séries d'essais, les grandeurs mentionnées (Q, h, l, b) ont été maintenues constantes pour l'évaluation de l'effet des longueurs et largeurs du bassin sur le

champ d'écoulement pour un fond rugueux. Tandis que dans la troisième série d'essais, plusieurs paramètres ont été analysés notamment le débit moyen d'alimentation réduit à la moitié pour une profondeur variable. La série d'essai effectuée dans les écoulements à surface libre, la profondeur d'eau doivent satisfaire la condition de pression (pression atmosphérique) le long de la paroi où la vitesse doit être parallèle à la paroi du canal. Le but est de permettre l'identification des conditions de variation du jet pivotant entre une configuration asymétrique instable et une symétrie plus stable. Cela peut offrir la possibilité à l'estimation de l'effet de la turbulence dans le bassin de référence pour différentes conditions de bords. Pour un débit variable (Q) la relation des caractéristiques hydrauliques est utilisée en fonction de la profondeur d'eau amont et aval $Q = f(h)$ maintenue constante.

En conclusion, au fur et à mesure que la longueur du bassin est en diminution, les petits tourbillons commencent à disparaître.

I.1. APPROCHE DE L'EAU

L'eau est une ressource vitale à la vie mais sa répartition géographique, spatiale et temporelle reste inégale où l'appel à un partage équitable est fondamentalement nécessaire (Arrus, 1985). La plus forte demande mondiale de l'eau a toujours été associée à une diminution d'offre largement insuffisante dont son prélèvement approche le niveau limite des ressources disponibles. Cette approche est un objectif pour assurer la bonne gestion et la pérennité de la ressource bien exploitée. D'ailleurs, cette pénurie mondiale de l'eau douce continue à présenter pour l'humanité, dans de nombreuses régions, un des problèmes les plus lourds et les plus prioritaires du développement durable.

Ces dernières années, les problèmes hydrologiques ont autant intéressé l'opinion publique, les autorités et même la presse nationale et internationale. A cela s'ajoute la gestion urbaine des systèmes des réseaux hydrauliques nécessitant plus de résistances au changement climatiques qui ne font qu'accroître les difficultés liées à l'approvisionnement en eau. En effet, les principaux partenaires de la gestion des ressources en eau tels que les directeurs des administrations en charge de l'eau, les dirigeants des organismes de l'eau et du monde académique peuvent répondre à une demande, continuellement, sans cesse croissante d'origine urbaine, agricole et industrielle.

Par ailleurs, il faudrait aussi prendre en considération la capacité de payer la facture, particulièrement, à une population pauvre. Ainsi, il est du devoir des gouvernements dans les pays en voie de développement de fournir cette ressource fondamentale. Toutefois, la croissance démographique ne peut être satisfaite en eau que par le recours à la construction des barrages-réservoirs soit artificiels ou naturels. Son intérêt est fondamental dans les zones arides et semi-arides pour gérer quotidiennement cette ressource précieuse. D'ailleurs, la bonne gouvernance a contribué à la mise en place des lois et des décrets d'application où les textes réglementaires de plus en plus précis exigent une performance et une bonne évaluation afin d'intervenir en cas de disfonctionnement.

Un barrage-réservoir est dimensionné, généralement, pour une durée de vie d'environ plusieurs centaines d'années (Figure 1.1) où sa cuvette devient, malheureusement, menacée en temps très court à cause du processus de l'alluvionnement massif. Néanmoins, l'incertitude dans son dimensionnement peut entraîner, lors du passage des crues, des risques néfastes qui ne font qu'accroître le problème hydrique. En effet, les inondations prévisionnelles, la pollution et les crues chargées en sédiments fins provenant du bassin versant participent au phénomène de la sédimentation. En effet, ces sédiments en suspensions rencontrés dans la gestion des barrages-réservoirs présentent un des problèmes les plus complexes du transport solide. Cependant, leur conservation contre ce phénomène s'est avérée extrêmement coûteuse dans les pays de relief trop accidenté. En effet, pour le maintien du potentiel hydraulique, ces réservoirs nécessitent un contrôle continu et une protection permanente avec une gestion rationnelle à cause de leur utilisation intensive. Pour atténuer le processus de l'alluvionnement à l'amont de la retenue, il faut gérer avec prudence l'infrastructure hydraulique qui est amputée chaque année d'une capacité sédimentaire estimée à des millions de mètre cube (Choufi, 1997).

En conclusion, il est possible de réduire ces risques en apportant un grand soin aux projets de recherche hydrotechniques afin d'adopter des mesures de prévention.

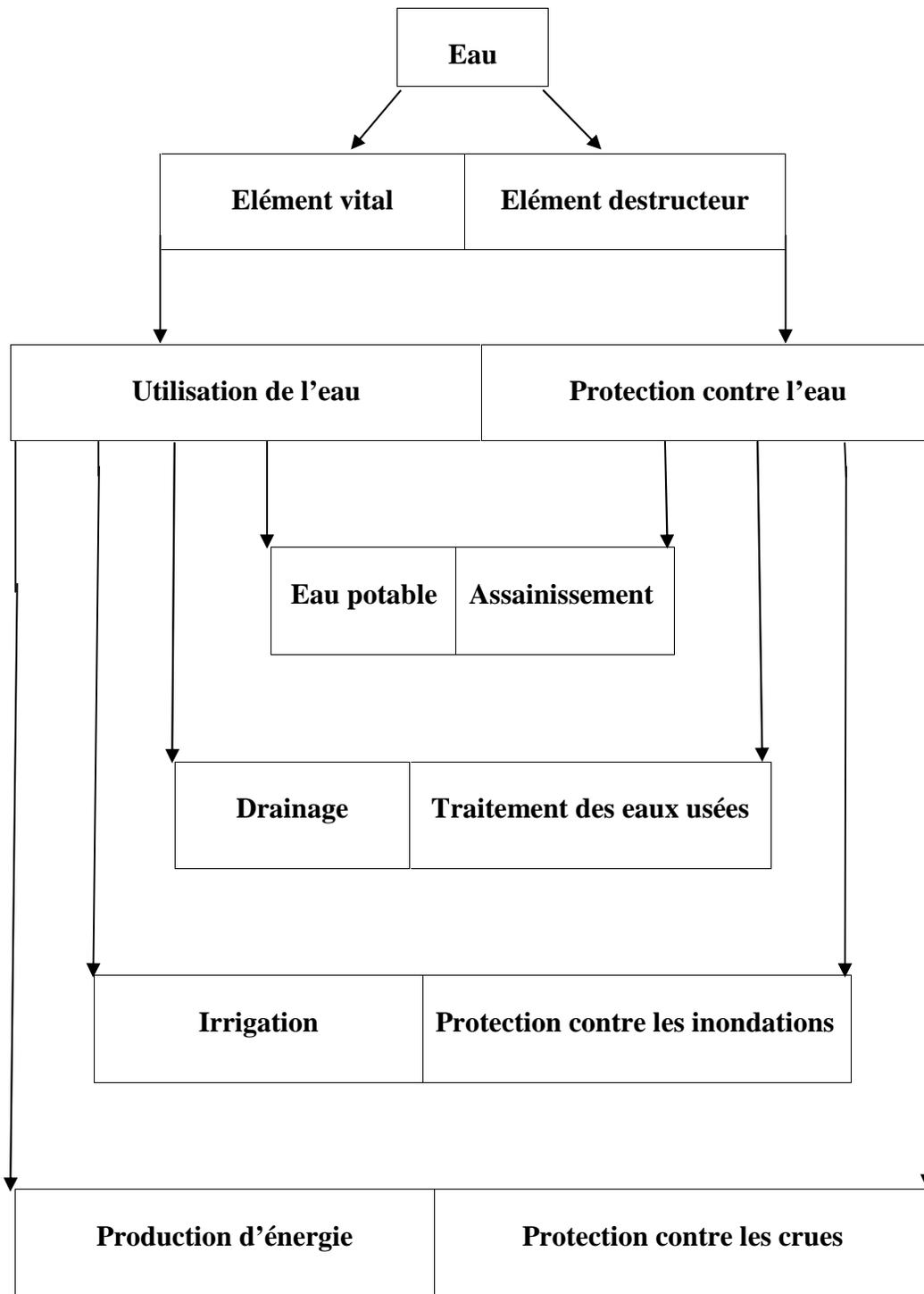


Figure 1.1 : Rôle de l'eau dans la nature

I.2. SONDES ULTRASONNS

I.2.1. Caractéristiques des sondes *US*

Une sonde *US* est constituée d'une unité de mesure, d'un capteur composé d'une pointe conique agissant comme un prisme et d'un utilisateur interface entre l'électronique et le milieu à explorer (Figure 1.2). Ces sondes de diamètre ($d' = 5mm$) et de longueur ($l' = 40mm$) utilisées durant les essais, sont issus de la même marque et possèdent les mêmes caractéristiques référenciées et testées par (Met-flow S/A, 2005), la société qui garantit la mise en place et l'entretien de l'instrument. Grâce à l'évolution rapide des techniques des mesures des vitesses d'écoulement par les procédés ultrasons, qu'une sensible amélioration à la quantification et à la compréhension de la méthode a pu être récemment perçue. Actuellement, ces méthodes fondées sur les rayonnements sont les techniques les plus utilisées, principalement, les sondes Ultrasons.

Dans les écoulements turbulents, la méthode de mesure *UVP* repose sur le fonctionnement des sondes acoustiques en mode Doppler pulsé afin de mesurer le champ des vitesses horizontales. Cette technique est utilisée pour la mesure des vitesses moyennes où l'acquisition des données est transférée vers un autre *PC* réservé spécialement pour le traitement. Lorsque le transducteur est constitué d'une seule partie qui est alternativement récepteur-émetteur, l'émission est dite pulsée (notre cas). Tandis que, si le transducteur travaille uniquement en émission, il pourra convertir l'énergie électrique en énergie mécanique où il génère une onde acoustique et inversement (le capteur constitue un émetteur-récepteur ou récepteur-émetteur en même temps). Le signal électrique fournit par la sonde est échantillonné à la fréquence de répétition des impulsions acoustiques. En mode réception d'écho, l'émission de l'onde est la fréquence de répétition des impulsions des ondes acoustiques définie par f_{PRF} (Pulse Repetition frequency) où sa conversion en vitesses nécessite un bon nombre de points de mesure (Jaàfar et al, 2005). Les travaux de (Rolland, 1995) ont montrés que les instruments acoustiques « Acoustic Doppler Velocity Profiler » sont mieux adaptés à l'étude des écoulements turbulents car la mesure est plus rapide où les fréquences d'échantillonnage sont bien adaptées. Ces instruments perturbent très peu l'écoulement et apparaissent plus appropriés à l'emplacement précis aux points de mesure et aux besoins des vitesses de l'écoulement (De Cesare, 1998), (Taketa, 1999), (Labioud, 2005), (Zaouali, 2008) & (Kantoush, 2008). Ce type d'instrument fournit la possibilité

d'acquérir des informations spatiotemporelles des particules liquides sans, pour autant, faire des hypothèses simplificatrices de la turbulence (Mihoubi et al, 2007).



Figure 1.2 : Transducteur utilisé dans les essais *UVP*

$$l' = 40mm , d' = 5mm$$

I.2.2. Propriétés des ondes acoustiques

Les ondes acoustiques se manifestent sous la forme d'une variation de pression locale, définit comme une déformation autour d'un point d'équilibre qui se propage dans le milieu liquide. Un aller-retour autour de la propagation de l'onde nécessite un support mécanique élastique (compressibilité) et inertiel (masse volumique). Au cours de la propagation, les ondes acoustiques sont définies par le mode de vibration des particules qui sont distinguées dans le milieu liquide où chaque type est associé à une vitesse longitudinale (u). Ces ondes horizontales sont caractérisées par le sens des vibrations des particules et parallèles à la propagation de l'onde.

La position spatiale du volume de mesure est calculée sur la base du temps du parcours de l'onde ultrasonore « aller-retour » appelée la durée de l'émission temporelle (t) qui est une variable temporelle sans que pour autant tenir compte de la viscosité du milieu liquide. Par ailleurs, le champ de la pression acoustique (P_{ac}) suit, éventuellement, une équation aux dérivées partielles suivant les variables spatiales (x, y, z) nommée «Equation de la propagation de l'onde»

Le découpage régulier de l'écho en (n) intervalles permet d'associer à chaque information en retour une distance (X) déterminée par un aller-retour effectué par l'onde.

$$X = \frac{C_s}{2} t \quad (1.1)$$

C_s : Vitesse du son dans le liquide considéré (célérité), t : Durée de l'émission temporelle (Temps du parcours de l'onde US)

Lorsque la sonde émet une fréquence de base (f_0), son faisceau Doppler (f_D) est réfléchi par les particules en mouvement par rapport à la sonde qui joue en même temps le rôle du récepteur. Son effet est défini par la variation de la fréquence relative à une onde acoustique entre l'émetteur et le récepteur résultant du mouvement, donné comme une différence entre la fréquence reçue et celle émise suivant la relation:

$$f_D = f_0 \frac{V_r}{C_s} f_0 \quad (1.2)$$

La variation de l'onde réfléchi par rapport à l'onde émise est interprétée comme un décalage de fréquence Doppler (f_D) permettant de calculer la composante de la vitesse de la particule suivant le sens de l'axe de la sonde. Les paramètres (f_D , f_0 , C_s) permettent de calculer la vitesse moyenne d'écoulement en présence de la célérité du son. En mode mono statique, la méthode UVP n'a accès qu'à la composante de la vitesse radiale (V_r) donnée par :

$$V_r = \frac{f_D C_s}{2 f_0} \quad (1.3)$$

f_0 : Fréquence de base ultrason de transmission ; f_D : Fréquence ultrason à effet Doppler réfléchi par les particules. V_r : Composante radiale de la vitesse mesurée par UVP monitor, C_s : Vitesse du son dans le liquide et f_{PRF} : Fréquence des impulsions de répétition.

I.4. RUGOSITE THEORIQUE

La présence des aspérités solides du fond forment toujours des obstacles à l'écoulement, où ces aspérités entraînent l'apparition d'une longueur caractéristique de l'écoulement proche du lit (Nikuradse, 1933). Cette longueur est défini comme une rugosité équivalente (k_0) qui n'est pas la hauteur géométrique des rugosités, mais, comme la longueur visqueuse qui dépend des

paramètres du régime de l'écoulement. Les phénomènes caractéristiques des écoulements naturels ou artificiels dépendent, fortement, des conditions initiales et aux limites qui peuvent être différents d'un cas à l'autre sous l'effet de la diversité de la taille, de la forme des berges et du fond. En écoulement à surface libre, la rugosité (k_0) est déterminée, théoriquement, par les méthodes empiriques reliant la vitesse moyenne à la profondeur d'eau.

Dans le dimensionnement des écoulements à surface libre, nombreux sont les formules empiriques établies en usage pour la détermination de la rugosité du fond. En outre, la formule la plus utilisée est celle de (Manning-Strickler) qui a connu un succès incontesté auprès des ingénieurs hydrauliciens. Elle est devenue le choix le plus répandu qui exprime la relation entre la caractéristique géométrique du canal et la vitesse d'écoulement. Il existe les formulations empiriques et celles issues de la théorie de la couche limite sur paroi. Ces formulations empiriques étaient déjà employées bien avant que St Venant ne développe les équations qui portent son nom. En effet, les relations, fréquemment, utilisées est celle de (Chézy, 1775) qui était le premier hydraulicien à l'avoir proposé en effectuant l'étude de l'amenée d'eau établit l'équation d'un écoulement uniforme pour la première. Cependant, la relation établie l'hypothèse du régime permanent et uniforme sous sa forme la plus simple pour calculer la vitesse dans la section droite, donnée par l'équation de la continuité :

$$Q/S = u = C_1 \sqrt{I \cdot R_H} \quad (1.6)$$

$$u = C_1 \sqrt{I \cdot R_H} \quad (1.7)$$

$$u = k_0 \cdot I^{1/2} R_H^{2/3} \quad (1.8)$$

u : Vitesse moyenne de l'écoulement dans la section de mesure, R_H : Rayon hydraulique, C_1 : Coefficient qui rend compte du frottement au fond, I : Pente de la ligne d'eau=Pente géométrique du fond du canal. Cette formulation a été reprise par Manning en 1885 qui modifia la puissance du rayon hydraulique de 1/2 en 2/3 et introduisit le coefficient de Manning, qui rend compte de l'intensité du frottement. Par la suite, Strickler en 1923 exprime le coefficient de Manning en fonction de la dimension moyenne des éléments de rugosité. On peut, également, citer Hagen qui a également proposé de nouvelles formulations, en modifiant la puissance du rayon hydraulique.

Pour la prise en compte de la taille de la rugosité, différentes propositions ont été avancées par plusieurs auteurs afin d'exprimer le rayon hydraulique alors que certaines formules ne contiennent même pas ce coefficient [Tableau 1.1].

$$u = C_1 I^{1/2} = R_H^{2/3} \quad (1.9)$$

Ces formules empiriques sont toujours utilisées de nos jours, la formule de Strickler étant celle la plus plébiscitée par les ingénieurs hydrauliciens. L'inconvénient de ces formulations est qu'elles nécessitent parfois d'être ré-calibrées en fonction des conditions de l'écoulement.

Tableau 1.1 : Valeurs de l'exposant ($R_H = h$) proposé par différents auteurs

Auteur	Date	Exposant R_H
Chezy	1775	0.5
Hagen	1854	0.714
Gaukler	1868	0.4
Tillman	1914	0.7
Manning	1919	0.667

D'autres formulations se basent sur la théorie de la couche limite développée par Prandtl en 1904. Dans un premier temps, cette théorie a été validée pour les écoulements en conduite sur les parois lisses. Plus tard, Nikuradse (1933) entreprend une vaste campagne expérimentale sur les pertes de charges en conduites rugueuses. Ainsi, en se basant sur le fait que le profil de vitesse est du type logarithmique pour un écoulement turbulent, uniforme, invariant selon la direction transverse sur la paroi, il en déduit le coefficient de frottement par intégration de la vitesse sur la verticale, et montre qu'il est également fonction d'une longueur équivalente de rugosité k_0 , qui est un paramètre hydrodynamique lié au frottement.

$$k_0 = \frac{u}{R_H^{2/3} I^{1/2}} \quad (1.10)$$

$$k_0 = \frac{Q}{R_H^{2/3} I^{1/2} S} \quad (1.11)$$

Si l'écoulement dans le canal est vraiment turbulent rugueux (qui est le cas) cette équation est utile où les contraintes de viscosité sont souvent prises en compte.

Le rayon hydraulique (R_H) d'un canal à surface libre de largeur (b) est déterminé par le rapport de la section de surface (S) au périmètre mouillé (t)

$$R_H = \frac{\text{Section}}{\text{Périmètre mouillé}} \quad (1.12)$$

Dans un réservoir rectangulaire de section infiniment large ($h \ll b$), le rayon hydraulique R_H est sensiblement égal à la profondeur d'eau qui est souvent choisi comme longueur de référence :

$$R_H \approx h \quad (1.13)$$

La profondeur hydraulique D_H du canal est définie par :

$$D_H = \frac{S}{B} \quad (1.14)$$

La rugosité théorique sera déterminée par la relation :

$$k_0 = \frac{Q}{h^{2/3} I^{1/2} S} \quad (1.15)$$

Q : Débit moyen d'alimentation, S : Surface totale de la section rectangulaire, et C_1 : Coefficient de Chézy qui est fonction de la surface du fond où il traduit, à la fois, la dissipation de l'énergie locale due au frottement contre les éléments rugueux du lit et la dissipation de l'énergie globale.

En conclusion, cette formulation est également très employée par les ingénieurs, car elle a l'avantage de donner de bons résultats pour un grand nombre de configurations d'écoulement.

I.5. REGIME D'ÉCOULEMENT

L'écoulement des liquides est un phénomène complexe qui ne se prête pas toujours à une analyse mathématique rigoureuse contrairement au solide car il peut se déplacer à différentes vitesses pour différentes positions. Les courants d'eau peuvent être classés dans différents groupes notamment dans un écoulement bidimensionnel laminaire et turbulent séparé pour un nombre de Reynolds faible ou bien développé.

Suivant les lois générales des écoulements, la variation des liquides se distinguent par les valeurs correspondantes aux propriétés considérées et restent suffisamment faibles. Cette étape consiste à présenter les caractéristiques des grandeurs et donner les propriétés statistiques et hydrauliques de la turbulence des écoulements à surface libre sur fond lisse que rugueux. En effet, la connaissance des paramètres de la turbulence peut aider à la compréhension de certains phénomènes, tels que le transport des sédiments, la conception et la résistance des ouvrages hydrauliques. Néanmoins, les études expérimentales mentionnées dans la littérature que les écoulements peuvent être classés comme turbulents pour un faible nombre de Reynolds. La stabilité des perturbations de ces écoulements est déterminée par des caractéristiques dynamiques employées par deux approches fondamentales théoriques et expérimentales.

L'application des formulations théoriques à l'écoulement naturel du Reynolds, à partir de ces caractéristiques, suppose l'identification préalable de son régime. Par ailleurs, la transition vers la turbulence se déroule, généralement, à partir des ondes de l'instabilité à faible amplitude qui apparaissent d'abord dans l'écoulement laminaire. Ces ondes d'instabilité peuvent avoir différentes origines d'amplification : au sein de la couche limite, les perturbations provenant de l'écoulement extérieur et l'état de la surface libre. En effet, la déformation de ces ondes et les lignes de vorticité associées à ces perturbations sont progressivement étirées par l'écoulement. Cette structure donne naissance à des instabilités qui apparaissent pour favoriser les régions turbulentes et la croissance puis la fusion de ces structures conduit à l'écoulement turbulent dit pleinement développé. En effet, la classification des écoulements naturels se réfère toujours à la viscosité et à la turbulence des particules liquides qui sont beaucoup plus complexe que le liquide-lui-même.

I.5.1. Nombre de Reynolds R_e

Le phénomène de la turbulence se caractérise par une apparence désordonnée et un comportement, difficilement, prévisible avec l'existence de nombreuses échelles spatiales et temporelles. Ce type d'écoulement a suscité une considérable attention au cours des deux dernières décennies, présentant un cas particulier d'une importante classe de régime d'écoulements. Son étude est conçue par le choix de l'instrument de mesure et la capacité de résolution spatiotemporelle qui fixe les conditions et les limites de l'étude dans le canal aussi étroit que large ($b/h < 5$).

L'étude de la turbulence est une science très ancienne qui montre l'état d'un liquide dans lequel la vitesse présente en tout point un caractère tourbillonnaire. Elle désigne la propriété d'un écoulement d'un fluide lui-même où la taille, la localisation et l'orientation varient constamment. Par ailleurs, la turbulence est caractérisée, principalement, par une forte variabilité dans l'espace et dans le temps où les caractéristiques changent d'une manière non déterministe. Ce mouvement turbulent présente des fluctuations des variables spatiotemporelles, notamment, le rotationnel des vitesses qui montre la présence des tourbillons dans les écoulements à surface libre. Pour traduire un écoulement turbulent, le fait que les forces d'inertie l'emportent sur les forces de viscosité, un nombre adimensionnel de Reynolds convenablement calculé doit être supérieur à un certain seuil.

Au-delà de ce nombre limite ($Re > Re_{cr}$), l'écoulement cesse d'être laminaire et peut basculer vers la turbulence où l'instabilité devient difficile à corriger. Par contre si le nombre de Reynolds est supérieur à la valeur critique, l'écoulement devient turbulent qui peut être, en réalité, décrit par des relations qui tiennent compte de l'interaction entre la pression et la vitesse.

De nombreuses études ont révélé que la localisation de la transition dépend fortement de l'amplitude des perturbations extérieures et de leur nature physique. Par ailleurs, ces écoulements unidirectionnels engendrent soit un ralentissement ou une accélération du courant provoquant une déformation du lit du canal sans divergence et convergence importante. Ce type d'écoulement est rencontré dans le domaine de la géophysique comme l'atmosphère et les écoulements dans les cours d'eau à surface libre type rivières.

L'introduction de certains paramètres comme le nombre de Reynolds (R_e), la viscosité cinématique (ν) et la masse volumique du fluide (ρ) fournit, à priori, une importante indication sur le régime d'écoulement. En effet, le régime turbulent est devenu, sans conteste, le domaine le plus étudié en hydrodynamique où il est caractérisé par un brassage intense du liquide, des pulsations de vitesses et de pression. Sachant avec un nombre de Reynolds pleinement développé, l'écoulement turbulent possède un large éventail de faible taille et de tourbillons à grande fréquence qui coexiste dans le volume de liquide. Néanmoins, celui-ci permet leur classement et considéré comme homogène ou inhomogène, mono ou multi-échelle, type jet, de grille, de conduite. Dans l'écoulement turbulent, la présence d'une paroi solide alliée à la viscosité du fluide tend à complexifier le mouvement du liquide, comparé à celle du type jet.

Les caractéristiques hydrodynamiques dans lesquelles l'importance pratique des écoulements n'est pas turbulente signifient que les liquides sont instables, même si ces mouvements sont réguliers, fortement irréguliers, bidimensionnels ou rotationnels dans l'espace et dans le temps. En raison de sa complexité dans plusieurs études pratiques, ce régime turbulent a été étudié dans différentes applications technologiques notamment dans les échangeurs de chaleur, les lames de turbine et les coques sous-marines des bateaux. Les écoulements à surface libre en eau peu profonde peuvent être considérés comme des écoulements à nombre de Reynolds très élevé, permettant l'utilisation de certaines relations de la couche limite (Graf et al, 1991). A l'inverse, pour les faibles nombres de Reynolds, l'écoulement demeure laminaire d'une manière permanente avec un caractère régulier. Une éventuelle stabilité est produite où cela rend compte du rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses se traduisant par le paramètre adimensionnel du nombre de Reynolds R_e :

$$R_e = \frac{\rho v^2 / D}{\mu / D^2} \quad (1.16)$$

$$R_e = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (1.17)$$

$$R_e = \frac{4 \rho u h}{\mu} \quad (1.18)$$

$$R_e = \frac{4uh}{\hat{\quad}} \quad (1.19)$$

Cette formulation est très souvent présentée sous une forme d'abaque et employée à l'aide du diagramme que nous la connaissons sous le nom du « diagramme de Moody ». En effet, la forme classique de ce graphique permet l'identification des régimes d'écoulement connus par les hydrauliciens sous le nom de Moody-Stanton qui porte actuellement son nom (Figure 1.3). Moody était le premier à proposer cet abaque représentant la relation de Colebrook--White. Ce diagramme prend en entrée la rugosité relative (k_0 / h) et le nombre de Reynolds afin d'obtenir le coefficient de frottement correspondant. Il existe des régimes d'écoulement extrêmes pour lesquels Colebrook--White propose une formulation qui est souvent employée par les ingénieurs hydrauliciens. Cependant, l'étude se traduit par un comportement dépendant de la loi logarithmique et la vitesse de frottement.

En conclusion, la dépendance du nombre de Reynolds et l'étude de la turbulence sur fond rugueux reste toujours un domaine méconnue et limitée à quelques points de mesures successivement espacés dans l'écoulement quelle que soit la manière et le mode d'opérer.

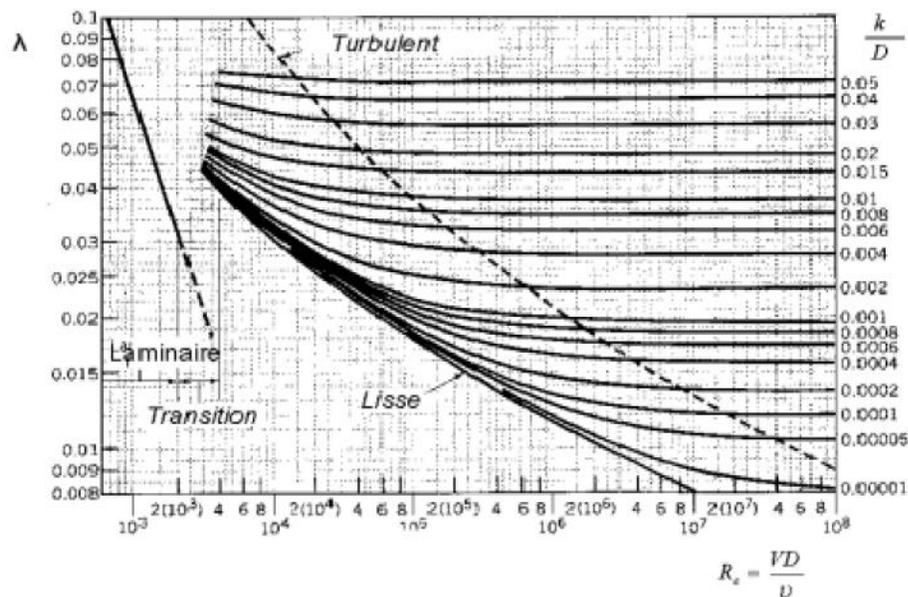


Figure 1.3 : Diagramme de Moody-Stanton

I.5.2. Nombre de Froude F_r

Le comportement complexe des écoulements à surface libre du type rivière peut avoir des effets non négligeables sur l'état de la turbulence. Pour étudier ce type d'écoulement, le processus se limite à un nombre de Froude interprété comme le rapport de la vitesse moyenne d'écoulement à la vitesse de propagation de l'onde de gravité (perturbation) à la surface libre.

$$F_r = \frac{u}{C_s} \quad (1.20)$$

Au laboratoire, ce nombre adimensionnel est, raisonnablement, pris assez faible et accompagné d'un Reynolds suffisamment élevé afin de créer un écoulement turbulent-fluvial dans le canal d'essai (Kantoush et al, 2007). Pour l'étude des écoulements turbulents peu profonds, les ondes de gravité possède une célérité plus grande que la vitesse du liquide ($u \leq C_s$) qui peuvent être nommées « Recirculation ». Cependant, elles sont reliées directement aux effets visqueux qui sont prépondérants près de la surface du fond. En effet, le nombre de Froude est souvent interprété comme le rapport d'énergie cinétique de l'écoulement à l'énergie potentielle de la pesanteur. Un modèle réduit est construit toujours sur la base de la similitude dynamique fondée sur le nombre de Froude qui sert à classer les régimes des écoulements.

$$F_r = \frac{V^2}{2gh} \quad (1.21)$$

Dans l'hydraulique de surface, si la vitesse moyenne d'écoulement est inférieure à la vitesse de propagation, le régime est dit fluvial où la perturbation pourra remonter de l'aval vers l'amont pour décrire une recirculation (tourbillon).

$$Fr^2 = \frac{Q^2 L}{gS^3} \quad (1.22)$$

$$Fr^2 = \left(\frac{Q^2}{S^2} \right) \frac{L}{gS} \quad (1.23)$$

$$Fr^2 = \frac{u^2 L}{gS} \quad (1.24)$$

$$F_r = \frac{u \sqrt{L}}{\sqrt{gS}} \quad (1.25)$$

$$F_r = \frac{u \sqrt{L}}{\sqrt{gLh}} \quad (1.26)$$

$$F_r = \frac{u}{\sqrt{gh}} \quad (1.27)$$

u : Vitesse moyenne d'écoulement, g : Accélération gravitationnelle et h : Profondeur d'eau.

I.6. ECOULEMENT DANS LES LARGES RESERVOIRS

I.6.1. Ecoulements bidimensionnels

Un milieu est dit peu profond si la taille des structures d'un écoulement horizontal qui le caractérise est plus grande que sa profondeur. Dans un domaine fluide, les écoulements peuvent être définis comme des flux horizontaux avec une dimension verticale, sensiblement, plus petite que les dimensions horizontales (Graf et al, 1993). Cependant, ces conditions impliquent que la profondeur de la masse d'eau h dans la direction verticale est beaucoup plus petite que son échelle caractéristique de longueur $h/L < 1$ dans le sens longitudinal de l'écoulement (Ujttewall et al., 2003). La formulation et la solution mathématique de ces écoulements permettent une importante simplification numérique en supposant que la distribution de la pression est approximativement, hydrostatique (Vreugdenhil, 1994). Dans l'aménagement des cours d'eau, les modèles horizontaux sont les seuls à être utilisés d'une manière opérationnelle où ils peuvent être définis comme des écoulements peu profonds, principalement, bidimensionnels. Dans ce type d'écoulement, nous admettons la composante verticale de la vitesse (v) est négligeable devant l'horizontale (u) où les dérivées par rapport à l'axe (x) sont plus petites devant celles par rapport à (z) (ce sont les hypothèses de la couche limite en écoulement bidimensionnel $2D$).

Toutefois, les écoulements classiquement associés à une dynamique quasi bidimensionnelle se sont révélés plus complexes et par conséquent ils sont considérés en grande partie comme des flux de cisaillement continu (Figure 1.4). Avec la diminution du cisaillement vertical, ces flux conduisent à une baisse d'énergie, tandis que leur augmentation engendre une surproduction de la turbulence qui se manifeste, principalement, au voisinage de la paroi solide du réservoir. Comme mentionné, précédemment, ce type d'écoulement unidirectionnel est largement omniprésent dans la nature où les rivières, les zones côtières ainsi que les retenues de stockage et même l'atmosphère se rangent dans cette catégorie (Weitbrecht et al, 2002). En effet, la quantification du cisaillement vertical linéairement stratifié en eau peu profonde et son influence sur l'écoulement ont fait, depuis une vingtaine d'années, l'objet de plusieurs études. Par ailleurs, dans certaines conditions les différents travaux expérimentaux ont prouvés que les procédés de la turbulence sont, fortement, affectés par la bi-dimensionnalité en raison de la faible profondeur. Dans cet esprit, une recherche bibliographique des écoulements peu profonds a été développée par la communauté scientifique notamment (Raffel et al, 1998), (Fujita et al, 1998) & (Meselhe et al, 2004).



Figure 1.4 : Réservoir à faible profondeur dans Lech River en Germany

I.6.2. Ecoulements tourbillonnaires

Dans un bassin à ciel ouvert, la formation des tourbillons en écoulement peu profond a été, intensivement, étudiée pour une large variété de recirculation d'eau et de l'air où la plupart de ces écoulements tourbillonnaires sont observés dans la nature notamment dans les rivières. Ils

peuvent changer, suivant les différents cas, en allant du plus petit tourbillon associé à la turbulence (de la fraction millimétrique) jusqu'au plus grand tourbillon atmosphérique et océanique estimé en centaines de km (Figure 1.5). En effet, ces tourbillons sont caractérisés par une faible profondeur présentant un spectre d'échelles spatiotemporelles très varié. La direction du mouvement rotatif est due, principalement, à la géométrie du bassin et aux micros courants d'eau créés lors d'une agitation, ou lors de la vidange du réservoir. Il existe un bon nombre de problèmes techniques dans les applications hydrodynamiques, pour lequel il suffit de connaître les caractéristiques de l'écoulement sans qu'il soit nécessaire d'en connaître la structure interne. Cependant, l'écoulement turbulent initialement tridimensionnel (3D) peut devenir bidimensionnel (2D) afin de faire place aux tourbillons contrarotatifs sous l'effet de grande profondeur stablement stratifiée en densité comme l'atmosphère, les mers et les océans. [Stratifié : si la masse volumique qui le compose varie avec l'altitude]. Le confinement vertical a tendance d'empêcher le développement des vitesses verticales afin de privilégier le mouvement horizontal dans les réservoirs. Comme nous l'avons mentionné, précédemment, les barrages-réservoirs peu profonds et les zones côtières sont le siège de cette forte dynamique tourbillonnaire. Ces zones sont liées à la faible épaisseur de l'eau et ont fait l'objet de plusieurs applications expérimentales et numériques par de nombreux scientifiques notamment (Chen et al, 1998). Nous discernons dans cette zone deux types de fond sur lesquels les tourbillons sont générés où le cisaillement exercé par la surface libre et le fond du réservoir peut mener à la génération de la vorticité.

En conclusion, la condition limite du fond du canal impose en plus de l'épaisseur de la zone interne, par frottement, une seconde caractéristique qui augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne du fond jusqu'à atteindre la surface libre.



Figure 1.5: Tourbillon dans un cours d'eau (Type rivière)

I.6.3. Décollement des écoulements

L'étude du passage d'un liquide supposé Newtonien (incompressible) à travers un élargissement brusque vers un bassin à large échelle est d'intérêt scientifique fondamental à cause de la formation indésirable du décollement. Ce phénomène qu'on cherche toujours à éviter voire à le réduire bien qu'il est omniprésent dans de nombreuses configurations d'écoulement dans la plupart des cas avec un objectif est de bien l'éliminer.

Les principaux processus physiques responsables de la séparation (décollement) des écoulements de recirculation ont été brièvement mentionnés où il existe de nombreux éléments qui exigent des particularités afin de minimiser l'effet du décollement de la surface. Néanmoins, ce phénomène est très difficile à prédire, compte tenu de sa sensibilité à divers paramètres, pour autant, les enjeux de contrôle du décollement est multiple soient technologiques ou bien environnementaux. Par contre, le processus de rattachement et de séparation de l'écoulement sont rencontrés dans différentes applications d'engineering. Ce phénomène se produit dans différentes applications d'ingénierie comme les canaux ouverts, les systèmes d'égouts, les bassins de stockage de sédimentation et les réservoirs peu profonds à cause du changement brusque dans la géométrie de l'écoulement interne (Kantoush, 2008).

Le décollement (séparation) et le rattachement des écoulements bidimensionnels sont dus en grande partie aux changements de la géométrie de l'écoulement notamment l'élargissement brusque du canal d'entrée par rapport au large bassin. Suivant la littérature les différentes applications du décollement ont enregistré une attention considérable dans l'Ingénierie. Par ailleurs, le décollement de la couche limite concerne les types d'écoulements bidimensionnels ou tridimensionnels comme illustré sur (Figure 1.6). Si le décollement se manifeste dans l'écoulement décéléré, la zone interne peut disparaître où la force de frottement tend à ralentir la vitesse horizontale (Graf & Altinakar, 1991). La zone de rattachement forme directement les conditions initiales du calcul du frottement superficiel et la quantification de la zone interne pour le processus de récupération aval. Par contre, la zone de décollement peut être prévue seulement si la longueur de la structure et la zone de rattachement sont correctement bien connues. La localisation de cette zone de rattachement et les structures d'écoulement jouent un rôle important pour les propriétés de la région de recirculation. Cependant, le décollement se caractérise en

écoulement bidimensionnel par une contrainte nulle au fond. Les effets de la rugosité du fond, le gradient élevé de la pression, les conditions initiales et aux limites de la turbulence, le décollement ainsi que la séparation des écoulements ont continué à être d'importants sujets de recherche à aborder.

En conclusion, cette étude fera l'objet d'une recherche et analyse plus complète et plus détaillée dans un avenir prévisible qui ne sera, probablement, jamais atteint à cause de sa complexité.

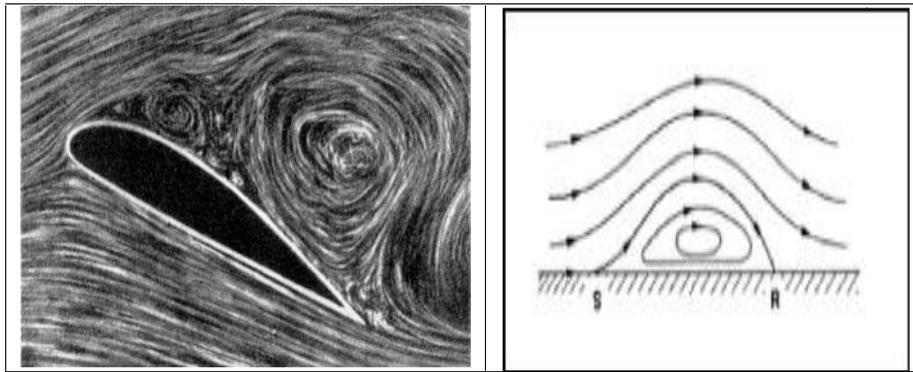


Figure 1.6 : Conception du décollement en écoulement plan 2D

I.6.4. Écoulement dans la couche limite

La couche limite est la zone d'interface entre une paroi solide et un liquide environnant lors d'un mouvement relatif entre les deux, conséquence de sa viscosité. De nombreuses propriétés de l'écoulement (frottement, transferts thermiques et présence éventuelle du décollement) dépendent, essentiellement, de cette couche. Par ailleurs, (Comolet, 1923) a donné un descriptif du phénomène de décollement dans la couche limite sur les profils. Dans l'esprit de cette hypothèse, la détermination de la couche limite est considéré comme une opération très compliquée surtout dans les écoulements cisailés qui entraînent un gradient piézométrique survenant dans l'épaisseur de la zone interne. Cependant, si l'épaisseur de la sous-couche laminaire est supérieure à la hauteur des éléments de la rugosité, la limite est dite hydrauliquement lisse. Par contre, si les éléments du fond rugueux pénètrent dans la zone de l'écoulement en plein turbulence, la frontière est dit hydrauliquement rugueuse.

Comme nous l'avons déjà vu, le nombre de Reynolds est le paramètre de contrôle de la transition mais au-delà d'une certaine valeur critique, la couche limite laminaire devient turbulente (Figure 1.7). La répartition des vitesses diffère, en effet, d'un point à un autre au fur et à mesure que son épaisseur augmente quand l'écoulement turbulent devient instable et varie avec la forme de la section mouillée (Comolet, 1963). Néanmoins, l'épaisseur de cette couche commence par être laminaire avec une vitesse moyenne égale, approximativement, à 99% de la valeur du jet principal. Par contre, en dehors du domaine restreint, le courant évolue au voisinage du lit et peut être considéré comme un écoulement idéal dit « Ecoulement à potentiel de vitesse ».

Ce comportement diffère selon la nature de la surface du fond lisse ou rugueux. Le développement de la théorie et la formulation de la couche limite ont vu le jour avec une conception suggérée en premier lieu par (Prandtl, 1952). Il donne pour la première fois une interprétation à un nombre de phénomènes que la théorie des fluides parfaits ne suffisait à expliquer.

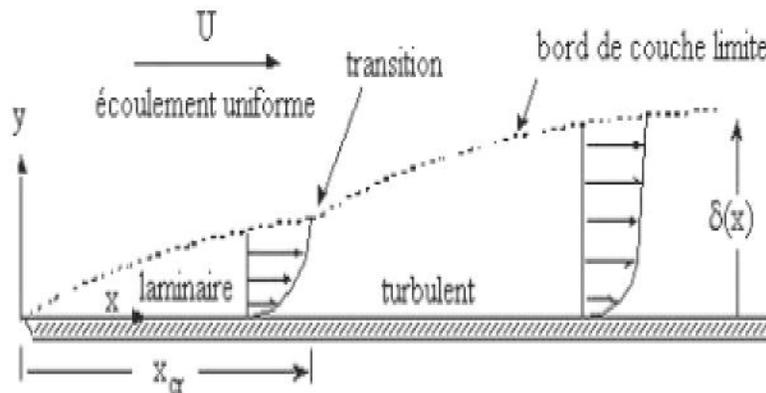


Figure 1.7 : Passage du régime laminaire au turbulent dans la couche limite

Ce concept de Prandtl constitue une liaison entre l'écoulement du fluide idéal et celui d'un réel gouverné par les équations différentielles de Saint-venant, où les premières formules empiriques se sont apparues d'usage courant. Dans un écoulement bidimensionnel, la couche limite est gouvernée par les équations partielles (équations de Navier-Stokes) faciles à résoudre pour un fluide incompressible en coordonnées cartésiennes.

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (1.28)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (1.29)$$

u et v : Composantes des vitesses, ρ : Masse volumique du liquide, P : Champ de la pression hydrostatique, ν : Viscosité cinématique du fluide.

La présence d'un écoulement à surface libre (le cas d'une rivière) mène à des applications expérimentales qui conduisent à distinguer les lois de l'évolution des vitesses dans différentes régions selon la distance à la paroi. En effet, avec des simulations numériques l'effet du fond rugueux dans la couche limite sur les structures d'écoulement a été analysé par (Akinlade, 2005). Après une vérification par l'expérimentale, il a conclu que la paroi rugueuse modifie les contraintes turbulentes. Cet effet peut s'étendre jusqu'à la région externe en raison de sa grande importance dans la résolution des problèmes de l'Ingénieur et l'hydrodynamique. Dans la théorie de la turbulence classique, la couche limite est considérée comme consistante en une couche interne et externe qui interagissent seulement dans un sens limité. Plusieurs chercheurs se sont illustrés dans ce type d'applications notamment Nikuradse, Von Karman, Blasius et Prandtl où l'analyse asymptotique classique identifiée peut être, schématiquement, vue et décrit cette région comme la somme de deux zones :

- **Zone interne**

La zone interne est caractérisée par la création d'une énergie cinétique supérieure à un taux de dissipation qui se traduit par un comportement dépendant de la rugosité du fond et de la loi logarithmique qui peut disparaître dans les écoulements décélérés (Graf et al, 1991). Cette zone dans laquelle les effets visqueux sont importants et confinés avec une épaisseur d'environ 10 à 20% de l'épaisseur totale (Cebeci, 2004). Essentiellement, l'épaisseur de cette zone dépend, des propriétés du liquide, du type de la paroi ainsi que de la distance verticale donnée par la relation.

$$z/h = z/\delta \leq 0.2 \quad (1.30)$$

Les applications expérimentales menées dans ce sens, exigent l'arrangement des vitesses et la turbulence immédiate à proximité des surfaces rugueuses où ces dernières sont commandées par l'effet d'un éventuel gradient de pression qui peut être ignorée dans la région du fond. Cet effet résulte des perturbations du changement de la structure de la couche limite, provoquée par les surfaces rugueuses du fond (Sinniger, 1988). Par ailleurs, l'influence des forces de frottement (très importante) dans cette zone, provoque un retard dans le régime d'écoulement ce qui conduit, de manière indépendante de la viscosité, à la réduction de la vitesse locale. Cependant, cette vitesse dépend de la paroi, de la contrainte de cisaillement et l'épaisseur de la couche limite sans gradient de pression. En effet, l'écoulement génère des tensions dues à la turbulence mais les tensions dues à la viscosité sont, sensiblement, diminuées et deviennent de plus en plus négligeable.

L'influence des tensions tangentielles (τ) est limitée à l'épaisseur de la couche limite $u(x)$ proche de la paroi qui représente la position pour laquelle la vitesse atteint son maximale. Selon les théories classiques, les profils de vitesses moyennes dans les canaux sont mieux décrits par la loi logarithmique, donnés expérimentalement dans la zone interne ci-dessous par la (relation 1.29) qui sera discutée en détail dans le (Chapitre III, paragraphe 5). La faible interaction du nombre de Reynolds (Re) suffisamment élevé sert à appuyer l'hypothèse de (Towsend, 1976) qui stipule que les motions en dehors de la couche rugueuse sont indépendantes de la rugosité du fond. L'ajustement de la loi logarithmique située dans la zone interne a permis de déterminer la rugosité équivalente moyenne où des travaux de recherche ont été menés dans ce sens par un grand nombre de chercheur.

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln[z] + C \quad (1.31)$$

u : Vitesse moyenne longitudinale au point considéré de la profondeur, Z : Distance verticale à partir du sommet d'aspérités jusqu'au point considéré, u_* : Vitesse de frottement du lit, C : Constante d'intégration qui dépend du fond du canal, elle est obtenue par de nombreuses expériences en écoulement turbulent là où la surface du fond peut dépendre du gradient de pression (Graf et al, 1991).

- **Zone externe**

En dehors de la zone interne, se situe une autre région plus grande qui correspond, pratiquement, à 80% de la profondeur d'écoulement appelé « zone externe » où elle est délimitée par la grandeur ($0.2 < (z/h) < 1$). Par ailleurs, les tensions tangentielles n'interviennent pas dans la détermination des profils des vitesses et l'effet de la vitesse de cisaillement est pratiquement nul (Guyon et al, 2001). Dans cette zone, la distribution de vitesses ne peut avoir de formulation universelle et dépend de différents paramètres où la turbulence devient indépendante de la rugosité de la paroi. Dans cette région, l'écoulement domine et n'exerce aucune influence, contrairement à la zone interne. Pour éclaircir cette interaction entre la zone interne et externe, des simulations numériques ont été menées par (Lee & Sung, 2007) afin de comparer les résultats expérimentaux avec les données de l'antérieur. Malgré tous les efforts consentis, la dynamique des couches limites dans le fond rugueux restent beaucoup moins bien connues et font l'objet d'autres applications. Tandis que, les études menées sur fond lisse ont été clarifiées pendant cette dernière décennie puisque la contribution du frottement visqueux devient négligeable devant celle de la turbulence.

En conclusion, provoquer la turbulence peut retarder le décollement de la couche limite où son domaine sur un fond rugueux reste suffisamment incomplet et méconnu.

I.7. EQUATIONS GENERALES DU MOUVEMENT

Malgré la conception des machines et appareils, les structures hydrauliques ont rendu possible les propriétés des écoulements et les applications expérimentales qui peuvent être obtenues par la vérification de la distribution des vitesses. Néanmoins, la vitesse verticale demeure négligeable devant la composante longitudinale. Ce concept repose sur la formulation des équations de Saint-Venant qui traduisent les principes de base de la physique, généralement, appliquée dans un fluide incompressible. La plupart des équations développées, dérivent les relations fondamentales de la mécanique des milieux continus (*MMC*) telles que : l'équation de la continuité et celle du principe de la conservation de la quantité de mouvement ou bien la relation fondamentale de la dynamique. En effet, ces équations fondamentales de la mécanique des fluides expriment la conservation des quantités de mouvement où la plupart sont dits newtoniens (leur comportement suit la loi de Newton). Ces équations décrivent la turbulence

d'un liquide incompressible étudié par les équations de Saint Venant et Navier-Stokes où leur établissement nécessite les données de la topographie du fond. Néanmoins, sa modélisation possède une certaine spécificité qui peut être différente de celle étudiée dans le cas des écoulements des canaux prismatiques.

Par des approches numériques, ces formules ont fait l'objet des travaux de recherche aussi bien en applications expérimentales qu'en modélisations numériques permettant d'examiner le phénomène de la turbulence. Dans le cas de l'écoulement peu profond, la normalisation des équations de Saint-Venant fait apparaître le nombre adimensionnel de Froude lié à la présence des ondes superficielles. Ces écoulements montrent les lois fondamentales qui ne sont pas parfaitement connues d'où la solution ne peut être trouvée que par le recours à l'expérimentation. Nous avons jugés utiles de rappeler ces équations classiques du mouvement des fluides sans les démontrer car leur présence est indispensable dans les applications hydrodynamiques. Nous nous bornerons uniquement sur les écoulements bidimensionnels sans nous étendrons aux moindres détails, bien qu'il est extrêmement difficile de décrire un écoulement turbulent pour prévoir des méthodes purement théoriques.

Dans le présent chapitre, les bases analytiques des équations générales d'écoulement en régime permanent et uniforme sont étudiées si les lignes de courant ne sont pas déformées et constituent contre les parois du réservoir les trajectoires des particules liquides. Les importantes notions concernant le comportement de l'écoulement est régi des lois fondamentales exprimées à l'intérieur du liquide par les équations générales du mouvement à savoir :

- Le principe de la conservation de la masse à partir duquel l'équation de continuité est établi
- Le principe de la quantité de mouvement à partir duquel les équations donnant les forces exercées par le liquide sont démontrées.

I.7.1. Principe de continuité

Les bases de la mécanique des fluides, l'utilisation des lois fondamentales des mouvements des liquides ainsi que l'hypothèse de la continuité représentent, successivement, les concepts les plus utilisés dans les écoulements.

Le principe de continuité appelée la première équation de Barré Saint Venant, est donnée comme l'une des équations fondamentales de la mécanique des fluides qui exprime le principe de la conservation de la masse. Ce principe montre, au cours de l'écoulement, que le fluide reste continue et ne peut y avoir ni apport extérieur ni prélèvement de la matière, cela signifie qu'aucun fluide ne peut être ni créé ni disparu dans le volume donné. C'est ce que stipule que le taux de variation de la masse du système matériel est égal à l'apport de la masse au système considéré donnée sous sa forme la plus générale.

$$\frac{\partial \dots}{\partial t} + \frac{\partial(\dots u)}{\partial x} + \frac{\partial(\dots v)}{\partial y} + \frac{\partial(\dots w)}{\partial z} = 0 \quad (1.32)$$

$$\frac{\partial \dots}{\partial t} + \text{div} \dots u = 0 \quad (1.32)$$

Dans un écoulement permanent, l'équation de continuité est donnée implicitement par la relation

$$\frac{\partial \dots}{\partial t} = 0 \quad (1.34)$$

D'après certaines considérations, les deux équations hydrodynamiques se réduisent à :

$$\dots \frac{\partial(u)}{\partial t} + \dots \text{div}(u.u) = -\text{grad}(P) + \dots g + \sim \Delta u \quad (1.35)$$

$$\text{div} V = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (1.36)$$

$$\text{div} V = 0 \quad (1.37)$$

Le caractère quasi-bidimensionnel lié aux écoulements peu profonds a conduit aux équations simplifiées pour ce type d'écoulement.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1.38)$$

où u, v, w est le champ de vitesses selon les directions (x, y, z) on aboutit à la continuité dans un volume de fluide incompressible peut s'écrire:

En comparant les ordres de grandeur des différents termes, si la hauteur d'eau h est très petite devant l'échelle de la grandeur horizontale L ($h/L \ll 1$), la vitesse verticale peut être négligée par rapport aux vitesses longitudinales. Pour l'écoulement bidimensionnel, l'équation de continuité dans un volume de fluide incompressible se réduit à $V(u, v, 0)$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial z} = 0 \quad (1.39)$$

Dans les écoulements unidirectionnels, la profondeur d'eau (h) est plus petite que les grandeurs horizontales (L & B) où la composante de la vitesse verticale (V) et sa dérivée par rapport à (z) sont négligeables. En effet, ces équations présentent une version simplifiée de la réalité puisqu'elles n'autorisent ni dissipation verticale ni mouvement vertical (hors déformation de la surface libre) en eau peu profonde (shallow water equation). Ainsi les équations traditionnelles de Navier-Stokes peuvent être simplifiées en ne faisant apparaître la vitesse verticale qu'à travers une déformation de la surface libre et en supposant la répartition des pressions comme étant hydrostatique. Ces équations simplifiées s'appellent les équations en eau peu profonde. Par ailleurs, l'écoulement se produit essentiellement dans le sens longitudinal (x) et l'équation devient :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (1.40)$$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial x} = 0 \rightarrow C = uh \quad (1.41)$$

u, v : Composantes de la vitesse de l'écoulement bidimensionnel dans les deux directions (x, z)

u : Vitesse longitudinale dans le sens d'écoulement, C : Constante d'intégration, ϵ : Viscosité cinématique de l'eau.

I.7.2. Principe de quantité de mouvement

Les écoulements incompressibles montrent que le comportement turbulent est à la base de toute étude hydrodynamique donnée par les équations de Navier Stokes. Ces équations ont servi à l'établissement de la similitude des écoulements et aux conditions hydrauliques qui énoncent que le taux de la variation de la quantité de mouvement d'un système matériel est égal à l'apport de la quantité de mouvement par application des forces extérieures du système. La détermination des forces extérieures s'exerçant sur un volume du fluide fermé sont les forces de pression dues aux contraintes tangentielles et turbulentes. Elles s'appliquent pour faire intervenir les caractéristiques du fluide sur les conditions aux frontières du système envisagé (entrée, sortie, fond et parois etc.) où le poids est la seule force volumique considérée.

Nous pouvons limiter l'attention uniquement au fluide incompressible (... = Cte) cela ne signifie pas que la densité du fluide est, automatiquement, constante mais plutôt qu'elle est indépendante de la pression hydrostatique (P). En effet, elle peut encore changer pour d'autres raisons telles que les variations de la température (Vreugdenhil, 1994).

L'équation de la quantité de mouvement s'exprime comme suit :

$$\dots \frac{d\vec{v}}{dt} + \overline{\text{grad}}(p + \dots gz) = 0 \quad (1.42)$$

P : Pression hydrostatique régnant au sein du liquide, ... : Masse volumique du liquide.

La composante peut s'écrire selon la direction horizontale

$$\dots \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (p + \dots gz) = 0 \quad (1.43)$$

En conclusion, les écoulements en eau peu profonde, classiquement associés (comme les écoulements stratifiés) à dynamique quasi bidimensionnelle se sont finalement révélés plus complexes.

I.8. INSTABILITE HYDRODYNAMIQUE

I.8.1. Effet de la surface libre

Ce chapitre expose la méthodologie qui peut permettre de choisir au mieux certains paramètres afin d'obtenir la solution qui vérifie les processus en accord avec les phénomènes physique. Cette vérification consiste à comparer les paramètres utilisés via les résultats obtenus avec les modèles de la réalité et théoriques. Les écoulements à surface libre en eau peu profonde, sont sujets à des instabilités provoquées par des perturbations continues qui sont, rencontrées dans la nature. Ces écoulements omniprésents dans les fleuves, les estuaires, les zones côtières et les retenues, se traduisent par une formation cohérente à grande envergure où la répartition de leurs vitesses est fortement influencée par les conditions de bords. Les paramètres hydrodynamiques dans lesquels l'importance pratique des écoulements bidimensionnels n'est pas turbulente, cela signifie qu'ils deviennent instables même si ces écoulements chargés en sédiments sont réguliers, fortement irréguliers ou rotationnels dans l'espace et le temps.

Pour montrer les fluctuations des écoulements, nous évoquons certaines études menées par certains chercheurs dans le but d'analyser l'évolution des instabilités. Cependant, Orr et Sommerfeld ont déjà établi les bases mathématiques de la théorie de la stabilité linéaire d'un fluide incompressible, en donnant aux perturbations une forme d'onde sinusoïdale qui aboutit à l'équation de la stabilité portant leurs noms. Par la résolution de cette équation (Chen & Jirka, 1998) ont réalisés, des travaux théoriques afin de pouvoir déterminer l'effet de la stabilité linéaire d'un écoulement latéralement cisailé. En décrivant l'évolution spatiale et temporelle des perturbations, ils ont montré que l'analyse du domaine de la stabilité de l'écoulement présente les effets de la viscosité de l'eau et du frottement du fond.

En expérimental comme en numérique, le phénomène de l'instabilité des écoulements dans les réservoirs peut être décrit par l'évolution spatiale et temporelle des perturbations extérieures. Par contre dans les contractions brusques des canaux symétriques, l'analyse de la stabilité linéaire d'un écoulement à ciel ouvert a été examinée par (Mizushima & Shiotani, 1996–2001) pour un nombre de Reynolds modéré s'abaissant à 10^3 . Pour résoudre ces perturbations des écoulements turbulents dans un élargissement progressif (Shipara et al, 1990) a employé l'algorithme des éléments finis. Cependant, l'évolution des écoulements asymétriques pour un nombre de

Reynolds de ($50 < R_e < 300$) montre l'existence de la solution de la stabilité symétrique. Néanmoins, l'écoulement instable au-dessus des éléments rugueux peut être troublé violemment par les petites fluctuations provenant des écoulements à large échelle (Townsend, 1976). Un autre examen a été mené par (Chu et al, 1983) pour vérifier la stabilité linéaire des profils de vitesses transversales dans les canaux à ciel ouvert. Dans les écoulements de sillage à faible profondeur, une analyse a été examinée par (Chen & Jirka, 1997) & (Kolyskin & Ghidaoui, 2003) afin de montrer l'évolution de l'instabilité non linéaire qui régit de l'équation de Ginzburg-Landau. Alors que par convection, le sillage absolu d'une zone constituée entre deux régions instables a été examiné par (Ghidaoui et al, 2006). Dans le cas d'un écoulement pleinement turbulent (Jiménez, 2004) aborde la question des caractéristiques principales de la rugosité à travers sa revue.

L'instabilité de la surface libre se manifeste par un déferlement provoquant un entrainement d'air dans l'eau où une onde de gravité à faible profondeur se propage de l'amont vers l'aval. Ces courants fortement sensibles aux perturbations conduisent à l'instabilité de la surface libre (Figure 1.8). De ce fait, l'apparition de ces instabilités à large échelle ont été montrées par la formation de tourbillons dans le plan de la géométrie du réservoir (Kantoush et al, 2007).

En conclusion, le jet d'eau, le sillage ainsi que la couche limite sont une ligne d'enquête fructueuse qui présente des exemples de telles configurations.



Figure 1.8 : Instabilité de la surface libre en écoulement permanent

I.8.2. Effet de la viscosité cinématique

Parmi toutes les propriétés d'un fluide Newtonien, la viscosité a requiert la plus grande attention dans la plus part des études expérimentales. Dans cette idée, de nombreuses applications

ont montrées que la résistance aux sollicitations de cisaillement se manifeste à l'intérieur du liquide pour devenir indépendante de la pression. Ces tensions occasionnées par la viscosité du liquide restent à l'origine de la transformation de l'énergie mécanique en énergie thermique.

Dans l'étude des écoulements les plus simples, nous allons commencer par introduire le concept de la turbulence pour passer l'amplification de la couche limite développé par Prandtl. En effet, dans différentes applications, la viscosité provoque la dissipation d'énergie cinétique de la masse fluide qui se transforme en chaleur. En outre, suivant la direction du mouvement, le frottement par cisaillement est présenté par la force de viscosité résultant des interactions entre le fond du canal et les différentes particules en écoulement. Par ailleurs, ce mouvement contenant l'énergie devient indépendant de la viscosité pour un Reynolds suffisamment élevé (Akinlade, 2005). L'effet du frottement interne n'est appréciable qu'à proximité des parois solides limitant le domaine occupé par le liquide où la viscosité cinématique n'exerce aucun effet sur la précision de mesure. Celle-ci n'est rien d'autre que les forces visqueuses qui diminuent avec l'augmentation de la température et la décroissance de la cohésion des forces de cisaillement donnée dans le [Tableau 1.2].

Tableau 1.2 : Viscosité cinématique de l'eau en fonction de la température

Liquide	Température T [°C]	Viscosité cinématique $\nu \cdot 10^{-6}$ [m ² /s]
Eau	16°	1.115
	18°	1.061
	20°	1,005
	25°	0,894

La viscosité cinématique, selon la formule de Poiseuille, est donnée par la relation:

$$\nu = \frac{1.78 \cdot 10^{-6}}{1 + 0.0337T + 0.00022T^2}$$

Il est à noter que la température de l'eau dans la halle d'Hydraulique varie entre 18°C - 20°C où la viscosité cinématique valait approximativement $\nu \approx 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ avec le poids et les forces de frottements dominant en même temps.

I.8.3. Effet des conditions aux limites

Les conditions aux limites ont une influence importante sur la convergence des résultats quand les parois latérales sont considérées comme associées à la paroi solide. Nous présentons la méthode qui consiste à considérer la vitesse moyenne d'écoulement (u) avec les conditions d'entrée de sortie du canal. Selon l'axe (x) les essais expérimentaux considèrent que cette vitesse a une composante horizontale positive.

- **A l'entrée**, les paramètres hydrauliques nécessaires à la définition des conditions aux limites, notamment, la profondeur d'eau et la vitesse moyenne d'écoulement associée qui est déterminée à partir du calcul des mesures expérimentales.
- **A la sortie**, le paramètre le plus important à l'aval dépend de la profondeur d'eau qui est toujours égale à la profondeur en amont. Il a été vérifié par limnimétrie où nous avons considérés la conservation de l'énergie à l'entrée et la sortie du canal.

CONCLUSION

La revue de littérature a pour objectif principal le détail de l'analyse bibliographique et théorique des caractéristiques des écoulements turbulents dans des réservoirs peu profonds. Les études menées sur un fond rugueux montrent bien le rôle que peuvent jouer les interactions de la surface libre et du lit sur la génération des écoulements de recirculation.

En écoulement bidimensionnel, ce constat a permis de réaliser d'autres expériences dans le bassin à ciel ouvert avec un fond de rugosité synthétique et homogène. En effet, en fonction des paramètres d'écoulement, chaque configuration est particulière car il n'existe aucune loi universelle permettant d'anticiper la transition à partir de laquelle le liquide agira sur la morphologie du lit.

Chapitre II

METHODES DE MESURE AU LCH

L'analyse de la turbulence des écoulements peu profonds s'est développée durant ces dernières décennies, grâce aux progrès des moyens de mesure notamment les instruments acoustiques. Cette instrumentation permet d'effectuer, aisément, de nombreuses expériences à surface libre, en faisant varier les différents paramètres géométriques ou hydrauliques, de les répéter en cas de nécessité.

Le principe de fonctionnement de ces appareils a révolutionné, aujourd'hui, la mesure de la dynamique fluviale et les eaux de surface qui était resté la même pendant ces derniers temps. Performantes, efficaces, et faciles à manipuler, la précision qu'autorisent ces appareils de mesure couvre une large zone pour effectuer des relevés plus rapides. En effet, la base de données expérimentale préexistante des écoulements dans les réservoirs peu profonds a été largement enrichie par de nouvelles mesures via des instruments modernes, en offrant une résolution spatiale plus fine que les anciens appareils mécaniques. La solution des problèmes de la mécanique des fluides et l'hydrodynamique fluviale se présentant dans la pratique de l'Ingénieur requiert, en général, des considérations théoriques et des résultats expérimentaux.

Dans les études de laboratoire, les essais effectués sur modèle réduit s'expliquent par la facilité que peut offrir l'utilisation de ces modèles hydrauliques. Cependant, ils peuvent, en général, conduire à la création des conditions semblables à celle de la nature pour concilier la similitude de Froude (F_r). Ces conditions dans certains essais permettent d'expliquer l'effet du frottement contre le fond du réservoir pour analyser l'influence du champ d'écoulement sur la forme des lignes de courants. Néanmoins, avoir toutes les caractéristiques du prototype reproduites à l'échelle géométrique semblable vérifie les restrictions imposées à la conception. La comparaison du modèle et du prototype ont montré clairement que la correspondance du comportement va souvent au-delà des limites attendues.

Les études menées au *LCH* sur modèles réduits ont fait l'objet de nombreuses applications expérimentales qui s'appuient, essentiellement, sur les techniques modernes appliquées aux écoulements à surface libre en eau peu profonde.

II.1. VISION HISTORIQUE DES BARRAGES

Les barrages constituent l'une des réalisations la plus imposante et la plus complexe du domaine du Génie-Civil. Ils comptent parmi les plus anciennes constructions humaines, disposées en travers d'un cours d'eau afin de créer une retenue de stockage (Figure 2.1). L'apparition des réservoirs artificiels remonte à une époque très ancienne. Aux environs de l'année 2900 avant J. C, le pharaon Menes, fondateur de la première dynastie Egyptienne aurait barré le Nil pour construire à Koseish un barrage en maçonnerie avec les dimensions d'environ 15m de hauteur et 45m de longueur. Vers 2000 ans avant J. C, de nombreux ouvrages furent construits par la société Babylonienne mais plus récemment, vers 750 avant J. C, fût édifié le barrage de Sed Al Arim sur Oued Dhana à Saba au Yémen d'une hauteur de 4m et de longueur 600m. Cependant, il fut surélevé plusieurs fois, sans doute, à cause du phénomène de l'alluvionnement qui a diminué sa capacité en eau disponible destinée à l'irrigation. Les grecs accomplirent peu de choses en matière de barrages et en travaux hydrauliques dont leurs inventions et découvertes antérieures furent perfectionnées par les ingénieurs qui jouèrent un rôle important dans l'équipement des forces expéditionnaires grecques. Tandis que, les romains acquièrent de leurs voisins une grande partie des connaissances où de nombreux spécialistes Grecques furent employer pour diriger leurs constructions. Malgré leur préoccupation primitive d'alimenter les villes en eau sur une large échelle, les romains semblent avoir entrepris tardivement la construction des barrages surtout dans les provinces comme la Turquie, la Tunisie et l'Espagne où ils étaient installés. Au moyen âge, après la chute de Rome, le centre d'activité de la construction des barrages s'éloigna vers l'extrême orient, en particulier, la Chine et le Japon qui furent très actifs depuis le début de leur histoire. A Ceylan, en Inde et au Vietnam, ainsi que dans les pays de culture Arabe, de nombreux ouvrages furent construits.

Au 15^{ème} siècle, l'Europe de l'ouest devient le centre le plus actif dans le domaine de la construction des barrages qui favorisent la création des canaux et la régularisation des cours d'eau. Ces derniers conduisent à la construction de petites retenues et des réservoirs peu profonds judicieusement disposés. En outre, la renaissance des barrages a entraîné un développement économique de l'Europe où la révolution industrielle a exigée des moyens de transport peu couteux. Depuis ce temps, la production de l'énergie hydroélectrique a donné lieu à une multiplication quasi explosive au nombre d'ouvrages hydroélectriques.

Disposant de nouvelles technologies dans le domaine de l'ingénierie des barrages le Comité International des Grands Barrages (*C.I.G.B*) a été fondé en 1928 pour servir de forum d'échange des connaissances et d'expériences en matière de barrages. Cette institution d'une longue expérience réunit tous les experts en barrages pour discuter les progrès tant dans la conception, la construction et l'exploitation qu'au niveau de réhabilitation des anciens ouvrages et leurs aspects environnementaux. D'après, les statistiques données par les pays membres du (*C.I.G.B*), le nombre d'ouvrages de plus de 15m de hauteur construit à diverses époques de par le monde est d'environ 45000 barrages. Avant l'année 1800, le nombre était de 450 barrages mais en 1899 les chiffres donnaient 644 barrages. Tandis qu'en 1949, le total grimpe à 3583 barrages et devient 11169 barrages en 1977. Cependant, en Amérique du nord le nombre de barrage est de 30.61%, l'Asie 33.38%, l'Europe 24.38%, l'Afrique 5%, l'Amérique du sud 3.97% et l'Australie 2.66% (Choufi, 1997). Néanmoins, la capacité de stockage en eau utilisable de ces réservoirs artificiels est d'environ 3600km^3 , cela nous mène à dévoiler la répartition des barrages par zones géographiques qui reste toujours inégale entre les différents continents où témoigne le niveau de développement.



Figure 2. 1 : Barrage-réservoir à faible profondeur

II.2. ALLUVIONNEMENT DES BARRAGES-RESERVOIRS

Le phénomène de la sédimentation présente une menace sévère pour les barrages-réservoirs peu profonds où ils sont le siège d'une forte dynamique tourbillonnaire, avec des conséquences économiques plus lourdes et requérantes d'une solution durable. En effet, ce phénomène a été, toujours, classé parmi les thèmes les plus complexes avec une durée de vie

ne dépassait pas la trentaine d'années. D'ailleurs, l'apport de cette charge a été souvent étudié par plusieurs chercheurs où des solutions ont été proposées mais qui ne sont pas, tout le temps, faciles à mettre en place. Par ailleurs, les sédiments transportés (argile, limon fin, sable fin et vase) commencent à s'accumuler et se tassent au fond du réservoir afin de réduire la capacité utile de stockage. Sachant que la plus grande partie de ces ouvrages envasés dévoilent le lieu naturel de décantation des eaux troubles provenant du bassin versant amont (Choufi, 1997). Les effets négatifs de cet évènement naturel posent de graves problèmes pour le maintien du potentiel hydraulique qui entraîne, à long terme, la réduction progressive de la capacité de stockage de l'eau.

La caractérisation de l'influence de la turbulence sur le mouvement du transport solide a commencé à prendre de l'ampleur pendant ces dernières décennies, où l'ensemble des résultats de base est les définitions de sa théorie nécessitent de brefs rappels. Ces importants rappels, bien connus, montrent les différentes orientations des travaux de recherche qui présentent un intérêt particulier de ce processus. Dans ce contexte préoccupant que les risques inhérents interpellent, en priorité, les chercheurs et spécialistes pour une meilleure compréhension du processus sédimentaire. Pour mieux appréhender les mécanismes de la stabilité de la turbulence des écoulements et du transport sédimentaire, la communauté scientifique repose son analyse sur les applications expérimentales en modèle physique qui est de plus en plus élaboré. Alors que, la validation numérique est en perpétuelle croissance grâce à la puissance du calcul informatique qui a pu être intégré aux modèles.

Les applications expérimentales et simulations numériques portant sur l'alluvionnement et le dépôt des sédiments en suspensions ont été évoquées par de nombreux spécialistes pour donner certaines variables comme le champ des vitesses superficielles. Ces scientifiques ont tentés de résoudre ce problème crucial qui vise à réduire la capacité de la charge sédimentaire par la création des courants de turbidité et la chasse des sédiments en suspensions dans les ouvrages (De Cesare, 1998). Un autre travail de recherche a été mené par (Oehy, 2003) dans un modèle physique pour étudier les effets des obstacles du jet par le courant de turbidité sur le processus de la sédimentation. Dans ces modèles réduits, l'étude des écoulements turbulents en présence d'un débit solide pose de graves problèmes pour le maintien du potentiel hydraulique qui demeure d'une grande importance.

En conclusion, il est très possible de réduire ces risques en apportant un grand soin aux projets de recherche hydrotechniques afin d'adopter des mesures de prévention.

II.3. TRAVAUX DE RECHERCHE AU LCH

Les essais menés depuis quelques années au Laboratoire de Constructions Hydrauliques LCH ont souvent été citée comme référence au cours de ce document. Dans ce contexte que (Kantoush, 2008) a entrepris ses premiers travaux dans le cadre de son Doctorat afin de pouvoir minimiser le processus de l'envasement des retenues peu profondes. Il a étudié l'effet de la géométrie du réservoir sur le champ d'un écoulement bi-phasique et l'épaisseur du dépôt des sédiments en suspensions au fond du bassin. Ainsi, il a établi une première base de données, en réalisant des mesures à l'eau claire et en présence des sédiments fins dans des réservoirs rectangulaires à faible profondeur et géométrie variable. L'utilisation de la procédure d'alimentation est discontinue (l'interruption de l'essai après un temps de marche de (90 min) et une autre procédure continue (l'interruption se produit après un temps de (270 et 540 min) de marche. Cependant, il a montré que des écoulements symétriques et asymétriques peuvent se développer sous certaines conditions géométriques et hydrauliques, en dépit des conditions géométriques expérimentales parfaitement symétriques. Suivant les modèles d'écoulement décrits après la durée de 090 min, 180 min et 270 min, il a montré qu'un écoulement asymétrique instable a été observé pour un rapport de forme ($f \leq 0.96$). En effet, la configuration de l'écoulement peut basculer, à la longue, vers une symétrie plus stable lorsque ($f > 0.96$) où $f = L^2/s$ avec s : est la superficie totale du bassin et L sa longueur.

L'étude est devenue, par la suite, une référence pour de nombreux travaux de recherche principalement (Dewals et al, 2008) qui a validé le mode d'écoulement asymétrique développé dans une géométrie symétrique. Il a décrit, par une analyse générale, la croissance des perturbations transversales résultant des conditions initiales et aux limites pour différentes géométries. Alors que, l'instabilité linéaire du champ d'écoulement bidimensionnel a été validée par la modélisation numérique afin de comparer les résultats expérimentaux qui montre un parfait accord entre les configurations d'écoulement obtenu.

Une autre contribution expérimentale a été menée par (Dufresne et al, 2010) dans une installation similaire, montée à l'Université de Liège (Belgique). Il a introduit un critère beaucoup plus général, impliquant à la fois la longueur et la largeur du réservoir ainsi que l'élargissement d'entrée du canal. Par analyse adimensionnelle, cet effet a permis de montrer la classification des écoulements bidimensionnels dans les réservoirs rectangulaires afin de

prédire la transition asymétrique et symétrique. Il a injecté un colorant visuel pour indiquer le sens d'écoulement, le nombre de zones de recirculation et l'emplacement approximatif des points de rattachement. Toutefois, la visualisation du colorant a mis en évidence les différents modèles de configurations asymétrique et symétrique. Contrairement à (Kantoush, 2008) qui a utilisé des particules blanches flottantes. En effet, la validité de ce critère a été posée par les travaux expérimentaux menés par (Camnasio et al, 2011) afin d'analyser l'influence de la position asymétrique des canaux d'entrée et de sortie du réservoir sur le champ des vitesses et le volume emprisonné des sédiments en suspensions. Dès lors, elle a élargie sa recherche dans le même modèle expérimental pour réaliser des essais complémentaires afin de pouvoir comparer les résultats obtenus. Le long de la largeur du réservoir rectangulaire (B) elle a pu déplacée l'entrée et la sortie du canal en donnant lieu à différentes positions du bassin où un champ d'écoulement s'est développé. L'apport des sédiments a permis de mettre en évidence la formation des lignes de courant (zone de recirculation) au milieu du bassin principalement dans la partie latérale pour des configurations géométriques initialement prises asymétriques afin de trouver l'efficacité du piégeage et les régions préférentielles du dépôt. Une telle approche est appropriée car l'intérêt est porté sur l'apparition d'une éventuelle instabilité symétrique en raison de la zone de sillage à l'entrée du réservoir. La concordance entre les résultats expérimentaux et la simulation numérique présentée ne montre aucune différence significative entre ces études. Nous pouvons conclure que les structures tourbillonnaires peuvent être, en particulier, à la base du développement de la topographie du fond du réservoir comme il a été présenté par (Kantoush, 2008) & (Camnasio et al, 2011).

II.4. TECHNIQUES DE MESURE

L'évolution des techniques optiques et ultrasons impose sans cesse, en physique, de nouvelles frontières notamment dans l'Ingénierie et les mesures hydrodynamiques. Autrefois les vitesses d'écoulement ont été mesurées par les méthodes classiques, essentiellement, les moulinets hydrographiques ou bien les tubes de Pitot. En effet, il est devenu possible, aujourd'hui, de mesurer les vitesses d'écoulement avec des techniques plus modernes, qui sont en perpétuel perfectionnement (comme les sondes à effet Doppler, *LDA* ou *LSPIV* par imagerie). Néanmoins, il s'est avéré que ces méthodes étaient de plus en plus adoptées par la communauté scientifique dans de divers domaines de l'hydrodynamique et l'Ingénierie de l'eau. De ce fait, leur utilisation a fait étendre le principe de beaucoup de méthodes décrites par de nombreux auteurs afin de pouvoir ouvrir de nouvelles perspectives de mesure. Par

ailleurs, ces appareils ont beaucoup pris du chemin pour être régulièrement employé dans la turbulence et l'analyse de mesure du liquide très petit avec une précision très grande.

Dans ce travail, nous nous contenterons de décrire les deux techniques de mesure employées au laboratoire de Construction Hydraulique (*LCH*). La première méthode *UVP* (Ultrasonic Velocity Profiler) utilisée pour mesurer les vitesses instantanées d'écoulement. Tandis que, la deuxième méthode est pour mesurer les vitesses de surface par analyse d'images nommée *LSPIV* (Large-Scale Particle Image Velocimetry) ou bien (la vélocimétrie par images de particules à large échelle). Cependant, les images enregistrées par la caméra dans une lumière pulsée sont traitées et corrigées par le logiciel Flow Manager développé par (Dantec Dynamics. S/A., 2007). En effet, ces deux méthodes font partie de la nouvelle génération d'instrumentation qui fournit les données nécessaires de la vitesse d'écoulement et superficielle ainsi que leurs interactions dans les conditions normales et extrêmes.

Les différentes caractéristiques utilisées dans la détermination du champ des vitesses sont données ci-dessous :

❖ **Les caractéristiques du liquide**

La masse volumique de l'eau $\rho = 1000 \text{ kg} / \text{m}^3$

La viscosité cinématique de l'eau $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$

❖ **Les caractéristiques d'écoulement**

La profondeur d'eau dans le réservoir $h = 0.200 \text{ m}$

Le débit moyen d'alimentation $Q = 0.007 \text{ m}^3 / \text{s}$

La pente du fond du canal $I = \%$

La gravité $g = 10 \text{ m} / \text{s}^2$

❖ **Les caractéristiques des sédiments**

La densité du réflecteur ultrason $\rho_s = 1500 \text{ kg} / \text{m}^3$

Le diamètre des sédiments $d_{50} = 50 \mu\text{m} = 0.05 \text{ mm}$

❖ **Les caractéristiques du traceur**

La masse volumique des particules flottantes $\rho' = 960 \text{ kg} / \text{m}^3$

Le diamètre du traceur $D' = 3.4 \text{ pixels}$

❖ Les caractéristiques du bassin

La largeur $B = 4m$

La longueur $L = 6m$

II.4.1. Ultrasonic Velocity Profiler (UVP)

Depuis la découverte des appareils ultrasons, de nombreux instruments étaient modifiés, voire améliorés à savoir : Anémomètres à fil chaud, Vélocimétrie par Laser Doppler (*LDV*), Moulinet hydrométrique, Tube de Pitot, Linnimétrie, Acoustique Doppler utilisés dans les domaines de la recherche surtout dans l'Ingénierie. Ces instruments peuvent évaluer des paramètres bidimensionnels répartis dans l'espace et associés à l'hydrodynamique des cours d'eau. Parmi les systèmes ultrasons fréquemment utilisés dans la conception expérimentale des ouvrages hydrauliques, la méthode acoustique *UVP* (Ultrasonic Velocity Profiler) pour mesurer la vitesse d'écoulement. Cette méthode non-intrusive a fait son apparition depuis une vingtaine d'années dans différent domaine de la dynamique des fluides. Elle consiste à émettre un ensemble d'ondes dans le liquide puis réceptionner les échos du milieu considéré afin d'extraire l'information relativement à la vitesse pour mesurer les profils de vitesses par les ondes ultrasons basées sur l'effet Doppler pulsé. Le fondement de l'Acoustique Doppler des vitesses repose sur l'analyse de l'onde émise dans l'eau par l'appareil et réfléchié par les particules rétro diffusantes portées par le courant. Son application devient possible lorsque l'écoulement contient des cibles acoustiques puisque ces derniers agissent en émetteur et récepteur à la fois. Elle devient le moyen le plus efficace dans un même plan pour accéder de façon instantanée aux différentes échelles spatiales de la turbulence comparée à d'autres procédés de mesure.

Le principe de mesure a été, intensivement, étudié par de nombreux chercheurs notamment (Taketa, 1995) afin de tester l'efficacité et la potentialité de la méthode ultrason à effet Doppler pulsé. La technique *UVP* présente beaucoup d'avantages par rapport aux autres méthodes conventionnelles de mesures. Celle-ci ne perturbe pas l'écoulement où il a pu mettre en évidence la possibilité de relever des vitesses à l'intérieur d'écoulement où des mesures précises dans les écoulements complexes ont été effectuées par (Taketa, 1999).

Les travaux de recherche ont été poursuivis avec le même principe déjà appliqué dans les liquides opaques non intrusifs (qui ne sont jamais en contact avec l'eau). Néanmoins, les phénomènes caractéristiques des écoulements turbulents naturels ou artificiels se produisent

en général dans les réservoirs et les canaux à ciel ouvert sous l'effet de la diversité des formes des berges, de la rugosité du fond et des fluctuations des vitesses à la surface de l'eau. Cependant, les caractéristiques d'une instrumentation de mesure acoustique basée sur l'effet Doppler est capable de mesurer les profils des vitesses instantanées sur la totalité du tirant d'eau. Par modification du mode d'utilisation (Rolland, 1995) a amélioré un système de mesure afin d'aboutir à un développement capable de mesurer deux composantes de vitesse moyenne instantanée, quel que soit le type d'écoulement. Par ailleurs, d'autres mesures de turbidité à l'intérieur du réservoir de Luzzone, ont été réalisées par (De Cesare, 1998) afin de confirmer les résultats de simulations numériques portant sur des essais de reproduction en laboratoire. La modélisation numérique a été validée par les résultats expérimentaux montrant l'importance des forces de frottement s'exerçant au fond rugueux du réservoir sur le champ d'écoulement. Cependant, une autre application expérimentale a été réalisée par (Debbache et al, 2005) afin d'étudier l'effet de la rugosité du fond d'un canal de forme de profil en U sur le ressaut hydraulique. Pendant la même année, des mesures relatives aux écoulements à surface libre dans un canal rectangulaire avec une seule composante au moyen d'un anémomètre laser a réalisé par (Labioud, 2005) où une première base de données a été établit. D'autres mesures portant sur des vitesses d'écoulement ont été menées sur plusieurs années par (De Cesare & Boillat, 2006). Par ailleurs, à l'*IMFT* (Institut de Mécaniques des Fluides de Toulouse) une autre contribution scientifique vient d'élargir cette recherche avec un Anémomètre Laser à deux composantes réalisée par (Zaouali, 2008) pour compléter les travaux déjà portés dans les canaux rectangulaires à surface libre et fond inhomogène.

Parallèlement, certains chercheurs ont tenté de simuler par modélisation numérique, la structure des écoulements turbulents développés en canal rectangulaire rectiligne. Ce même processus de sédimentation des réservoirs à faible profondeur et géométrie variable ont été abordé par (Kantoush et al, 2006). D'autres contributions expérimentales portant sur l'établissement des écoulements turbulents par analyse d'ultrason ont été données par (Mihoubi et al, 2007) dans le but de déterminer les profils des vitesses longitudinales et la vitesse de frottement. Néanmoins, dans un élargissement brusque l'étude de cet effet sur l'écoulement turbulent asymétrique d'un fluide a été analyse par (Vikram et al, 2010).

II.4.1.1. Avantages de la méthode UVP sont :

- La précision de la mesure de vitesses est élevée atteignant l'ordre de [mm/s] pour les fréquences d'onde couramment utilisée de 2 à 8 MHz.

- La mesure du champ de vitesses en $2D$ et $3D$ est possible par cette méthode grâce à sa rapidité et au nombre de points de mesure.
- Les ondes ultrasons peuvent pénétrer dans n'importe quel liquide même s'il est très opaque, cela est impossible avec les méthodes optiques basées sur l'anémomètre laser ou le traçage des particules.
- Avec la méthode UVP aucune restriction n'est faite sur la taille minimale des particules
- La mesure nécessite un seul paramètre d'étalonnage qui est la vitesse du son dans le liquide considéré dans notre cas (elle est prise $C_s = 1480m/s$) car elle ne varie que très peu pour l'eau au LCH à la température ambiante.
- Le transducteur peut être placé même en dehors du fluide pour autant que le passage des ultrasons soit garanti : par exemple à travers un autre fluide, une surface de métal ou de matière plastique. Ceci permet entre autre de mesurer des profils de vitesses dans les fluides très chaudes comme les étaux liquides à plusieurs centaines de degrés ou bien dans les milieux agressifs.

II.4.2. Particle Image Velocimetry (PIV)

II.4.2.1. Historique

L'appareillage traditionnel n'est pas adapté à mesurer la turbulence puisqu'il ne permet pas l'obtention du champ des vitesses instantanées où son aspect intrusif provoque, dans l'écoulement, des perturbations superficielles. Par ailleurs, la performance de ces appareils de visualisation par le procédé d'imagerie numérique et la télédétection s'est faite distinguée cette dernière décennie. Dans sa forme moderne, la technique de la vélocimétrie par imagerie de particules PIV (Particules Images Vélocimetry) est apparue au début des années 1980. Elle repose sur une technique optique, non intrusive qui signifie la mesure quantitative de la vitesse du fluide en un grand nombre de points. La Particle Image Velocimetry constitue un outil qui a grandement amélioré la capacité de mesure des vecteurs de vitesses instantanées dans les divers types d'écoulement. En effet, elle est basée sur la mesure du déplacement du traceur, le plus souvent, ajouté au fluide en écoulement. Elle offre au minimum la résolution spatiale bidimensionnelle dont le point faible de ce procédé demeure toujours dans la résolution temporelle qui est légèrement moindre.

Au laboratoire, la *PIV* surmonte, beaucoup, la limitation de prélèvement et fournit des possibilités de mesure des vitesses de surface puisqu'elle a fait l'objet d'un développement considérable. Toutefois, on peut, se demander si un couple de vortex généré dans une couche mince au-dessus d'un autre fluide de caractéristiques différentes (viscosité et densité) aurait une dynamique comparable (Albagnac, 2010). En effet, cette dernière existe dans la couche limite visqueuse induite par la condition d'adhérence sur le fond solide.

II.4.2.2. Large Scale Particle image Velocimetry (*LSPIV*)

La technique *LSPIV* dérive de la technique classique *PIV* pour la mesure des vitesses de surface dans les écoulements bidimensionnels stationnaires et non stationnaires avec les données d'algorithmes et des prétraitements similaires. Son extension a été appliquée dans des mesures au laboratoire où *in situ* de grande taille « type rivières » d'où le nom de Large Echelle a été imposé (Fujita et al, 1998). Cette technique a été exploitée dans les études de l'hydrodynamique fluviale avec une résolution spatio-temporelle extrêmement élevée dans la but de mesurer d'importantes vitesses soit au laboratoire ou en rivières.

Son principe de mesure consiste à suivre le mouvement d'un ensemble de particules blanches flottantes semé à la surface libre de façon uniforme et mono dispersée. Ces mesures sont présentées pour permettre de suivre les structures tourbillonnaires composant l'écoulement turbulent. Conjointement, d'autres contributions expérimentales et numériques ont été mentionnées dans la littérature notamment par (Muste et al, 2000) & (Holland et al, 2001). Son examen peut-être trouvé dans différents articles de plusieurs chercheurs notamment (Uijtewaal et al, 2001), (Weitbrecht et al, 2002), (Chu et al, 2002), (Chen et al, 2002), (Meselhe et al, 2004) & (Kantoush et al, 2005, 2009). Par sa fiabilité d'installation exceptionnelle et sa rapidité dans la mesure, cette technique a été utilisée à cause du nombre élevé des points de mesure. Dans ce contexte, des applications quantitatives visant à fournir un champ de vitesses extérieures ont été menées par de nombreux chercheurs afin de mesurer les écoulements uniformes d'eau et de glace en laboratoire ou *in situ*. Cependant, une revue bibliographique de beaucoup de travaux est déjà faite pour distinguer que les résultats des études menées sont encourageants.

La technique *LSPIV* a été mise en place pour la visualisation des vitesses de surface et la description des écoulements extérieurs en couvrant de vastes zones. Les réservoirs, les fleuves et les rivières se rangent dans cette catégorie (Meselhe et al, 2004). Exceptionnelle par

sa précision, cette technique présente un moyen efficace pour accéder, de façon instantanée, aux différentes échelles spatiales de l'écoulement comparée à d'autres procédés de mesure. Cependant, avec la technique *LSPIV*, l'analyse des écoulements en milieu fluvial des trois surfaces planes ($4-45m^2$) a été développée, principalement, par (Fujita et al, 1998) dont ses premières mesures ont été réalisées au Japon durant l'année 1994. Sous l'effet des vagues, l'écoulement horizontal dans une section transversale à faible profondeur a été quantifié dans la région d'Estran extrêmement dynamique par (Holland et al, 2001). En effet, l'influence du jet principal sur la zone morte et le champ des vitesses de surface dans l'écoulement bidimensionnel des fleuves a été étudié (Weitbrecht et al, 2002). Par ailleurs, le champ d'écoulement permanent et uniforme montre l'affaiblissement de la zone de recirculation produite par la taille des éléments de la grille plutôt que par son espacement, cette évolution du régime a été étudiée par (Uijtewaal et al, 2003). A travers des mesures expérimentales, l'efficacité du *LSPIV* sur la sensibilité de faibles vitesses de surface dans un écoulement bidimensionnel a été donnée par (Meselhe et al, 2004). Dans l'environnement du laboratoire (Rockwell, 2008) a analysée l'instabilité de la zone de recirculation de l'écoulement peu profond par la formation de l'image-Espace-temps.

Plusieurs chercheurs ont repris les études de (Kantoush, 2008) afin d'expliquer les mécanismes de la génération de la recirculation par des courants sans faire intervenir l'effet de la surface du fond. Dans cet esprit, dans un modèle de turbulence employé en combinaison avec une profondeur moyenne, qu'un code de volume fini a été développé par modélisation numérique. Une contribution numérique a été reprise au laboratoire *LCH* par (Dewals et al, 2008), afin d'étudier l'effet de la stabilité des écoulements peu profonds dans les réservoirs rectangulaire et géométrie variable sur le champ des vitesses de surface et pouvoir comparer avec les résultats expérimentaux.

En utilisant l'analyse adimensionnelle, dans le cadre de nombreuses études menées *in situ*, une autre application a été réalisée à l'université de Liège Belgique par (Dufresne et al, 2010) sur quarante modèles géométriques afin d'évaluer l'instabilité du régime d'écoulement et pour prédire la transition du champ d'écoulement. Il a donné la classification des écoulements bidimensionnels dans des réservoirs peu profonds, en se basant sur les résultats antérieurs où il a observé une génération aléatoire des tourbillons en temps et en espace. Il a dévoilé que l'intensité de la fréquence d'apparition des zones de recirculation augmentait avec le confinement en eau si les ondes présentent un jet unidirectionnel pour une période plus

grande. Il a expliqué que ces tourbillons sont générés dans la zone aval puis se propagent vers l'amont pouvant jouer un rôle significatif dans la stabilité des écoulements où il a observé que les tourbillons pouvaient jouer un rôle non négligeable dans le transport sédimentaire. Par ailleurs les différents rapports de longueur et largeur ainsi que le rapport d'élargissement utilisé permettent d'analyser les champs des vitesses dans les réservoirs peu profonds et géométrie variable.

Dans le même axe de recherche, une autre étude expérimentale a été réalisée dans la même installation expérimentale du laboratoire *LCH* pour élargir le thème de recherche. L'effet de la géométrie du bassin rectangulaire d'entrée et sortie asymétrique sur le champ d'écoulement en eau peu profonde a été évalué avec une série d'essais menée par (Camnasio et al, 2011). Elle a analysé l'effet de la position des canaux d'entrée et de sortie du réservoir sur le champ des vitesses extérieures dans un écoulement chargé de sédiments fins. Néanmoins, ces observations ont permis de mettre en évidence la formation du lit où les dépôts se sont formés dans la zone latérale de la recirculation, principalement, au milieu du bassin pour des configurations géométriques initialement prises asymétriques.

II.4.2.3. Avantages et inconvénients de la *PIV*

La *PIV* permet l'étude des ouvrages de grandes échelles sans que l'instrument soit en contact avec l'eau pendant les relevés qui a été adoptée avec succès dans les mesures hydrodynamiques des rivières par de nombreux chercheurs notamment (Adrian, 1991). Elle permet de visualiser les écoulements de surface au laboratoire et dans les cours d'eau afin de mesurer le champ des vitesses bidimensionnel et de calculer la distribution de la vorticité.

L'avantage de cette méthode de mesure donne de bonnes estimations des vitesses en moyenne mais leur variabilité est importante. Elle est complètement non-intrusive, excepté pour l'ajout du traceur s'il n'est pas présent à l'origine. Elle permet de calculer un champ de vitesses instantanées (*2D*) dans le plan éclairé par le laser. Par ailleurs, la rapidité du calcul, associée aux progrès constants dans le domaine de l'enregistrement d'images et du matériel informatique permet le traitement d'un grand nombre d'images, réduisant l'incertitude de mesure en faisant une moyenne sur un grand échantillon.

L'inconvénient, les vitesses ne sont mesurables que dans le plan éclairé par le laser où la surface est dépendante de la taille du traceur. Des améliorations techniques ont été apportées au niveau de l'enregistrement des images (caméras numériques, augmentation de la

résolution des capteurs, augmentation de la fréquence d'acquisition des images) et au niveau informatique (augmentation de la mémoire et un calcul plus rapide).

En conclusion, tous ces paramètres permettent l'étude des écoulements de façon plus rapide où les erreurs associées à cette technique, aussi bien durant la mesure que lors du traitement ont été en grand partie analysés par le logiciel Flow Manger lors du prétraitement.

II.5.3. Recommandations

Pour bien résoudre les problèmes rencontrés particulièrement dans les expériences, la sélection et les ajustements des paramètres sont expliquées de la manière suivante:

a). Selon la caractéristique de la caméra, la vitesse d'écoulement adéquat doit être choisie et enregistre les images de la recirculation à une vitesse appropriée avec une résolution d'image suffisante. La fréquence d'échantillonnage des images enregistrées *FPS* (image par seconde) a une influence significative sur l'exactitude des estimations de la vitesse *LSPIV*. En effet, les relations des vitesse d'écoulement ont été établi sur la base de plusieurs expériences avec les valeurs $FPS = 4.0, 6.0, 7.0, 8.0, 10.0, 12.0, 15.0, 24.0$.

Trois séries d'expériences ont été menées avec *FPS* fixes et un temps d'exposition différent. Huit *FPS* est une fréquence d'échantillonnage optimale et l'erreur élevée se produisant pour les plus petits *FPS*. Une grille d'espacement connue doit être placée à proximité de la surface de l'eau au début de chaque période d'expérimentation afin de relier les coordonnées d'image pour les coordonnées physiques. Comme nous le savons, il existe plusieurs types de caméra qui peut être utilisé dans les essais à savoir la Caméra *CMOS*, *SMX*, 155 avec interface *USB 2.0* ou l'appareil photo Sensicam, avec capteur *CCD* et monochrome de 12 à 8 bits ou bien d'un caméscope numérique de Sony (*DCRTRV 900*).

b). La partie la plus difficile est le choix du traceur approprié, car, les caractéristiques de ces particules flottantes ont pour but de s'adapter aux différentes exigences pour être donner selon les types d'applications. Par ailleurs, la précision de *LSPIV* dépend de la capacité du traceur (particules flottantes) à suivre les fluctuations de l'écoulement extérieur, que si une particule est placée à l'intérieur du flux ou lorsque l'écoulement possède une vitesse d'oscillation, un décalage de temps est vérifié jusqu'à ce que la vitesse des particules soit égale à la vitesse d'écoulement. Par conséquent, les propriétés mécaniques des particules fluides doivent être vérifiées afin d'éviter des écarts importants entre le fluide et le mouvement des particules.

L'évaluation de la capacité du traceur de suivre le flux rationalise sans glissement excessif est également effectuée par la détermination de la vitesse de la particule par gravité. Graine d'une région bien éclairée avec des particules qui retracent avec précision, le champ d'écoulement est de grand d'intérêt mais ne sont pas interférer de manière significative avec le flux. Le contraste entre les particules d'ensemencement et l'eau doit être régler par plusieurs méthodes notamment par la peinture des murs et le fond du modèle avec une couleur différente de celle de la particule. Le contraire est vrai, si les particules sont de couleur blanche, une peinture noire doit être utilisé sur le fond et vice-versa) ou bien placer des feuilles de papier blanc ou noir sous le plancher du canal en verre.

En conclusion, tous ces paramètres permettent l'étude des écoulements de façon plus rapide où les erreurs associées à cette technique, aussi bien durant la mesure que lors du traitement ont été en grand partie analysés par le logiciel Flow Manger lors du prétraitement.

II.6. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

L'analyse de différentes techniques montrent que les essais antérieurs demeurent une étude de référence pour nos essais expérimentaux, bien que les résultats soient compatibles même s'ils ont été obtenus pour des plus petits tirants d'eau. Ces expériences ne donnent pas une description complète de l'évolution des écoulements sur fond rugueux. L'anisotropie de la turbulence engendrée par la surface libre et le fond rugueux ont pu montrer le rôle majeur que peut jouer la rugosité. La recirculation de l'écoulement à surface libre est caractérisée par une importante décroissance de mouvement de rotation des particules fluides avec une intensité est égal à la vitesse de rotation sur l'axe vertical de rotation. En respectant, judicieusement, les limitations, les deux techniques appliquées dans les problèmes pratiques donneront des résultats très satisfaisants. Par analogie aux recherches antérieures analysées, notre travail s'inscrit dans le cadre du prolongement de différents travaux expérimentaux menés par (Kantoush, 2008) et autres chercheurs depuis quelques années au laboratoire *LCH*. L'analyse de ces essais a montré l'effet du champ d'écoulement $2D$ sur la configuration asymétrique dans un réservoir à géométrie symétrique.

II.6.1. Objectif de la thèse

Le but de cette thèse est d'étudier l'effet de la surface rugueuse du fond du réservoir rectangulaire peu profond et géométrie variable sur le champ des vitesses superficielles dans une installation expérimentale d'entrée et sortie symétrique. Il faut rappeler que ce travail

présente la prolongation des résultats expérimentaux déjà effectués dans le même réservoir à surface libre. Dans cet objectif, nous nous intéressons à la technique non-intrusive de mesure *PIV* (Particle Image Velocimetry) des vitesses en surface par l'analyse des images capturées. L'utilisation de cette méthode en terme de champ instantané des vitesses superficielles pour d'autres applications notamment le couplage avec la modélisation hydraulique. L'actuelle recherche regroupe une étude préliminaire qui se base sur des essais effectués dans un champ d'écoulement au-dessus d'une surface de fond rugueux et lisse avec une procédure d'alimentation en eau continue (sans interruption). Le raccordement entre l'analyse des configurations d'écoulement observées expérimentalement au-dessus d'un fond rugueux et lisse dans la zone interne et celles rapportées dans la littérature sont interprétées.

Durant ce travail de recherche, nous avons essayé de répondre à certaines questions, en étudiant par voie expérimentale, l'effet de la rugosité du fond sur l'écoulement de surface. Cependant, cet effet de la turbulence est effectivement difficile à expliquer, surtout, si la forme et la taille des aspérités possèdent des dimensions variables par rapport à la profondeur. Avec cinq sondes ultrasons, fonctionnant par échographie à effet Doppler pulsé, la méthode *UVP* a permis de mesurer les profils de vitesses instantanées où la composante longitudinale de vitesse a été déterminée à travers la totalité de la surface du réservoir. Cette méthode a été utilisée pour permettre la détermination des vitesses instantanées et moyennes où nous souhaitons examiner les effets de l'écoulement turbulent généré par un fond rugueux lisse. Cependant, la turbulence dans un convergent assez étroit cède la place à la turbulence créée dans le large bassin où le jet principal engendre des configurations de recirculation symétriques et asymétriques observées dans le modèle de géométrie symétrique.

Dans la zone externe, la répartition des vitesses devient, en effet, non affectée par la rugosité du fond alors qu'en région interne, l'effet rugueux sur cette distribution des vitesses moyennes et de frottement est présenté. Cependant, cette rugosité a été calculée avec la loi de la paroi (méthode de Clauser) en raison de sa simplicité en termes de physique et de géométrie. Les données ont permis de tester la turbulence dans le modèle d'essais pour souligner la nécessité d'une description des configurations du champ des vitesses extérieures plus détaillée. Le champ d'écoulement bidimensionnel a été examiné au-dessus d'un fond rugueux et lisse afin d'analyser les effets des configurations asymétriques dans une géométrie symétrique. Nous étendrons ce travail à d'autres investigations pour analyser l'effet de la turbulence (un nombre de Reynolds réduit à la moitié $14000 \leq Re \leq 28000$) sur le champ des

vitesses de surface. Les observations expérimentales et les interprétations des résultats ont été décrites en détail dans les prochains chapitres afin de permettre la comparaison des résultats expérimentaux obtenus avec les données antérieures. La même instrumentation de mesure a été utilisée durant les essais est illustrée dans [Tableau 2.1].

Tableau 2.1 : Instrumentations et paramètres de mesure

Paramètres mesurés	Symboles	Unités	Instrumentations
Débit	Q	l/s	Débitmètre électromagnétique
Vitesses d'écoulement	u	m/s	<i>UVP</i>
Vitesses de surface	U	m/s	<i>LSPIV</i>
Niveau d'eau amont et aval	h	m	Echelle et limnimétrie
Epaisseur de la rugosité	e	mm	Pied à coulisse
Pente du fond	I	%	Théodolite
Altitude verticale	Z	mm	Sonde Ultrason

II.7. CONCLUSION

Les méthodes développées au laboratoire s'avèrent être les plus adaptées pour les mesures des vitesses notamment la technique acoustique *UVP* qui confirme les mesures des profils de vitesses à cause de sa simplicité d'utilisation. Elle fournit la preuve d'être capable de relever des mesures de vitesses à l'intérieur de l'écoulement. Elle permet, ainsi, de montrer les résultats obtenus avec différentes rugosités ne présentent aucune différence significative entre les caractéristiques dans la couche externe.

A cela s'ajoute la méthode *LSPIV* qui s'est révélé bien adaptée aux mesures du type écoulement à surface libre par une approche expérimentale. Elle semble donner des résultats encourageants même si des améliorations doivent être apportées dans le futur pour mieux la rendre compréhensive sur un fond rugueux.

Chapitre III

MESURES VIA ULTRASONIC VELOCITY PROFILER (UVP)

INTRODUCTION

L'efficacité des études hydrodynamiques restent toujours réalisées par voie expérimentale malgré les progrès permanents des outils d'informatique dans le domaine de la modélisation numérique. Aucun logiciel et aucun calcul ne peut se prévaloir de présenter de manière suffisamment fiable l'ensemble des phénomènes physiques régissant les résultats de la diversité des écoulements. Cependant, avec l'innovation des appareils ultrasons et l'apparition des méthodes par imageries que la mesure des paramètres hydrodynamiques à travers les analyses échographiques s'est développée. Ces méthodes ont été employées dans les sciences médicales, en mode continue, pour calculer la vitesse du sang déterminée par un déplacement entre l'onde émise et celle réceptionnée. En effet, ce type d'appareillage a ouvert de nouvelles perspectives afin de mesurer les vitesses instantanées en dehors des vaisseaux sanguins. Par ailleurs, *in situ* ce type d'instrumentation acoustique à usage médical ne répondait guère aux contraintes de la mesure où il a été étendu à d'autres applications non cliniques. D'ailleurs, son utilisation dans la mesure des vitesses des écoulements des fluides s'est élargie à d'autre domaine et a été étendue aux mesures ultrasons de l'hydrodynamique. Pour tester l'efficacité de ce système acoustique, de nombreuses applications expérimentales ont été effectuées par (Taketa, 1995) afin de confirmer son potentiel, sa fiabilité et sa précision dans les mesures, en effet. (Taketa était le concepteur et l'auteur de nombreux logiciels du traitement de données).

Le développement de la méthode de la Vélométrie Ultrason à effet Doppler pulsé a fait son apparition depuis une vingtaine d'années. Elle permet de relever notamment les valeurs des vitesses d'écoulement dans le domaine de la physique et l'Engineering de l'eau où elle présente une mesure de ligne et non de point. Néanmoins, *UVP* (**U**ltrasonic **V**elocity **P**rofiler) apparait plus appropriée aux besoins et à l'emplacement précis des points de vitesses afin de mesurer les vitesses d'écoulement pour un gradient de pression, approximativement, nul via des profils des vitesses instantanées. Depuis quelques d'années, les profileurs des vitesses acoustiques à effet Doppler sont de plus en plus employés par les équipes hydrométriques surtout pour le jaugeage des cours d'eau (rivières).

Des contributions incluant les résultats des travaux de recherche menés, dans ce contexte, par la communauté scientifique relative aux écoulements turbulents ont été mentionnés dans la littérature. En effet, grâce à la facilité de sa mise en œuvre, cette technique a été utilisée dans la mécanique des fluides et les écoulements turbides. (De Cesare, 1998). Par ailleurs, dans les écoulements complexes et les liquides opaques, les données ont pu être évaluées par (Oehy, 2003), (Kantoush, 2008) & (Camnasio et al, 2011). Cependant, la calibration de ces appareils optiques ainsi que le choix des paramètres de mesure dans les écoulements ont pu offrir de multiples possibilités susceptibles de faire évoluer le mode de la turbulence. L'effet de la surface rugueuse du fond du canal sur les caractéristiques de l'écoulement turbulent a été conduit dans la couche limite et validé avec modélisation numérique par (Akinlade, 2005). Alors que, durant la même année, Labiod (2005) a effectué des essais dans un écoulement à surface libre à fond de rugosité inhomogène. Cependant, Zaouali (2008) a élargi sa recherche par la modélisation et l'examen de la structure de l'écoulement dans des canaux à fond de rugosité inhomogène.

Dans notre étude, le champ d'écoulement extérieur sur une surface rugueuse et homogène comparée à un fond lisse a été décrit, par un ensemble de paramètres géométriques et hydrauliques (Choufi et al, 2014). Cependant, nous rappelons les formulations relatives à la loi de la paroi sur fonds lisse et rugueux en écoulement turbulent. Pour prédire les vitesses de l'écoulement, plusieurs lois empiriques fondées sur l'analyse adimensionnelle notamment la loi logarithmique qui a été utilisée dans les mesures des profils des vitesses horizontales.

Le montage du dispositif d'essai est décrit dans la (Partie III.1.1) ainsi que les informations relatives à l'instrumentation et aux moyens utilisées dans l'expérimental sont données dans la (Partie III.1.2). Par ailleurs, celle-ci sera suivie de plusieurs mesures expérimentales créées par la rugosité du fond du réservoir peu profond dans la (Partie III.2). Le choix et la description de l'ensemble des surfaces rugueuses étudiées pour un écoulement à fond rugueux et lisse avec la résolution spatiale sont mentionnés dans la (Partie III.2.1). La disposition des sondes *US* employées dans les essais préliminaires sont décrites dans la (Partie III.2.2). Les essais préliminaires sont présentés dans la (Partie III.3), suivis des descriptions de ces essais dans la (Partie III.3.1). La technique de mesure de la méthode *UVP* basée sur l'effet Doppler pulsé est mentionnée dans la (Partie III.3.2).

Le principe de fonctionnement de la vélocimétrie a été donné dans la (Partie III.3.3). Dans les écoulements turbulents peu profonds, la loi de la paroi (Clauser) a été illustrée dans

la (Partie III.4). La détermination des profils des vitesses instantanées mesurés dans le canal peu profond sont donnés dans la (Partie III.4.1). La distribution du champ des vitesses dans un écoulement peu profond ainsi que la rugosité équivalente expérimentale du fond du réservoir sont calculées, respectivement, dans la partie (Partie III.5) & la (Partie III.6). L'interprétation des résultats d'essais obtenus sur fond lisse comparés avec ceux du fond rugueux sont montrés dans la (Partie III.6). Néanmoins, pour analyser l'effet de la rugosité du fond sur le champ d'écoulement, les caractéristiques d'un gradient de pression nulle dans la couche limite ont été mentionnées. L'interprétation de tous les résultats obtenus et les caractéristiques du fond rugueux sont montrés.

En conclusion, la technique *UVP* s'avère prometteuse dans diverses études liées aux écoulements du transport solide notamment dans les cours d'eau et l'envasement des barrages-réservoirs.

- **Contexte général**

Les différents instruments Ultrasons utilisés, ces dernières années, peuvent fournir avec précision, la possibilité d'acquérir des informations spatiotemporelles des écoulements turbulents (De Cesare, 1998), (Labiod, 2005) & (Jaàfar et al, 2005). Néanmoins, cette instrumentation a fait l'objet de nombreux travaux de recherche en modélisation numérique qu'en expérimentale, notamment, par Roland (1994), De Cesare (1998), Akinlade (2005) et Zaouali (2008). Grâce à la facilité de sa mise en œuvre dans la détermination des profils de vitesses moyennées le tirant d'eau, la méthode *UVP* est couramment utilisée dans les écoulements turbulents peu profonds (Taketa, 1999). La performance de cette technique a été optimisée dans l'écoulement à ciel ouvert afin de mesurer les profils des vitesses longitudinales ($u(z)$) moyennées la longueur du canal. Cependant, le système de mesure se compose, généralement, de l'utilisation de différentes instrumentations de mesure, les procédures d'acquisition des données et l'environnement opérationnel. D'autre part, les écoulements naturels ou artificiels résultent des conditions aux limites qui peuvent être différentes d'un cas à un autre sous l'effet de la diversité des formes des berges et la rugosité.

Notre travail consiste à une étude préliminaire réalisée dans un canal rectiligne à fond horizontal pour déterminer la rugosité du lit et son effet sur le champ d'écoulement. Face à de nombreuses questions posées, un grand nombre d'essais réalisés nous a permis de maîtriser les méthodes de mesure et les instruments utilisés durant les expériences. v

Une partie de notre programme expérimental a été consacrée à une étude comparative entre les deux surfaces : rugueuse et lisse à partir d'une étude préliminaire menée dans le canal d'essais. Suivant l'élément d'une rugosité uniforme reposant sur le caractère non intrusif du cadre unidimensionnel, le calcul hydraulique devient, considérablement, facile via ces essais. Les résultats de mesures des profils de vitesses enregistrés par l'instrument *UVP Monitor*, sont convertis en un ensemble de vitesses unidimensionnelles $V(u,0,0)$.

En conclusion, l'écoulement turbulent à surface libre nécessite encore beaucoup plus de validation pour confirmer sa fiabilité en multiple configuration au-dessus du fond rugueux.

III.1. INSTALLATION DE MESURE

III.1.1. Montage du dispositif d'essais

La modélisation physique est une partie importante de la présente thèse, dans le but d'étudier l'influence de la rugosité équivalente sur le champ d'écoulement. Cela a permis de réaliser un travail préliminaire au Laboratoire de Constructions Hydrauliques *LCH*, *EPFL*.

L'étude expérimentale a été menée dans un canal de section rectangulaire à fond lisse et horizontal dans le but de calculer la rugosité équivalente moyenne. Les dimensions intérieures du modèle d'essais de ($L = 6m$) de longueur ($b = 0.25m$) de largeur et de ($h = 0.200m$) de profondeur sont illustrées dans la (Figure 3.1). Les parois latérales du bassin ont été fabriquées en *PVC*, tandis que de différentes surfaces de rugosité ont été posées sur le fond. Par ailleurs, le niveau d'eau à l'amont et à l'aval du canal a été axialement mesuré à l'échelle et vérifiée par limnimétrie. Le débit moyen d'alimentation ($Q = 7l/s$) est refoulé par une conduite d'alimentation et prescrit constant et continu par régulation automatique. Sa mesure est assurée par un débitmètre électromagnétique et contrôlé par une vanne de réglage située sur la conduite d'alimentation.

Deux grilles en nid d'abeilles ont été installées, perpendiculairement, à l'entrée du canal étroit ($b/h < 5$) afin de générer une répartition de vitesses sur toute la longueur à peu près uniforme. Le rôle de ces grilles est d'assurer une tranquillisation de l'écoulement stationnaire et une meilleure homogénéisation dans la section de mesure afin de pouvoir éliminer les perturbations engendrées par le changement de longues vagues.

Le modèle physique fonctionne en circuit fermé, en assurant un régime d'écoulement permanent et uniforme. Par ailleurs, l'eau est aspirée du bassin principal par une électropompe et ajusté par une vanne située à proximité de l'installation.

Un nombre de Reynolds ($R_e = uh/\nu$) est correctement modélisé dans le canal peut être pris comme limite supérieure afin de maintenir une turbulence pleinement développée dans la section de mesure. Par ailleurs, la géométrie d'entrée et de sortie du canal ont été maintenues symétrique durant toute l'étude expérimentale pour que le régime puisse fonctionner en similitude de Froude $F_r = u\sqrt{gh}$. Il a été pris assez faible pour conserver un écoulement turbulent-fluvial ($F_r < 1$). La température de l'eau varie entre 18°C et 20°C. Pour vérifier la reproductibilité de tous les essais pour lesquels l'écoulement était stable ont été répétés.

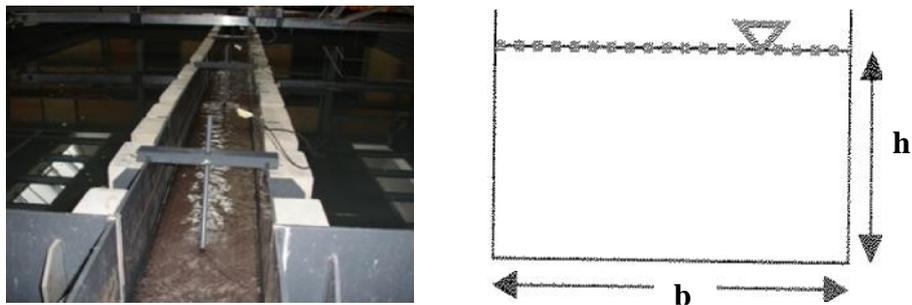


Figure 3.1 : Vue d'aval du canal d'essais

$$L = 6m, b = 0.25m, h = 0.200m, Q = 7l/s$$

- **Pente du fond**

Suivant le sens de l'écoulement uniforme à surface libre, la force de gravité correspond à une faible pente $I = 0.0080\%$ qui peut être obtenue par la différence des deux niveaux d'eau amont et aval par la distance horizontale cumulée du canal. Cependant, La vérification des mesures de fond ont été effectuées avec le théodolite (un instrument beaucoup plus précis). Les relevés topographiques ont montrées que le modèle d'essais possède une pente de fond, approximativement, horizontale et parallèle à la surface libre.

$$\text{tg}r = \frac{\Delta h}{\Delta L} = I = J \quad (3.1)$$

Δh : Différence de niveau mesurée par le théodolite à l'amont et l'aval du canal,

ΔL : Distances cumulées de la longueur totale du canal rectangulaire et I : Pente du fond du canal déterminée par un théodolite dans une section constante qui est définie comme un gradient hydraulique montrant qu'elle est identique à la pente énergétique.

III.1.2. Instrumentation et moyens de mesures

Le phénomène de la turbulence est conditionné, dans le laboratoire, par le choix des équipements de mesure et la capacité de la résolution spatiale et temporelle qui peuvent fixer les limites de l'étude. En effet, la détermination des profils des vitesses dans les canaux aussi larges qu'étroits comprend les appareils de mesure les plus appropriées. En effet, ces instruments déployés, sont décrit ci-dessous dans le but de réaliser notre étude expérimentale. Cependant, les paramètres hydrodynamiques ont été vérifiés et contrôlés à partir de la salle de commande par deux ordinateurs fixes : Le premier *PC* (Figure 3.2a) montre une vue générale des vannes et les branchements des canalisations où les connexions du laboratoire sont mentionnés. Tandis que le deuxième (Figure 3.2b) met en évidence le démarrage, l'arrêt ainsi que la commande du système-pompe sous tension, le débit programmé, le niveau d'eau, la pression maximale, minimale et réelle, le nombre de tours/min et la température de l'eau dans le principal bassin d'alimentation. Nous disposons des instruments qui peuvent mesurer les paramètres expérimentaux repartis dans un espace associé à d'importants aspects hydrodynamiques. En effet, pour les instruments non-intrusifs, la vitesse mesurée est celle de la surface libre qu'il faut interpoler. Ces paramètres de mesure liant les vitesses d'écoulement à la rugosité du fond sont examinés par des caractéristiques d'influences qui donnent le champ des vitesses.

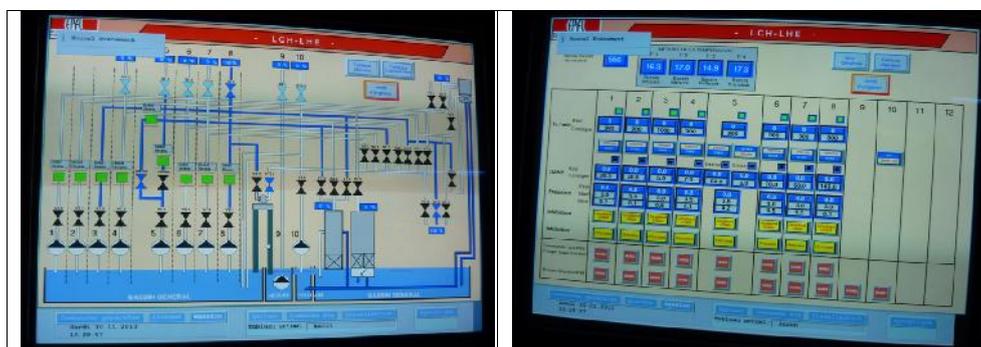


Figure 3.2 : Système de commande du laboratoire *LCH* , *EPFL*

a) Vue des branchements de canalisations et des vannes

b) Vue des pompes et des paramètres hydrauliques

L'instrument *UVP X-3PS Monitor* permet la mesure des profils des vitesses successifs moyennés toute la longueur du canal (Figure 3.3a, b) à partir d'un fichier de données. Par ailleurs, cet appareil est destiné aux chercheurs pour mesurer les profils des vitesses en un seul endroit afin de déterminer les vitesses d'écoulement unidimensionnel. En effet, ce type d'instrument fournit la possibilité d'acquérir des informations spatiotemporelles des particules liquides sans pour autant faire des hypothèses simplificatrices de la turbulence (Mihoubi et al, 2007). Par ailleurs, il est utilisé dans des mesures permettant de détecter des phénomènes locaux correspondant à une résolution temporelle ($t < 0.1s$) avec une résolution spatiale ($x < 0.1mm$).

L'acquisition des vitesses avec l'instrument *UVP Monitor*, suivant la longueur du canal, permet de mesurer les profils des vitesses instantanées. En effet, cette instrumentation souscrit une acquisition des profils des vitesses instantanées ($u(z), 0, 0$) dont l'enregistrement peut arriver à une série de mesure de 1024 profils. Cette acquisition des données (profils de vitesses enregistrés) sont stockées, en forme binaire, dans des fichiers bruts pour l'exécution et le calcul qui sont transférés ultérieurement dans un dossier spécifique, hors laboratoire, dans un autre ordinateur réservé, exclusivement, pour l'analyse et le traitement de données (De Cesare, 1998) & (Kantoush, 2008).

L'instrument *UVP monitor* connecté aux cinq sondes *US* via des prises (Type *BNC*) est réservé aux fréquences fonctionnant par échographie à effet Doppler pulsé. Si les sondes ultrasons sont orientées dans le sens de l'écoulement, les vitesses mesurées seront positives et le flux va s'éloigner.



Figure 3.3 : Instrument *UVP X-3PS Monitor*

a) Vue frontale

b) Vue arrière

III.2. MESURES EXPERIMENTALES

Une surface rugueuse est celle qui présente des irrégularités et cause le frottement du lit, contrairement à ce qui se passe sur la surface lisse. Nous avons essayé d'examiner le cas d'une section plane à fond lisse et rugueux afin de déterminer la rugosité standard du fond du canal via le nombre de sondes *US* qui est de l'ordre de cinq ($N = 05$)

Pour étudier l'effet de cette rugosité équivalente sur le champ d'écoulement de surface, un travail de laboratoire a été mené pour mesurer les profils des vitesses longitudinales par des essais préliminaires. En effet, les mesures effectuées au laboratoire ont été focalisées sur l'analyse de la structure de l'écoulement à fond rugueux initialement lisse. Les essais montrent les profils des vitesses instantanées qui peuvent fournir des données au moyen du logiciel conçu par la société mère (Met flow S/A., 2005). En effet, à partir des traitements des fichiers bruts, il est possible de déterminer les informations unidimensionnelles où figurent la profondeur moyenne, la vitesse d'écoulement dans la section de mesure.

III.2.1. Choix de la rugosité du fond

L'objectif de nos essais est la détermination de la rugosité équivalente moyenne des trois surfaces étudiées afin de pouvoir analyser le champ des vitesses, suivant les paramètres correspondants à l'origine de la zone logarithmique, la vitesse de frottement et l'élément du fond rugueux. Le choix de la surface rugueuse a été étudié sur trois modèles différents et non homogènes notés (*A*, *B* et *C*) et comparés avec le fond lisse de nature *PVC* (Figure 3.6). Les surfaces rugueuses ont été, soigneusement, collées de façon homogène et uniforme sur la totalité de la surface du fond.

La paroi murale latérale du canal a été maintenue lisse avec une influence négligeable par rapport à la surface rugueuse. L'emploi de cette surface rugueuse a permis de déterminer le régime de l'écoulement à résolution spatiale. Nous avons préféré l'utilisation du modèle cité en référence afin de pouvoir, physiquement, augmenter le nombre de Reynolds local afin d'obtenir un écoulement turbulent pleinement développé dans le canal d'entrée.

Après chaque essai, le modèle doit être nettoyé et séché pour l'emplacement d'une autre surface de rugosité au fond du modèle afin d'entamer une autre expérimentation. L'emploi de ces rugosités sur le plancher du canal permet de déterminer la surface rugueuse qui va être utilisée durant les essais expérimentaux.

Les résultats permettent de déterminer la rugosité moyenne destinée à l'étude expérimentale, après avoir calculée sa moyenne arithmétique et son écart type voir la (relation 3.10) & la (relation 3.11).

- Une surface rugueuse du type gazon de jardin d'épaisseur ($e_A = 6.2mm$)
- Une surface du type gazon de jardin avec sphères d'épaisseur ($e_B = 7.9mm$)
- Une surface rugueuse du type plastic synthétique d'épaisseur ($e_C = 8.2mm$)
- La surface lisse est déterminée par le matériau *PVC* d'épaisseur ($e_D = 8mm$)

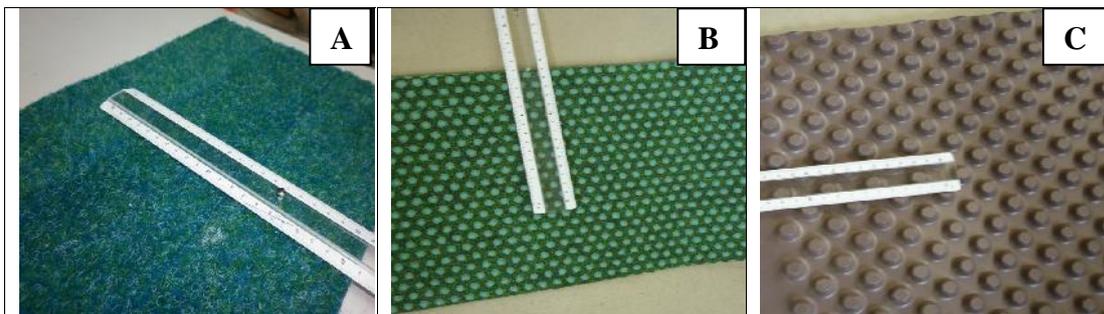


Figure 3.6 : Trois différentes surfaces rugueuses du fond

A) $e_A = 6.2mm$, B) $e_B = 7.9mm$, C) $e_C = 8.1mm$

III.2.2. Disposition des sondes *US*

Dans un canal de section ($6.00m \times 0.25m$) les sondes *US* en contact avec la surface libre ont été ajustées de façon uniforme et connectées à l'instrument *UVP Monitor* par des câbles coaxiaux. La position des sondes est donnée, essentiellement, par la disposition des capteurs pour une profondeur d'eau variable ($h_1 = 0.200m$) (Figure 3.7a) et ($h_2 = 0.100m$) en présence du réflecteur ultrason (Figure 3.7b).

Pour des raisons pratiques, un arrangement de sonde a été adopté pour permettre la mesure des vitesses longitudinales d'écoulement et la rugosité équivalente moyenne du fond. Le canal comporte différents emplacements de mesure sur lesquels sont disposés les cinq transducteurs. Cependant, à l'amont du canal se situe le premier transducteur N°1 espacé de $1400mm$ par rapport au 2^{ème}. Alors que le 5^{ème} transducteur est placé à la même distance juste à l'aval du canal d'essais qui est équipé d'une limnimétrie pour mesurer le niveau d'eau à l'entrée et la sortie du canal. Tandis que le troisième transducteur se trouve au centre de gravité du canal (l'emplacement central) distant de $200mm$ du 2^{ème} et du 4^{ème} transducteurs.

Alors que ces deux autres restants se trouvent, respectivement, l'un par rapport à l'autre d'environ 200mm . L'avantage de cette disposition est de suivre l'évolution de la vitesse dans le sens longitudinal d'écoulement, cela implique que l'alignement horizontal du capteur avec l'angle d'inclinaison par rapport à la verticale soit contrôlé dans tous les points situés sur la même ligne.

Les transducteurs ont été immergés dans l'eau sans aucune introduction du sillage ni des perturbations de la surface libre afin de pouvoir mesurer ces profils des vitesses instantanées. Les capteurs *UVP* ont été fixés sur le porte-instruments, effleurant légèrement la surface libre d'environ (5mm) sans qu'ils n'entraînent des perturbations au sein de l'écoulement (Chen & Jirka, 1997) & (Muste et al, 2008) afin de pouvoir transmettre les impulsions sonores dirigées à travers la colonne d'eau. Les applications théoriques, expérimentales et numériques relativement aux écoulements peu profonds montrent que très peu de recherches se sont intéressées au moindre détail de la fonction de sillage (Chen et al, 1995). Par ailleurs, l'évolution de la stabilité non linéaire de l'écoulement de sillage montre que la formulation de l'instabilité est régie de l'équation de Ginzburg-Landau (Kolyshkin & Ghidaoui, 2003). En effet, (Coles, 1956) était le seul qui a introduit la zone de sillage pour décrire la distribution verticale des vitesses longitudinales.

En conclusion, le concept relatif aux écoulements turbulents dans les canaux peu profonds sur un fond lisse et rugueux ont été traités par des sondes ultrasons.



Figure 3.7 : Disposition des sondes *US* dans le canal $6.00\text{m} \times 0.25\text{m}$

a) $h = 0.200\text{m}$

b) $h = 0.100\text{m}$

III.3. ESSAIS PRELIMINAIRES

L'objectif de ces essais préliminaires est de disposer des données aussi complètes que possible afin d'améliorer la paramétrisation de la turbulence unidimensionnel sur fond lisse

et rugueux dans la direction privilégiée du courant. En écoulement turbulent pleinement développé dans un canal rectangulaire peu profond, la rugosité équivalente moyenne est déterminée avec des essais préliminaires via les cinq (05) sondes *US* sur un fond lisse de nature *PVC* et trois différentes surfaces rugueuses non similaires. Les profils des vitesses ($u(z), 0, 0$) ont été déterminés sur les trois surfaces rugueuses (*A*, *B* et *C*) collées sur la totalité du fond notées (E_1, E_2 & E_3). Par contre les deux essais restants (E_4) ont été étudiés sur un fond lisse pour les mêmes conditions hydrauliques et géométriques.

L'étude expérimentale s'articule, essentiellement, autour de la mesure des vitesses unidimensionnelles *1D* dans une veine hydraulique ($6.00m \times 0.25m$) menée avec une profondeur d'eau variable (h_1) et (h_2) avec un débit d'alimentation moyen maintenu constant ($Q = 7l/s$). Durant la première série expérimentale, le déversoir rectangulaire situé à la sortie du canal a été maintenu en position fermée mené avec une profondeur d'eau ($h_1 = 0.200m$). Par contre dans la deuxième série, la position du clapet a été changé où la profondeur d'eau a été réduite à la moitié ($h_2 = 0.100m$) pour des conditions géométriques similaires. L'ensemble des paramètres géométriques et hydrodynamiques expérimentales caractérisant l'étude préliminaire ont été résumés dans le (Tableau 3.1).

La série d'essais a été illustrée par l'évolution du nombre de Reynolds parfaitement développé ($27940 \leq R_e \leq 28000$) afin d'étudier l'effet du champ des vitesses moyennes pour différents rapports d'aspect (h/b). De ce fait dans l'écoulement turbulent pleinement développé, les conditions initiales et aux limites les plus stables sont présentées et les vitesses moyennes horizontales (u) sont examinées. Ces vitesses sont déterminées par le décalage de la fréquence ultrason mesurée par échographie à effet Doppler pulsée et la concentration des sédiments cela permettra de vérifier que les conditions ont été bien maintenues constantes.

Avant le démarrage de la pompe, ces conditions aux limites sont strictement vérifiées. Par ailleurs, au cours de chaque expérience, l'emplacement des sondes ultrasons dans les canaux d'entrée et de sortie a été vérifié. Cependant, pour chaque essai, le niveau de l'eau a été mesuré au moyen des sondes ce qui a permis de maintenir ces conditions aux limites constants. En effet, ces vitesses ont été mesurées au moyen d'un ultrason Doppler Velocity Profiler (Met flow S/A., 2005) ce qui permet une mesure instantanée du profil de vitesse *1D* sur toute la profondeur d'eau (Taketa, 1995).

Tableau 3.1 : Paramètres géométriques et hydrauliques expérimentaux

Essais	$b[m]$	$L[m]$	$Q[l/s]$	$h[m]$	$h/b[-]$	$u[m/s]$	$F_r[-]$	$R_e[-]$
1-2	0.25	6.00	7.00	0.200	0.800	0.140	0.100	28000
3-4				0.100	0.400	0.254	0.283	27940

III.3.1. Description des essais

Le principe de mesure consiste à injecter dans l'écoulement un traceur liquide, après la stabilité de la surface libre en amont et en aval du canal, avec une certaine fréquence, qui est constitué de bulles d'hydrogène afin de rendre le mouvement plus visible. La solution aqueuse a été choisi en raison de sa densité égalant à celle de l'eau ($d = 1$) et de son effet négligeable sur la précision de mesures. Après quelques essais, ce léger colorant fournit uniquement un écho local proche d'un seul capteur en raison de sa faible vitesse qui s'avère que sa distribution se produit loin des autres capteurs. Les différents points de mesure sont situés dans le champ lointain du transducteur car l'eau claire n'est, insuffisamment, pas chargée d'impuretés.

Après plusieurs tentations, un deuxième réflecteur (Figure 3.8) composé de coquilles de noix moulues a été employé pour produire beaucoup d'écho en générant un écho US s'étalant sur toute la longueur du canal. Ces coquilles de noix broyées en poudre de façon homogène avec une masse volumique ($\rho_s = 1500 kg/m^3$) et un diamètre moyen ($d_{50} = 50 \mu m$) sont utilisées pendant nos essais. Ces coquilles de noix ont été adoptées pour suivre le jet dans son mouvement afin de réfléchir suffisamment de lumière dans le but d'obtenir, en sortie, un photo-détecteur et un rapport signal-bruit plus correct et plus fiable. La présence des sédiments fins ensemencé à la surface libre de l'écoulement, réfléchit la lumière en écho quand elle traverse une frange brillante du réseau en augmentant l'intensité de l'écho et le rendre plus net.

Il faut rappeler que la présence de ces sédiments dans l'eau possède un effet négligeable sur les résultats des mesures (Taketa, 1999) bien au contraire, sa concentration dans l'écoulement donne un effet bénéfique à la précision des vitesses.



Figure 3.8 : Réflecteur acoustique utilisé durant les mesures UVP

$$d_{50} = 50\text{-}\mu\text{m}, \dots_s = 1500\text{kg} / \text{m}^3$$

III.3.2. Technique de mesure UVP

Le principe de mesure de la Vélocimétrie Acoustique Doppler repose sur une technique optique non-intrusive pendant une seule acquisition. L'analyse d'une onde acoustique émise par l'appareil dans l'eau et réfléchi par des particules rétro diffusantes portées par le courant est mentionnée. Les paramètres du système de mesure décrivant les propriétés physiques des transducteurs sont présentées dans (Tableau 3.2). Par ailleurs, pour le déclenchement de l'acquisition dans un milieu considéré, le signal de l'écho est fourni à la sortie de la vélocimétrie pour permettre le découpage du faisceau en un ensemble de volume de mesure. Cependant, les considérations d'ordre acoustique empêchent la prise des données dans la zone proche des sondes, permettant la mesure des profils de vitesses instantanées avec une résolution spatiotemporelle suffisante. La détermination des vitesses est fonction de la fréquence des impulsions de répétition des ondes acoustiques f_{PRF} et de la fréquence de base d'émission de la sonde f_0 (Jaàfar et al, 2005). Avec les paramètres (f_D , f_0 , Cs) ces sondes de dimensions ($40\text{mm} \times 5\text{mm}$) permettent de calculer les vitesses longitudinales dans la direction de la propagation de l'onde (Figure 3.9).

La sonde UVP émette une impulsion ultrasons US qui se déplace le long de l'axe de mesure et puis passe à une phase d'écoute ou de réception. Par la suite, lorsque cette sonde envoie son signal de mesure (ondes de fréquence) sous l'effet d'un angle Doppler ($\alpha = 30^\circ$),

une impulsion ultrason émise dans l'eau avec une fréquence ($f_0 = 4\text{Mhz}$) pour une durée d'enregistrement ($t' = 50\text{ms}$) et la vitesse instantanée est prise en un point.

Tableau 3.2 : Paramètres du système de mesure des sondes UVP

Transducteurs	Caractéristiques
Référence du capteur	TX-4-5-8
Nombre de transducteurs	5
Diamètre	5mm
Longueur	40mm
Fréquence de transmission	4Mhz
Angle d'inclinaison	30°
Nombre de points de répétition	128 points
Nombre de cycle (blocs)	8
Durée totale d'enregistrement	50milliseconde
Vitesse du son dans l'eau	1480m/s

Cependant, la fréquence d'échantillonnage émise par la sonde est traduite par un logiciel de commande pour automatiser le procédé d'acquisition comprenant : le mouvement de mesure à la position désirée, l'enregistrement du niveau d'eau, le temps d'acquisition et le champ d'écoulement pour chaque capteur mesurant des vitesses.

En conclusion, la position, la taille et l'espacement des points de mesure dépendent fortement, de la fréquence de la sonde et la vitesse maximale de réglage où le traitement de ces données sont convertis en profils de vitesses ($u(x_1)$).

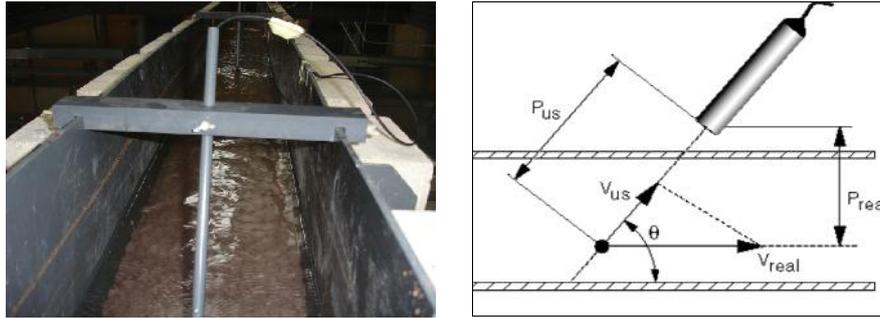


Figure 3.9 : Position inclinée des sondes US en présence du réflecteur acoustique

III.3.3. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de la méthode de la vélocimétrie laser est basé sur l'effet Doppler pulsé produit par des sédiments en suspensions agissant comme un réflecteur acoustique dans un écoulement à surface libre (Figure 3.10). Cette hypothèse consiste à calibrer le décalage Doppler entre l'onde émise et l'onde rétrodiffusée par la rugosité du fond créée par la turbulence. En effet, les ondes réfléchies par la surface du fond rugueux converti les fluctuations de l'intensité lumineuse en signal électrique, avec la lumière capturée. Toutefois, les informations proviennent de la lumière réfléchi par les sédiments fins sont transportés dans le volume du liquide à travers la colonne du liquide. Alors que le capteur joue le rôle du récepteur (cible) qui se déplace avec la vitesse d'écoulement dans le milieu de mesure où ce même transducteur est utilisé comme récepteur, successivement, entre les deux émissions.

Le capteur transmet des impulsions de fréquence de base d'ultrason f_0 se réfléchies en écho provenant des sédiments fins qui s'y trouvent le long de l'axe du volume de mesure en mouvement (notre cas les capteurs adoptés ont une fréquence de $f_0 = 4\text{Mhz}$). Cependant, quand l'impulsion de la sonde frappe les sédiments fins (réflecteur) en mouvement, l'écho est capté avec un temps du parcours amorti sur son parcours. Une partie disperse l'énergie des ultrasons non seulement sur la particule liquide d'écoulement mais aussi sur les échos de retour. Le déplacement des faisceaux acoustiques à l'intérieur produit un décalage dans le son transmis afin de calculer la composante de vitesses longitudinales (Jaàfar et al, 2005) & (Muste et al, 2008). Après la fin de l'émission de chaque onde, l'acquisition commence avec un certain retard de temps prédéterminé.

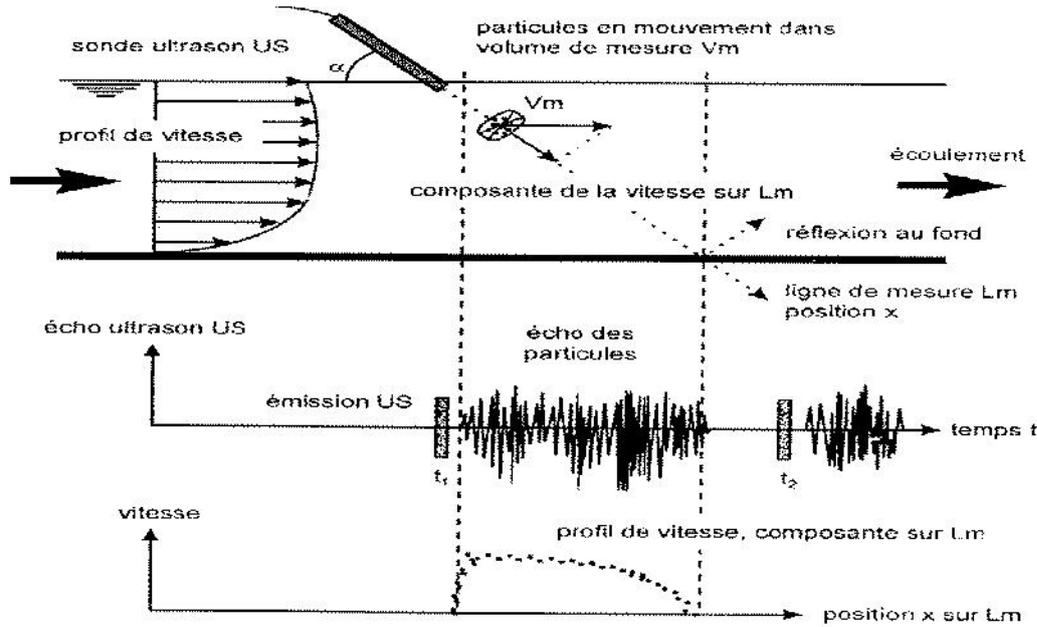


Figure 3.10 : Mesure des profils de vitesses par échographie à effet Doppler pulsée sur une ligne de mesure dans un écoulement à surface libre (Selon De Cesare, 1997)

Lorsque le signal revient vers la sonde, une mesure s'effectue à l'intérieur de l'écoulement et une profondeur maximale de pénétration H en résulte. Celle-ci est attachée à la période de répétition de l'onde qui impose la limite de la méthode notamment la relation inverse liant la profondeur d'exploration à la vitesse maximale mesurable. Cette distance maximale (la profondeur maximale de mesure) est liée à la gamme de la vitesse enregistrable par la relation :

$$u = \frac{s^2 C_s}{4 f_D} H \quad (3.2)$$

f_D : Fréquence d'émission Doppler, C_s : Vitesse du son dans l'eau, H : Profondeur d'eau maximale de mesure, u : Vitesse moyenne d'écoulement.

Par convention, la distance à la cible est calculée par la célérité du son et la vitesse d'exécution ramenée à la moyenne, par analyse de l'écho provenant du réflecteur acoustique de la surface de mesure en mouvement. Le nombre de profils de vitesses enregistrés a été optimisé afin de montrer le champ d'écoulement qui se développe dans un canal peu profond au-dessus d'un fond lisse et trois surfaces rugueuses.

Toutefois, le logiciel développé pour commander et automatiser le procédé d'acquisition comprend le mouvement de mesure à la position désirée et l'enregistrement du champ de vitesses ainsi que le niveau d'eau. Après l'examen d'une variété de données antérieures, nous pouvons conclure que les idées classiques décrivent bien les écoulements turbulents de façon adéquate.

Différentes positions le long de la ligne de mesure pour l'acquisition UVP

Density of liquid=1.000

Sound speed $C_s=1480\text{m/s}$

Number of transducers=5

Window parameters

105 mm < maximum depth < 757mm

Maximum measurable depth=273.25mm

Minimum depth 5mm

0.74mm < Channel distance < 1.67mm

Velocity range of measurement=0.4991m/s]

Windows width=127*Channel distance

Starting depth=5mm+n x 1.48 mm

End depth=starting depth window width=5-273.06 mm

Signal Parameters

Transmitting frequency=4MHz

Number of repetitions=128

Number of cycles=8

Channel width=1.48 mm

Multiplexer parameters

Number of cycles per pulse=8

Delay between cycles=1500ms

Minimum sampling time=50ms

Le programme *UVP 4ps.exe* s'exécute automatiquement, lorsque le début des mesures s'affiche (voir les mesures mfprof0003 ci-dessous). A cet effet, la 3^{ème} sonde a été prise comme exemple pour montrer l'exécution du logiciel des mesures.

- **Paramètres statistiques de mesures de l'essai**

Zero values excluded

Profile definition

Number of channels=160

Number of profiles=1024

Amplitude data=No

Sampling period=50ms

Starting time=6/25/10 12:42:57 PM

End time=6/25/10 12:44:10 PM

Medium

Sound speed=1480m/s

Maximum depth and velocity range

Maximum depth=273.25mm

Velocity band width=501mm/s

Minimum on-axis velocity=0mm/s

Maximum on-axis velocity=499.1mm/s

On-axis velocity resolution=1.957mm/s

Pulse rep. freq.=2.70819 kHz

Window parameters

Window start=5 mm

Window end=269.73 mm

Channel distance=1.67 mm

Channel width=1.48 mm

C-factors

C on-axis velocity=1.957 mm/s

C Doppler=10.579 Hz

C sound speed=0.185 mm

Signal parameters

Frequency=4MHz

Cycles=8

Repetitions=128

Noise level=7

RF gain

US Voltage=150 V

Gain start=7

Gain end=9

Trigger mode

0-None

Multiplexer parameters

Number of cycles= 8 (Number of profile blocks=8)

Cycle delay=1,500

Multiplexer table

i	transducer#	profiles	angle [-]	delay [ms]
0	3	128	90.0	1,500

Les 128 points de répétition des profils de vitesses dans l'espace de 8 blocs par profil sur une distance de 273.25mm à intervalle régulier est attribuée pour la fréquence d'impulsions de répétition des ondes acoustiques (f_{PRF}).

Le programme **Mfdc.exe** permet une visualisation du profil après profil, l'extraction de tous les profils de la matrice (128×1024) d'une série de n'importe quel nombre de profils dans la matrice et il les extrait seul, ligne après l'autre pour écrire un fichier des valeurs extraites. Le fichier d'extraction est directement lisible dans Excel où l'affichage peut être modifié pour tenir compte de la direction des vitesses (Figure 3.11).

Par contre le programme **Mfx.exe** peut lire les fichiers multi-bloc, permettant uniquement l'extraction du profil moyen sur toute la durée de mesure soit 1024 profils. En effet, les deux programmes permettent de visualiser le contenu et d'extraire des profils moyens soit sur toute la mesure soit par bloc avec diverses options d'élimination. Il est possible d'afficher le signal de l'écho de la sonde à l'aide d'un oscilloscope, qui est particulièrement, utile dans la reconnaissance de la position d'une paroi ou des obstacles à l'écoulement (Met flow S/A., 2005). Ces profils de vitesses sont mesurés sur toute la longueur du canal, où la moyenne de différentes rugosités est déterminée. L'analyse postérieure et le traitement des données sont convertis en profils de vitesses ($u(x_i)$).

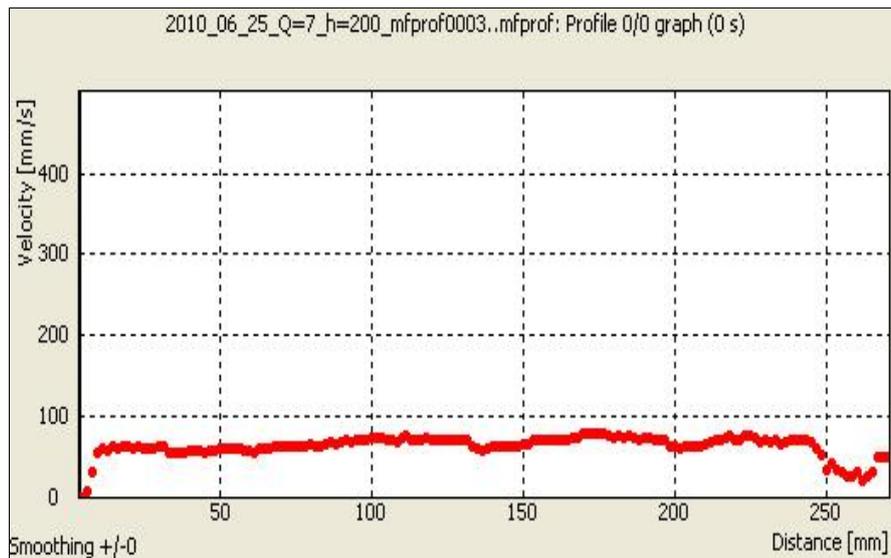


Figure 3.11 : Profils de vitesses longitudinales $(u(z), 0, 0)$ enregistrées par UVP Monitor

$$L = 6.00m, b = 0.25m, Q = 7l/s, h = 0.200m, R_e = 28000$$

III.4. LOI DE LA PAROI

Selon la loi de la paroi des écoulements à ciel ouvert, l'ajustement de la distribution logarithmique des profils de vitesses $(u(z))$ dans la zone interne à faible épaisseur $(z/h \leq 0.2)$ permet la détermination de la vitesse de cisaillement et la rugosité équivalente (Labioud, 2005) & (Akinlade, 2005). Sa formulation s'appuie, généralement, sur les considérations théoriques et les résultats expérimentaux obtenus dans les écoulements de référence afin de définir les conditions aux limites de la turbulence fondée sur une approche statistique. Suivant cette loi, les applications expérimentales ont montrées qu'en dehors de la couche limite, la turbulence devient indépendante du fond rugueux (Townsend, 1976). Par ailleurs, en se basant sur de nombreuses applications expérimentales de la zone logarithmique, une conjecture est adoptée par la présence de la surface libre qui a tendance à inhiber les mouvements verticaux. Cette loi traduit les propriétés des écoulements turbulents cisailés à proximité de la surface du fond du canal. Dès lors, nous passons au développement du concept de Prandtl et à la répartition des vitesses en écoulement turbulent bidimensionnel.

- **Hypothèse de Prandtl**

La théorie de la couche limite développée par (Prandtl, 1933) étudie l'écoulement au voisinage de la paroi du canal dans un écoulement donné. Le concept est dû en grande partie à

sa théorie développé qui propose les bases de la mécanique des fluides telles que nous la connaissons aujourd'hui. Cette conception, connue sous le nom de Clauser, traite les profils de vitesses moyennes $(u(z), 0, 0)$ mesurées strictement dans la couche limite à faible épaisseur pour déterminer la rugosité équivalente du fond.

L'analyse de l'écoulement bidimensionnel dans lequel le frottement du fond est présenté par le cisaillement et les tensions totales peuvent s'écrire par la formule de la paroi qui varie, principalement, en fonction du frottement du lit, la vitesse moyenne d'écoulement et la profondeur d'eau. En effet, la contrainte de cisaillement et la viscosité cinématique du liquide sont des paramètres d'une grande importance dans la théorie de la loi de la paroi. La formulation de la loi de la paroi traduit les propriétés du champ de vitesses à proximité du fond qui s'appuie sur des considérations théoriques et des résultats expérimentaux.

L'ajustement de la distribution de la loi logarithmique des profils de vitesses dans l'interface du liquide libre et près de la paroi du fond rugueux à pression constante révèle la présence d'une région à faible épaisseur ($z/h \leq 0.2$) nommée « Couche Limite ». Cette loi relativement à un fond rugueux s'avère applicable pour un écoulement turbulent pleinement développé ($h = u$) qui s'exprime par :

$$u = f_i = (z, \tau, \nu, \dots) \quad (3.3)$$

Pour le régime pleinement turbulent, la distribution des vitesses longitudinales est déterminée par la loi logarithmique basée sur la théorie de la loi de la paroi selon (Von Karman, 1930) & (Prandtl, 1952). Cette formulation exprimée par la relation de la rugosité équivalente est utile pour le développement de la turbulence, fondée sur une approche statistique et expérimentale afin de pouvoir définir les conditions aux limites. À long terme, les caractéristiques de l'écoulement sont supposées indépendantes de la géométrie de la surface du fond d'où l'écoulement moyen à une distance suffisamment grande à partir des éléments rugueux devrait être représenté. En effet, le champ des vitesses est contrôlé d'ailleurs par les caractéristiques du lit comme la vitesse de frottement et la viscosité cinématique de l'eau.

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left[\frac{z}{k_0} \right] + C \quad (3.4)$$

Dans un écoulement uniforme, la distribution de vitesses sur un fond rugueux s'exprime d'après (Graf et al, 1993) par :

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left[\frac{z}{k_0} \right] + 8.5 \quad (3.5)$$

Après intégration de l'équation (3. 2), l'expression d'une vitesse moyenne obtenue est:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left[\frac{z}{k_0} \right] + 6.25 \quad (3.6)$$

Suivant la loi logarithmique, l'écoulement est influencé par les effets de la viscosité qui peuvent décrire une région interne donnée par :

$$u = A_1 \ln(z) + A_2 \quad (3.7)$$

$$B_r = \frac{A_1}{u_*} = \frac{A_2}{A_1 k} \quad (3.8)$$

Depuis des dizaines d'années de nombreux paramètres peuvent compromettre l'existence de la loi logarithmique qui est souvent au cœur de différentes études menées dans des conditions d'écoulement assez variées. Dans ce sens, le profil vertical des vitesses instantanées, en loi logarithmique, n'est pas observé par conséquent la formulation de Colebrook n'est plus applicable dans ce cas. En effet, la rugosité permet d'augmenter le frottement par rapport à la surface du fond étudié. L'analyse de la distribution des contraintes de frottement au fond du canal met en évidence les effets de la rugosité qui a, nécessairement, pu montrer les conséquences de la vitesse de frottement située à la surface rugueuse du fond déterminée expérimentalement.

$$u_* = A_1 k_0 \quad (3.9)$$

u_* : Vitesses de cisaillement, u : Vitesse moyenne sur la tranche d'eau, k_0 : Rugosité du fond du canal, R_H : Rayon hydraulique s'il s'agit d'une large rivière ($R_H \approx h$), κ : Constante universelle de Von Kàrmàn indépendante de la nature de la paroi ($\kappa = 0.4$)

$A_1 - A_2$: Constantes d'intégration qui sont déterminées par la méthode des moindres carrés à partir de l'équation de Prandtl selon (Graf et Altinakar, 1991) qui sont indépendantes du nombre de Reynolds et de l'écoulement turbulent, Z : Altitude verticale depuis la ligne qui

passé légèrement au-dessus des creux de la rugosité par rapport au sommet de la rugosité du fond jusqu'au point considéré. Cette valeur se mesure, dans la loi de Prandtl, depuis la ligne passant légèrement au-dessous des surfaces rugueuses, C : Constante d'intégration dépendant de l'état de la surface du fond. En tenant compte de la géométrie et des conditions aux limites, la constante prise pour un fond rugueux ($Br = 8.5$) et pour un fond lisse d'environ ($Bs = 3.5$).

En conclusion, la constante universelle de Von Kàrmàn est supposée être continue et indépendante du nombre de Reynold qui peut être un domaine de recherche très important dans la communauté de la turbulence.

III.4.1. Profils des vitesses instantanées

Les théories classiques des couches limites ont proposées une loi logarithmique pour les écoulements turbulents pleinement développés afin de présenter les incohérences dans les données expérimentales. Ces essais ont montré que l'épaisseur de cette couche limite $u(x)$ est difficile à déterminer dans la zone de la pleine turbulence à cause des fluctuations aléatoires de la surface libre et des aspérités du fond par rapport à la profondeur d'eau. Selon ces théories, les paramètres de la viscosité cinématique et la contrainte de cisaillement du fond interviennent dans la détermination des profils des vitesses longitudinales $(u(z), 0, 0)$. Ces profils des vitesses instantanées $(u(z))$ mesurés à proximité du déversoir latéral dans la section aval du 5ème transducteur sont donnés par les figures ci-dessous. En effet, la mesure de ces profils de vitesses longitudinales permet d'établir une corrélation entre les différentes caractéristiques hydrodynamiques en écoulement turbulent. Ces profils de vitesses sont, également, tracés dans le cas d'un écoulement turbulent suffisamment développé.

Des essais préliminaires ont été menés dans un canal rectangulaire en eau peu profonde chargée d'impuretés ($L = 6.00m$, $b = 0.25m$, $h = 0.200m$) afin de mesurer les profils de vitesses instantanées suivant toute la longueur du canal. En écoulement à surface libre, les vitesses longitudinales dans le canal sont enregistrées suivant la disposition des cinq sondes US et la rugosité équivalente du fond. Parallèlement, les profils des vitesses horizontales pour tous les points dans les écoulements permanents sont calculés par la méthode de Clauser et sont présentés par la (Figure 3.12).

La formulation de la loi logarithmique des composantes des vitesses dans la zone du fond du canal exige la détermination de la rugosité équivalente moyenne qui se traduit par le frottement de l'eau sur la surface du fond. En effet, l'écoulement est contrôlé par les

paramètres de la rugosité du lit, la vitesse de frottement et la viscosité cinématique de l'eau où les déformations proches du lit résultent de la mesure de la rugosité du fond et les réflexions des ondes acoustiques.

En conclusion, la mesure des profils des vitesses instantanées $(u(z), 0, 0)$ permet la détermination de la rugosité équivalente et la vitesse du frottement (généralement que l'on ne sait pas encore mesurer avec une grande précision).

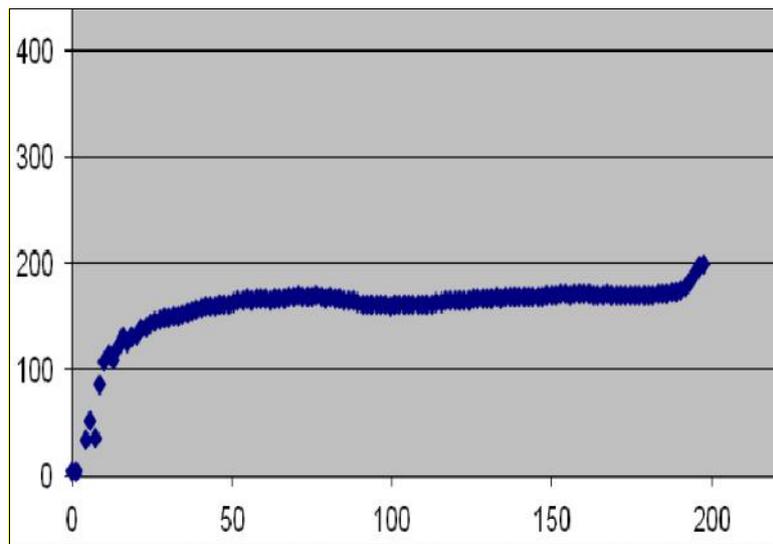


Figure 3.12 : Profil des vitesses longitudinales calculées par la loi de la paroi

$$L = 6.00m, b = 0.25m, Q = 7l / s, h = 0.200m, Re = 28000$$

III.5.2. Distribution des vitesses d'écoulement

Depuis plusieurs années, la loi logarithmique proposée par (Nikuradse, 1933) a été utilisée dans le but de déterminer les vitesses d'écoulement. Après une brève introduction, la synthèse de la formulation sous les conditions de l'écoulement à surface libre décrivant la distribution des vitesses dans les larges canaux ont été présentées. En effet, cette distribution dans une section droite a fait l'objet de nombreuses applications expérimentales dans la zone interne tant en canal étroit que large. Ces études pratiques concernant la distribution des vitesses le long du canal rectangulaire ont attirées l'intérêt de nombreux scientifiques.

En écoulement peu profond « Shallow flow », les vitesses moyennes ne dépendent que de densité, de la viscosité du liquide et la tension de la paroi de sorte que la vitesse verticale soit perpendiculairement la composante négligeable (Hug, 1975). En effet, la distribution des

vitesses résulte, essentiellement, de la position, de la taille, de la forme et de l'espacement des points de mesure dépendant de la fréquence de la sonde.

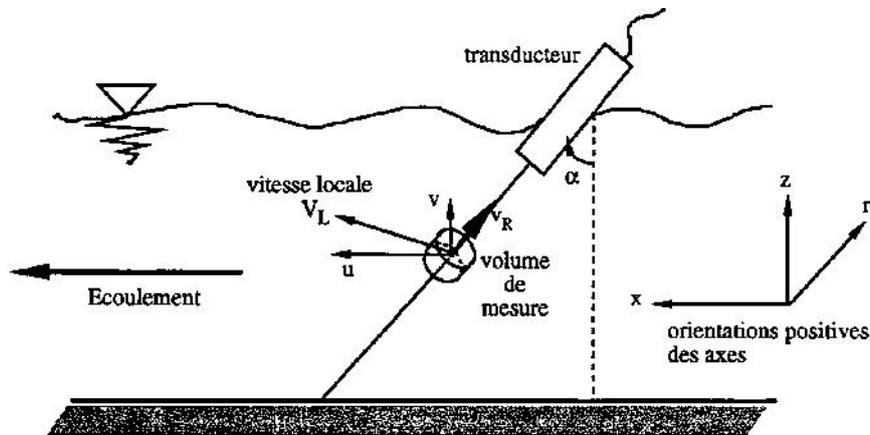


Figure 3.13 : Répartition des vitesses moyennes de l'écoulement à surface libre dans un canal peu profond

III.5.2.1. Altitudes

Dans la présente étude, les écoulements dans les réservoirs peu profonds sont d'un intérêt particulier. Cependant, les eaux peu profondes impliquent que l'échelle de la longueur dans la direction verticale (h) est nettement inférieure à la plus petite échelle de la longueur (L) dans le plan horizontal ($h/L \ll 1$), où l'écoulement peut être considéré comme bidimensionnel $2D$. Ces profondeurs ont été calculées dans l'axe central du canal, après avoir mesurées leurs projections par les sondes US suivant la relation ci-dessous :

$$h = L \cos \gamma \quad (3.11)$$

Par ailleurs, l'angle de projection Doppler (γ) a toujours été un paramètre important dans le calcul des altitudes et des vitesses puisqu'il apparaît dans toutes les équations notamment dans le calcul des vitesses horizontales (u) et des altitudes verticales (Z). Les niveaux dans l'écoulement ont été mesurés par une échelle à l'entrée et sortie du canal et vérifiées par limnimétrie dont la différence enregistrée entre les deux mesures était moins importante traduite par quelques [mm].

III.5.2.2. Vitesses longitudinales

Selon les théories classiques, en écoulement turbulent, la détermination des profils de vitesses et les vitesses horizontales dans les canaux peu profonds peuvent être exprimés par la loi logarithmique. Suivant cette loi, la formulation des vitesses en écoulement cisailé et à surface libre porte sur la mesure des vitesses longitudinales unidimensionnelles. Cette information devient nécessaire pour la détermination des profils verticaux des vitesses. Le long de l'axe longitudinal, la distribution des vitesses enregistrées par les sondes *US* ont permis de mesurer la projection des vitesses horizontales moyennées toute la profondeur d'eau (De Cesare, 1997). En écoulement uniforme, les profils des vitesses $u(z)$ peuvent être déterminés par la loi logarithmique par analyse de l'écho provenant du traceur ultrason. Si les conditions de géométrie sont fixées, données ou calculées, les composantes de vitesses moyennes longitudinales $(u, 0, 0)$ prennent la forme $u(x_0) = u_0(x)$

En coordonnées cartésiennes, le champ d'un écoulement incompressible (... = *cte*) est défini par la répartition des vitesses moyennes longitudinales $(u(x, z, t))$ sur une surface plane. Cependant, les composantes de vitesses sont calculées dans le sens du mouvement du volume de mesure en couvrant toute la profondeur d'eau (Rolland, 1994). Par contre, si les sondes *US* ne sont pas orientées dans le sens de l'écoulement, les vitesses longitudinales mesurées seront prises avec un signe négatif. Par ailleurs, la projection des vitesses longitudinales mesurées par l'instrument *UVP Monitor* à effet Doppler est donnée suivant l'axe horizontal (x) et l'angle de projection (γ). Les composantes de vitesses horizontales à travers la section sont calculées à partir de la vitesse radiale (V_r) et donnée par.

$$u = V_r \sin \gamma \quad (3. 10)$$

La pleine turbulence se situe, généralement, dans la région la plus éloignée du fond dans laquelle l'écoulement bidimensionnel commence à devenir perturbé à cause de la distribution aléatoire des fluctuations. Dans un écoulement turbulent pleinement développé ($h = u$) la répartition des vitesses longitudinales autour des fluctuations est conditionnée par les valeurs maximales souvent situées à la surface libre. Elles commencent ensuite à diminuer jusqu'à atteindre, approximativement, une vitesse nulle lorsqu'on s'approche de la surface du fond doté d'aspérités rugueuse (Figure 3.14a). En écoulement tridimensionnel, la vitesse maximale se manifeste un peu plus bas de la surface libre ($\delta < h$).

Cependant, le nombre de Reynolds ($R_e = 0.140 \times 0.200 / 10^{-6}$) indique que les effets tridimensionnels deviennent importants à proximité des parois (Figure 3.14b), où cette hypothèse a été confirmée par les mesures supplémentaires menées par (Camnasio et al, 2011). Lors du passage du jet unidirectionnel sur le fond rugueux, le niveau élevé de la turbulence documente le développement de la couche limite, ensuite, l'affichage et le calcul peuvent être modifiés pour tenir compte des vitesses positives ou négatives. Si la cible se déplace dans le sens longitudinal de la sonde, la vitesse est considérée comme positive. Elle devient, par contre, négative lorsque la cible se rapproche de la direction du transducteur qui fonctionne en mode émission-réception.

En conclusion, pour n'importe quel écoulement, les vitesses moyennes diminuent à partir de la surface libre jusqu'au fond pour atteindre une valeur approximativement nulle.

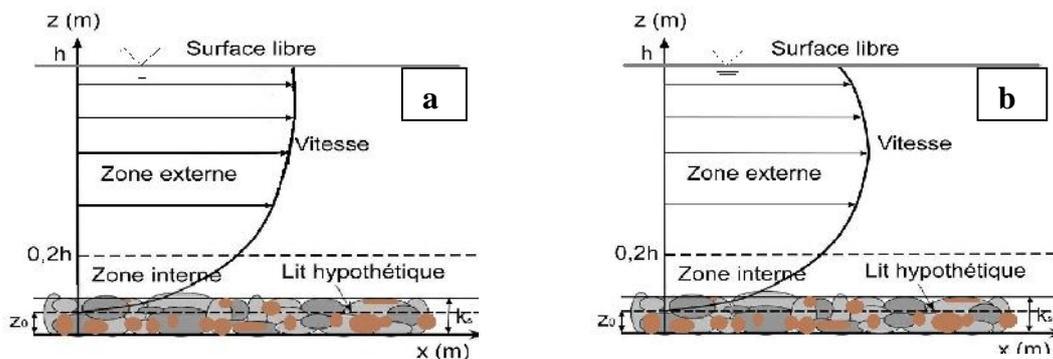


Figure 3. 14 : Profils de vitesses $u(z)$ en couche limite rugueuse en écoulement

a) bidimensionnel

b) tridimensionnel

III.5.2.3. Vitesses verticales

Dans les écoulements peu profonds, la composante de la vitesse verticale a été vérifiée pour demeurer négligeable comparée aux composantes dans le plan horizontal (Figure 3.15). Ce type d'écoulement est nominale à deux dimensions ($2D$) à travers la largeur du canal (Chiang et al, 1999). Vreugdenhil, (1994) confirme dans son article « Numerical methods for shallow flow » que l'écoulement présente une structure à trois dimensions dues à la friction du fond tout comme dans la couche limite. En effet, la tridimensionnalité au voisinage des parois montre que les effets en trois dimensions n'étaient pas évidents dans d'écoulement.

En outre la densité de stratification en raison de la différence de température provoque des variations dans la troisième direction. Par ailleurs, l'écoulement de direction privilégiée correspond à l'axe principal peut être ainsi considéré comme peu profond, principalement, bidimensionnel (Kantoush, 2008), (Dufresne et al, 2008) & (Dewals et al, 2010). Bien qu'il soit nominalelement bidimensionnel à travers 90% de la largeur du canal, lorsque ceux-ci peuvent être présents dans les résultats expérimentaux où nous pensons que les effets en trois dimensions ne fussent pas évidents dans le champ ($2D$). Néanmoins, l'effet de la surface libre est similaire à celui d'une paroi solide car elle amortit le mouvement vertical fluctuant en amplifiant les contraintes longitudinales au profit de la contrainte verticale. Dans ce genre d'écoulement, les mouvements verticaux sont étouffés aux temps longs où la dynamique est classiquement associée à un écoulement quasi-bidimensionnel. C.à.d. que si les gradients verticaux ne peuvent pas être négligés, la composante de vitesses verticales est négligeable au regard des composantes horizontales.

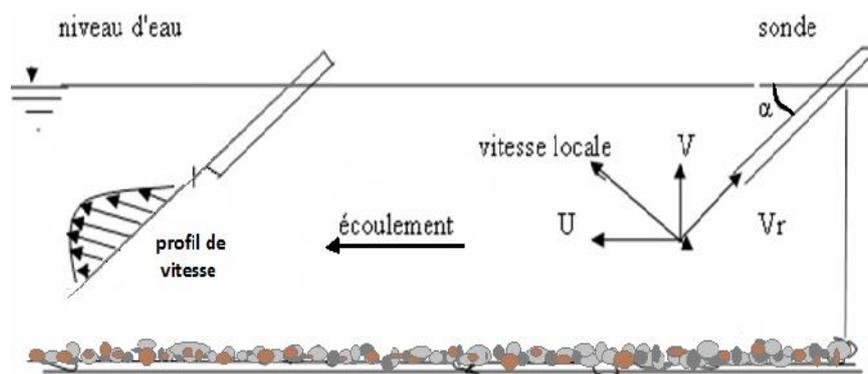


Figure 3.15 : Principe de mesure des sondes US dans le sens d'écoulement

sur fond rugueux $\overline{k_0} = 2.8mm$, $Q = 7l/s$, $L = 6m$, $b = 0.25m$

III.5.2.4. Vitesse de frottement

La théorie de la couche limite traite l'écoulement dans la zone interne où la vitesse de frottement présente un des paramètres les plus importants de la loi logarithmique. En opérant sur les données de cette zone, la vitesse de frottement (u_*) prend naissance entre les particules liquide et le fond du réservoir à partir des profils des vitesses instantanées mesurées. La détermination de cette vitesse, dans la zone interne, s'effectue par l'application de la méthode de régression linéaire des moindres carrés de la loi logarithmique.

Dans la zone interne, connue sous le nom de la loi de la paroi (Clauser, 1954), les tensions totales peuvent s'écrire en coordonnées adimensionnelles (Figure 3.16). En revanche, dans la région éloignée de la zone interne, l'écoulement n'est plus influencé par les forces de frottement où aucun effet visqueux n'est remarquable (Graf & Altinakar, 1991).

Sur fond rugueux ($\bar{k}_0 = 2.8mm$), l'écoulement retardé se heurte aux forces de frottement dues à la turbulence proches de la paroi interne qui pourra être réduit à l'intérieur du volume central de la vitesse du jet. La force de frottement devient prépondérante devant la viscosité du liquide conditionnant l'écoulement qui tend à ralentir le mouvement avec un gradient de vitesses plus élevé (du/dx). Ainsi, ceci est lié à l'intensité du frottement générée par le fond du canal qui n'est plus l'échelle caractéristique des vitesses d'écoulement. En se basant sur l'équilibre de la surface libre par rapport à la surface du fond, l'expression ci-dessus définie pour un écoulement uniforme est souvent utilisée par les hydrauliciens. Cependant, l'importance de la vitesse de frottement et la rugosité standard devaient être significative pour mettre cet effet en évidence.

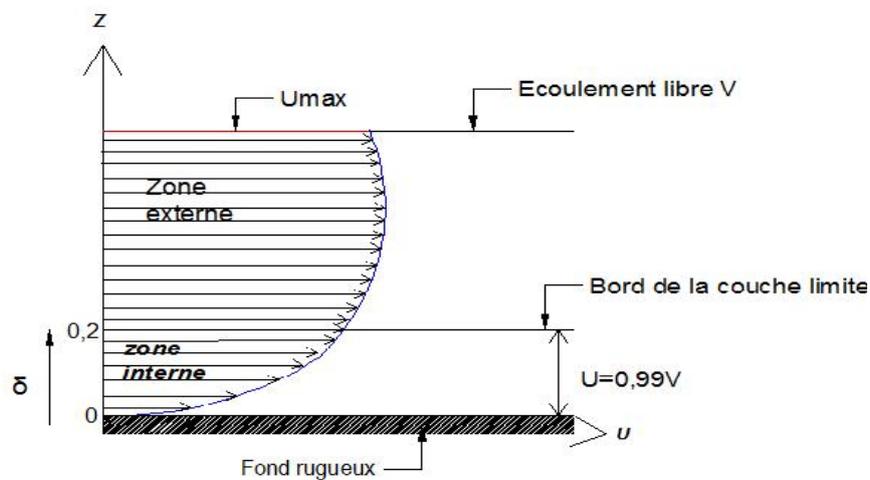


Figure 3.16 : Distribution des vitesses longitudinales dans la couche limite en écoulement permanent uniforme

- **Autres méthodes de calcul**

Lorsqu'on s'intéresse à l'écoulement turbulent à large échelle du type rivière, celle-ci fait intervenir, dans le calcul, la vitesse de frottement (u_*) et la pente de la surface libre. La

vitesse de frottement est calculée par la méthode du gradient d'énergie où la différence résulte dans la présence de l'écho générée par les problèmes de réflexion de rugosité du fond.

Pour un écoulement uniforme, la vitesse de frottement peut ainsi s'écrire d'après l'équation de Darcy-Weisbach, en se basant sur l'équilibre de la surface libre par rapport à la surface du fond du canal. Cette expression correspond également à une paramétrisation du frottement utilisée pour fermer certains systèmes d'équations très communément utilisés en Ingénierie comme Saint Venant avec la pente du fond (I) et la profondeur d'eau (h). Comme la majorité des rivières sont beaucoup plus larges que leurs hauteurs on peut faire l'approximation ($R_H \approx h$).

$$u_* = \sqrt{I g R_H} = \sqrt{J g h} = \sqrt{I g h} \quad (3.12)$$

$I = J$: Pente hydraulique = Pente du fond = Gradient d'énergie, R_H : Rayon hydraulique sensiblement égal à la profondeur d'eau ($R_H \approx h$), g : Accélération moyenne de la gravité.

En conclusion, cette méthode donne accès à une estimation globale de la vitesse de frottement, alors que les autres méthodes estiment sa valeur locale.

III.6. RUGOSITE EQUIVALENTE EXPERIMENTALE

Le fond d'une rivière ou bien d'un canal est souvent composé de surface rugueuse de toute taille, même dans une conduite, les parois comportent l'aspérité plus ou moins visible à l'œil nu. Cependant, un écoulement ne se fait jamais sur une paroi parfaitement lisse autant pour l'atmosphère que pour la rivière. Il s'agit de décrire au mieux statistiquement un écoulement turbulent sur un fond de rugosité homogène pour pouvoir comparer les résultats obtenus dans la littérature avec les méthodes employées. La rugosité n'est pas une question d'aspect de surface mais une propriété liée à la dynamique de l'écoulement qui traduit l'intensité du frottement généré à la paroi du fond du canal. Souvent, la rugosité est imposée par des conditions pratiques où elle varie en fonction de la vitesse moyenne d'écoulement, la profondeur d'eau et le frottement du fond de la couche interne. Comme nous l'avons déjà vu la formulation de la loi logarithmique des composantes de vitesses dans le fond exige la détermination d'une rugosité équivalente. L'évidence physique a montré que les régimes d'écoulement peuvent exister sous 3 types de régime connus par les hydrauliciens : soit en régime turbulent lisse, pleinement turbulent rugueux et transitoirement turbulent.

L'application de la méthode de régression linéaire des moindres carrées de la loi logarithmique permet de calculer la rugosité équivalente uniforme expérimentale (k_0) qui est donnée par les relations simplifiées de (Nikuradse, 1933) dans un domaine de validité de

$$60 \leq \frac{u_* k_0}{\nu} \leq 50.$$

❖ Sur fond lisse

Un écoulement turbulent est défini comme lisse si la couche visqueuse est donnée par $\frac{u_* k_0}{\nu} < 5$. Il est caractérisé par la distribution des vitesses qui ne dépend ni de la taille ni de

la nature de la rugosité de la surface du fond. Elle est donnée par la relation $k_0 = \frac{5\nu}{u_*}$ qui est

décrit par le nombre de Reynolds dans un domaine de validité : $R_{e*} = \frac{u_* k_0}{\nu} < 5$ Par ailleurs,

pour le déclenchement de l'acquisition dans un milieu considéré, le signal de l'écho est fourni à la sortie de la vélocimétrie pour permettre le découpage du faisceau en un ensemble de volume de mesure. Cependant, les considérations d'ordre acoustique empêchent la prise des données dans la zone proche des sondes, permettant la mesure des profils de vitesses instantanées avec une résolution spatiotemporelle suffisante. La détermination des vitesses est fonction de la fréquence des impulsions de répétition des ondes acoustiques f_{PRF} et de la fréquence de base d'émission de la sonde f_0 (Jaàfar et al, 2005). Ces sondes de dimensions ($40mm \times 5mm$) permettent de calculer les vitesses longitudinales dans la direction de la propagation de l'onde avec les paramètres (f_D , f_0 , C_s), (Figure 3.9).

La sonde *UVP* émette une impulsion ultrasons *US* qui se déplace le long de l'axe de mesure et puis passe à une phase d'écoute ou de réception. Par la suite, lorsque cette sonde envoie son signal de mesure (ondes de fréquence) sous l'effet d'un angle Doppler ($\alpha = 30^\circ$), une impulsion ultrason émise dans l'eau avec une fréquence ($f_0 = 4Mhz$) pour une durée d'enregistrement ($t' = 50ms$) et la vitesse instantanée est prise en un point.

❖ Sur fond rugueux

Par contre, la relation simplifiée de la rugosité dans un régime turbulent rugueux est donnée par l'expression $k_0 = \frac{70\epsilon}{u_*}$ pour un domaine de validité $R_{e*} = \frac{k_0 u_*}{\epsilon} > 70$. Dans ce cas, la distribution des vitesses ne dépend que des éléments rugueux du fond qui sont totalement exposés à la turbulence et non à la viscosité.

❖ Dans la zone de transition

Les résultats de Nikuradse permettent de faire la liaison de l'écoulement transitoirement turbulent $5 < \frac{k_0 u_*}{\epsilon} \leq 70$. Ce régime intermédiaire ne possède pas de formulation universelle dépendant à la fois de la viscosité et du type de la rugosité du fond. Cette relation prend la forme $\frac{5\epsilon}{u_*} \leq k_0 \leq \frac{70\epsilon}{u_*}$. L'effet global du fond rugueux sur l'écoulement bidimensionnel doit répondre aux conditions strictes d'un écoulement permanent uniforme (Mihoubi et al, 2007). En rappel dans la couche limite les différentes régions présentées sont:

- La sous couche visqueuse $\frac{z u_*}{\epsilon} < 5$
- La zone de transition $5 < \frac{z u_*}{\epsilon} < 70$
- Couche turbulent $70 < \frac{z u_*}{\epsilon} < 200$
- La zone extérieure (turbulente) $\frac{z u_*}{\epsilon} > 200$

Les profils de vitesses et les fluctuations externes deviennent démonstratifs dans la partie logarithmique, impliquant de fortes variations de certains paramètres qui entraînent la dispersion du calcul de la rugosité. L'approche statistique de l'écoulement turbulent et les équations de base sont obtenus en un point par la moyenne des vitesses. Par contre, en distribution normale, les mesures expérimentales se regroupent systématiquement autour d'une valeur moyenne représentée par les relations mentionnées ci-dessous :

- **Moyenne arithmétique** $\overline{k_0}$

Au laboratoire, la méthode de détermination de la rugosité équivalente par analyse des profils de vitesses ne permet pas d'arriver à une valeur correcte pour les raisons suivantes : Les fluctuations des vitesses dans la partie logarithmique des profils de vitesses sont importantes, ce qui implique certaines variations sur le calcul des paramètres (A_1 et A_2) de la courbe de régression logarithmique. En effet, l'analyse statistique d'un écoulement turbulent s'effectue sur la base de la moyenne de l'ensemble d'une fonction aléatoire, définie comme la moyenne arithmétique de l'échantillon. En conséquence, certaines propriétés statistiques de la fonction aléatoire considérée sont invariantes par translation spatiale ou temporelle. Le type d'estimation devient équivalent où les moyennes statistiques introduits seront utilisées dans le calcul de la moyenne arithmétique de la rugosité équivalente ($\overline{k_0}$) des cinq transducteurs ultrasons étudiés.

La moyenne arithmétique d'un nombre de répétitions contenant 128 points de mesure de chaque profil de vitesses unidimensionnel (1D) dans l'espace de 8 blocs (cycles) enregistré par l'instrument *UVP Monitor* sur une profondeur d'eau donnée au-dessus d'un fond rugueux initialement lisse est donnée statistiquement par la relation :

$$\overline{k_0} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i \quad (3.13)$$

k_i : Série des rugosités moyennes correspondantes, $\overline{k_0}$: Rugosité équivalente arithmétique,

N : Nombre de transducteurs.

- **Déviatiion standard** \dagger_x

L'ensemble des courbes calculées par régression linéaire de la loi logarithmique possède des coefficients de corrélation donnée par la relation sous une forme corrigée pour une rugosité variable (loi de probabilité est adéquate si le coefficient de corrélation est proche de l'unité ($R^2 \leq 0.99$)). En statistique mathématique, la déviatiion standard permet d'évaluer la dispersion d'une série de mesures autour d'une valeur moyenne nommée écart type (\dagger_x). En physique expérimentale, l'écart-type autour de la valeur inconnue est calculée par la moyenne des valeurs mesurées à forte dispersion qui donne l'illusion d'un bon ajustement, présentée

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (k_i - \bar{k}_0)^2} \quad (3.14)$$

Pour une profondeur variable, la rugosité arithmétique moyenne équivalente \bar{k}_0 et la déviation standard (l'écart-type) \dagger_x des trois surfaces rugueuses mentionnées (A, B & C) ainsi que la surface lisse ont été calculées sur des segments verticaux et illustrées dans (Tableau 3.3) et (Tableau 3.4).

La dispersion des données augmente près de la surface libre et du fond. Par ailleurs, sur un fond rugueux une légère différence a été constatée dans la déviation standard ($\dagger_x = 0.005\text{mm}$) et ($\dagger_x = 0.007\text{mm}$) où l'écart-type sur la colonne d'eau est inférieur à 0.2.

En conclusion, la couche limite turbulente sur des surfaces rugueuses possède un intérêt considérable dans l'ingénierie en raison de l'augmentation de la chaleur de masse associée, généralement, à une augmentation du transport de l'élan.

Tableau 3.3 : Rugosité moyenne \bar{k}_0 et déviation standard \dagger_x

$$h = 0.200\text{m}, l = 6\text{m}, b = 0.25\text{m}, Q = 7\text{l/s}$$

Rugosité	\bar{k}_0 [mm]	\dagger_x [mm]
Surface A	2.8	0.050
Surface B	2.7	0.096
Surface C	2.8	0.18
Fond lisse	0.1	0.007

Tableau 3.4 : Rugosité moyenne $\overline{k_0}$ et déviation standard \dagger_x

$$h = 0.100m, Q = 7l/s, l = 6m, b = 0.25m$$

Surface rugueuse	$\overline{k_0}$ moyenne [mm]	\dagger_x [mm]
Surface A	2.8	0.050
Surface B	2.7	0.130
Surface C	2.78	0.199
Fond lisse PVC	0.1	0.005

III.6. RESULTATS

L'interprétation des résultats d'essais apporte, dans un premier temps, la preuve du bon fonctionnement de la méthode (UVP) pour mesurer les profils de vitesses issus de la moyenne temporelle à fond lisse et rugueux. Dans la section de mesure, l'amortissement de l'énergie cinétique est contrôlé par la stabilité de l'écoulement à l'extrémité amont et aval du canal. En effet, tout au long de ce travail, l'écoulement à surface libre est unidimensionnel quand les vitesses verticales sont négligeables où l'unique dimension est choisie selon la ligne de courant médiane. Après avoir donné les étapes de mesure, les explications du principe de fonctionnement de la technique à effet Doppler pulsé, d'enregistrement et du traitement, des profils de vitesses étudiés en écoulement turbulent pleinement développé dans le canal rectangulaire à fond horizontal sont montrés. Au préalable pour l'application de la méthode de régression linéaire des moindres carrés, les interactions ont été mentionnées avec les caractéristiques de la surface rugueuse. Sur l'ensemble des quatre surfaces de rugosités du fond étudiées, dans l'actuelle recherche, deux seulement ont été maintenues où la première surface rugueuse est notée (A) et celle du fond lisse (PVC).

A présent, les résultats obtenus ont été systématiquement analysés via les mesures effectuées en écoulement peu profond sur fond lisse et rugueux. Cependant, ils ont été interprétés, en termes de loi de la paroi, en mettant en évidence la bonne concordance des profils de vitesses longitudinales quasiment homogènes.

A l'entrée du canal, le gradient élevé des vitesses se développe au voisinage du fond qui est associé à des contraintes de frottement où il s'ensuit de la formation d'une zone à proximité immédiate de la surface de la paroi solide appelée couche limite. Par ailleurs, ces profils révèlent la présence d'une zone interne influencée par les effets du lit qui augmente l'effort de cisaillement et l'énergie cinétique de la turbulence. Ces écoulements apparaissent lorsque la source d'énergie cinétique qui met le fluide en mouvement turbulent est relativement intense devant les forces de viscosité que le fluide oppose pour se déplacer. En effet, l'expérience a montré qu'en régime turbulent, l'énergie dissipée est beaucoup plus considérable que celle qui résulte de la viscosité par application de la formule de Newton.

Dans l'écoulement turbulent, les profils des vitesses sont mesurés sur un fond lisse à différentes positions dans un premier temps. Tandis que l'étude menée sur une surface de rugosité à fond homogène a fait l'objet de la seconde partie où son effet occasionne une augmentation du frottement dans le fond du canal. Ce point de vue est conforme à l'hypothèse de la similitude de (Townsend, 1976), qui stipule que dans la région de l'écoulement turbulent, en dehors de la couche rugueuse est indépendante du nombre de Reynolds suffisamment élevé. Néanmoins, les fluctuations de vitesse par fractions, permettent une certaine incertitude. Implicitement, cette méthode de calcul est le fait que tous les écoulements sur les surfaces du fond produisent la même rugosité équivalente est donc le même changement dans les profils de vitesse logarithmique, devraient avoir des propriétés identiques.

III.6.1. Effet du fond lisse sur le champ d'écoulement

Les résultats d'essais réalisés en écoulement à surface libre en eau peu profonde sur un fond lisse s'appuient, essentiellement, sur les différentes grandeurs hydrodynamiques et géométriques ont permis de montrer les profils des vitesses longitudinales $(u(z), 0, 0)$. Par ailleurs sous l'influence de la viscosité cinématique de l'eau, une quantité de l'énergie cinétique est convertie en chaleur à cause des gradients des vitesses accompagnant les fluctuations de la vitesse instantanée. Le gradient de l'énergie dérive, en effet, de l'équation

de la quantité de mouvement où la méthode répond à des conditions strictes qui ne sont valables que pour des écoulements permanents et uniformes Graf et Altinakar (1993). Ces courbes de vitesses sont caractérisées par la création de l'énergie cinétique ($u^2/2g$) qui se traduit par un comportement dépendant de la surface du fond du canal. Toutefois, le profil logarithmique a été calé par régression linéaire sur l'ensemble du nuage de points où il reproduit correctement le profil expérimental moyen.

Sur le fond lisse ($\overline{k_0} = 0.1mm$), le débit moyen d'alimentation ($Q = 7l/s$) est maintenu constant correspondant aux vitesses théoriques moyennes calculées respectivement ci-dessous, que les profils des vitesses instantanées sont déterminés. Si la profondeur d'eau est ($h = 0.200m$), la vitesse moyenne d'écoulement calculée ($u = 0.140m/s$) est quasiment parallèle qui se confond avec la vitesse du fluide dans la faible épaisseur ($u(x)$) de la couche limite (Figure 3.17). Par contre, si la profondeur est réduite à la moitié ($h = 0.100m$) pour le même débit d'alimentation ($Q = 7l/s$) cela pourra entraîner une diminution dans la vitesse moyenne ($u = 0.280m/s$). Cependant les études expérimentales ont pour une origine de coordonnées ($h = 0m$) pour ($u = 0.332m/s$), lorsque les vitesses montrent que la turbulence est quasiment isotrope (Figure 3.18). Par ailleurs, ce jet est considéré comme unidirectionnel car dans le sens de l'écoulement les vitesses sont identiques en tous points.

En conclusion, la forme des profils des vitesses possède un important effet sur la stabilité de la turbulence de l'écoulement.

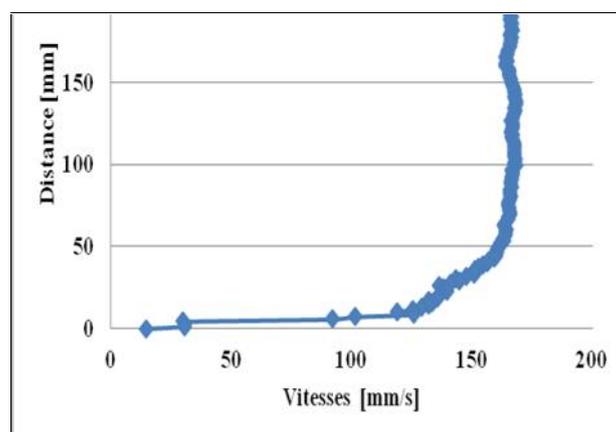


Figure 3.17 : Profil de vitesses longitudinales ($u(z), 0, 0$) sur fond lisse

$$\overline{k_0} = 0.1mm, Q = 7l/s, h = 0.200m, u = 0.140m/s, R_e = 28000, F_r = 0.1$$

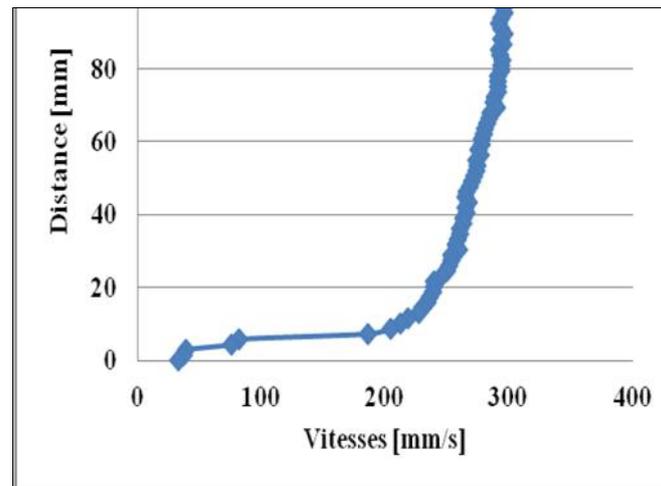


Figure 3.18 : Profil de vitesses longitudinales ($u(z), 0, 0$) sur fond lisse

$$\overline{k_0} = 0.1\text{mm}, Q = 7\text{l/s}, h = 0.100\text{m}, u = 0.280\text{m/s}, R_e = 27940, F_r = 0.283$$

III.6.2. Effet du fond rugueux sur le champ d'écoulement

Dans le but d'étudier l'effet de la rugosité équivalente du fond du canal peu profond sur le champ d'écoulement, un travail de laboratoire a été mené. Pour mettre en évidence ce phénomène, il apparait clairement que les paramètres soient bien fixés par l'introduction d'une surface rugueuse au fond du canal rectangulaire qui modifie la nature de l'écoulement et ralentit, sensiblement, la distribution des vitesses.

Si l'écoulement turbulent est fortement influencé par la présence de la rugosité du fond, le frottement jouera un rôle important dans le changement de l'intensité des vitesses pour devenir prépondérant devant la viscosité du liquide. Par contre si le cisaillement turbulent domine, l'effet visqueux supprime toute évolution vers la condition de la turbulence et la vitesse de frottement devient invariable à cause de l'homogénéité de la rugosité du fond. Néanmoins au-dessus du fond rugueux, l'écoulement est inhomogène car la dispersion spatiale rend l'évaluation de la vitesse de frottement peu délicat. Toutefois, dans les écoulements turbulents la question de dispersion spatiale engendrée par la présence des surfaces rugueuses a été abordée par (Jiménez, 2004) qui avait tendance à invalider la loi logarithmique des profils des vitesses. Cette loi est, fortement, perturbée par la présence de la rugosité mise en évidence où une légère dispersion est observée dans la partie supérieure de l'écoulement pour les quantités liées à la mesure des profils de vitesses. 6

Dans la littérature, la cohérence de ces profils théoriques donnés présente des courbes relativement plus aplatis ce qui explique l'allure de la parabole qui ressemble au régime laminaire (Figure 3.19) & (Figure 3.20).

Si le cisaillement visqueux domine, la vitesse d'écoulement dans le canal deviendra, approximativement, nulle ($u \approx 0$) dès que nous nous approchons du lit affecté par les effets rugueux. Tandis que l'augmentation de la contrainte visqueuse accentue, par cisaillement, la dissipation de l'énergie cinétique qui dépend, fortement, de la nature de la rugosité du fond. Si les forces visqueuses prédominent dans les canaux à forte turbulence, la mince sous-couche se produit à côté de la frontière solide car ces particules fluides en contact avec la paroi solide possèdent une faible vitesse de tendance presque nulle comme il a été déjà mentionné par Labiod (2004) et illustré dans les Figures. Cette analyse nécessite une meilleure connaissance des vitesses afin d'accéder à des informations plus fiables pour déterminer, convenablement, la vitesse de frottement dans la région du fond. Les résultats de la présente étude confirment les hypothèses des écoulements turbulents établis par Graf et al (1991). En effet, la diminution de la vitesse de frottement s'accompagne de la réduction de l'épaisseur de la couche limite qui se traduit par l'augmentation de la distance nécessaire à la couche limite afin d'atteindre la surface libre.

En conclusion, si l'écoulement est à surface libre, nous notons que la couche limite au sein de laquelle la vitesse varie en fonction de l'éloignement de la paroi du fond est importante lorsque les gradients de vitesses deviennent très élevés.

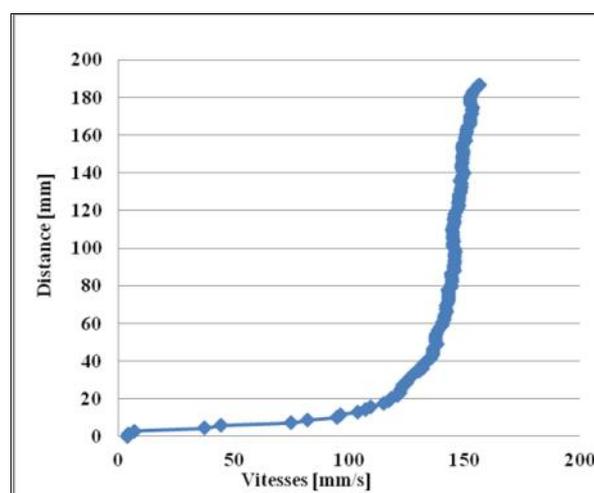


Figure 3.19 : Profil de vitesses longitudinales ($u(z), 0, 0$) sur fond rugueux
 $\bar{k}_0 = 2.8\text{mm}$, $Q = 7\text{l/s}$, $h = 0.200\text{m}$, $u = 0.140\text{m/s}$, $R_e = 28000$, $F_r = 0.1$

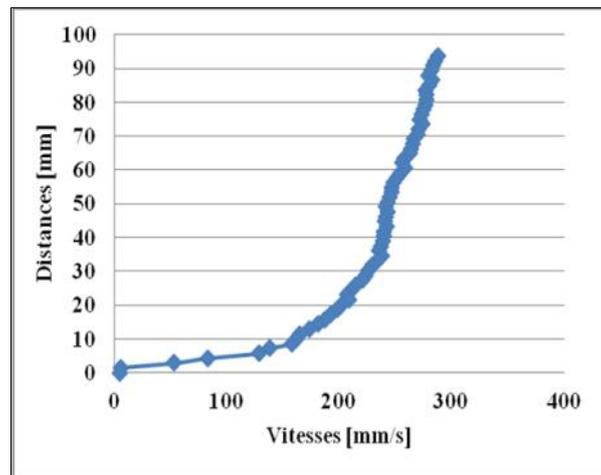


Figure 3.20 : Profil des vitesses longitudinales $(u(z), 0, 0)$ sur fond rugueux
 $\bar{k}_0 = 2.8\text{mm}$, $Q = 7\text{l/s}$, $h = 0.100\text{m}$, $u = 0.280\text{m/s}$, $Re = 27940$, $Fr = 0.283$

III.6.3. Effet de l'écoulement au voisinage du fond

Un liquide s'écoulant à l'intérieur d'un canal aussi bien étroit que large développe une couche limite sous l'effet de la viscosité du liquide et l'introduction du nombre de Reynolds (Krogstad et al, 1999), (Akinlade, 2005) & (Labiod, 2005). Dans la section de mesure, l'expérience a montré que la répartition des vitesses d'un courant liquide possède deux cas fréquents.

Ces deux cas comprennent une région externe qui n'a aucun effet sur l'écoulement, tandis que la zone interne exerce une influence énergétique sur la vitesse d'écoulement située proche du fond où l'effet de la viscosité ne devient plus négligeable. Dans la zone proche de l'écoulement du fond, l'effet de la rugosité est significatif lorsque les forces de viscosité sont négligeables par rapport aux forces d'inertie et de la turbulence (Carlier, 1980). Ce phénomène de turbulence devient plus facile à expliquer si la forme et la taille des aspérités possèdent des dimensions constantes par rapport à la profondeur d'eau. Cela permet de montrer que la zone interne est, également, l'endroit de la production de l'écoulement cisailé.

Par ailleurs, ces écoulements sont caractérisés par la création d'une énergie cinétique qui dépend de la rugosité du fond et de la loi logarithmique comme il a été expliqué précédemment. Dans ce cas, le gradient de la pression impose à la couche limite une hauteur maximale qui n'est rien d'autre que la profondeur de l'eau ($h = u$).

Comme nous pouvons le remarquer sur les figures, la contrainte de la viscosité est importante avec une pente de profil des vitesses très grande au voisinage du fond du canal, (Carlier, 1980). Alors que, le nombre de Froude ($F_r = 0.1$) semble avoir aussi un effet sur la turbulence de l'écoulement, plus particulièrement, dans la couche externe. La répartition des vitesses moyennes avec une bonne approximation, dans cette zone devient non affectée par le fond rugueux où la validité de la loi logarithmique se pose. Par ailleurs, il n'existe aucun système adéquat qui décrit l'effet de la rugosité sur le nombre de Reynolds dans la zone limite. (Krogstad & Antonia 1999) ont observé que les tensions turbulentes dans le domaine de la zone externe situé dans la couche limite sont sensiblement affectées par la rugosité du fond. Tandis que dans la région externe, la composante de vitesses devrait être peu affectée par le fond rugueux. Ces résultats expérimentaux s'opposent à l'idée que la couche externe est insensible à la rugosité du fond et ont conduit à une incertitude considérable concernant les effets rugueux sur la couche limite (Lee et al, 2007).

Dans le voisinage de la paroi du fond qui constitue la couche limite d'épaisseur (δ) la vitesse varie rapidement d'une valeur nulle au contact immédiat du fond du canal à une valeur finie (u). En effet, la répartition de vitesses est conditionnée par une maximale située souvent à la surface libre ($u = u_{\max}$) où le jet libre présente (90%) de la valeur correspondant à pour une profondeur d'eau (80%) de la profondeur. Ces vitesses commencent à diminuer pour atteindre, approximativement, la valeur zéro au fond du canal (Figure 3.21).

Par ailleurs, la couche limite située à la faible profondeur d'eau présente un fort gradient de vitesses où son calcul est une opération, en général, très compliquée dans les écoulements (Carlier, 1980). Dès lors, le régime d'écoulement pleinement développé ($h \equiv \delta$) ne cesse d'accentuer la turbulence et l'intensité des vitesses moyennes, montrant que plus la vitesse n'est grande, plus la couche limite ne tarde à s'établir (Clorens, 2010). La production d'énergie cinétique provenant des fluctuations verticales est transférée aux fluctuations longitudinales (Lee & Sung, 2007) en montrant leur augmentation près de la surface libre de sorte que les profils paraboliques sont mis comme pour une zone externe. Alors que dans la sous couche rugueuse est caractérisée par une forte dispersion, au fur et à mesure, que l'on se rapproche du lit du canal qui devient de moins en moins importante. Cela indique que les profils de vitesses de forme paraboliques sont relativement cohérents avec ceux de la théorie. En présentant des courbes un peu plus aplaties, s'expliquant par l'effet rugueux du fond qui tend à stabiliser l'écoulement pour devenir homogène.

L'augmentation de la rugosité provoque le ralentissement des vitesses près du fond où cet effet sur l'interaction de l'écoulement entre la région interne et externe ne sera pas clairement défini. Par ailleurs les relations utilisées dans les zones interne et externe ont été présentés pour rendre cette turbulence plus compréhensive sur fond lisse et rugueux.

En conclusion, dans la turbulence la dynamique de la couche limite au-dessus d'un fond rugueux continu à être un domaine de recherche très important et plus complexe.

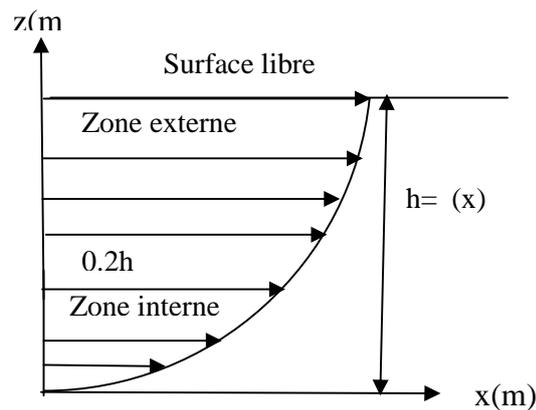


Figure 3.21 : Schéma illustrant les régions de la couche limite

III.6.4. Etude comparative des profils de vitesses

L'influence de la rugosité du fond sur la distribution des vitesses moyennes longitudinales a été analysée dans la présente étude, pour deux régimes d'écoulements turbulents lisse et rugueux. L'introduction des éléments rugueux au-dessus d'un lit affectent la contrainte dans la zone interne que celle de la zone externe. Cependant, l'existence des deux zones différentes affecte directement la résistance à l'écoulement du fluide. Par ailleurs, l'effet rugueux sur l'allure du champ de vitesses reste confiné uniquement à la région interne proche du fond du canal. Par contre, la vitesse dans la couche externe est peu affectée comme il a été confirmé par les résultats illustrés dans (Figure 3.22) et (Figure 3.23).

Après que l'écoulement a atteint son état d'équilibre et sa stabilité en amont et en aval du canal, les essais ont été obtenus par les mesures *UVP*. Suivant l'axe des abscisses (x) ces profils des vitesses moyennes ont permis de mettre en évidence l'écoulement longitudinal sur fond rugueux initialement lisse. Pour toutes les données de la couche limite, nous avons été conduits à reporter les résultats expérimentaux menés par les mesures préliminaires sur fond lisse et rugueux pour une profondeur variable.

Tout d'abord il s'agit d'un effet local où les courbes des vitesses ne se dissocient que pour une distance du fond ($Z/h = 0.2$) alors que pour les autres zones notamment la zone externe de la couche limite possède moins d'influence sur les courbes. Lorsque l'écoulement franchit les irrégularités de la zone interne, la forme de ces pointes exerce un effet important sur la résistance de l'écoulement où il entraîne un ralentissement des vitesses en faisant varier la perte d'énergie (Kantoush, 2008). Dans ce cas l'évidence de la couche limite dépend fortement de la surface du fond sur lequel ces pointes d'aspérités se comportent comme des divinateurs de la turbulence. Les profils des vitesses moyennes dans cette étude montrent une bonne cohérence avec les profils des vitesses théoriques où les plus importants écarts sont observés dans les deux profondeurs. Cependant, la distribution de vitesses n'est pas visiblement différente qui se distingue également par rapport à la paroi du fond lisse et rugueuse (Krogstad et al, 1999).

Les deux courbes prennent l'allure d'une forme parabolique comme dans le régime laminaire où ils sont plus écrasés avec une distribution de vitesses plus précise (Roland, 1994). Les résultats des caractéristiques des profils de vitesses longitudinales ($u(z), 0, 0$) situés dans la couche limite ont été analysés pour être comparés à ceux de la littérature. Pour les surfaces du fond rugueux, la valeur de la force de frottement est plus importante que près du fond lisse ce qui signifie que l'épaisseur de la couche limite est plus petite. Si la valeur de la vitesse de frottement (u_*) diminue, l'épaisseur de la couche limite diminue aussi et cette diminution se traduit forcément par une augmentation de la distance nécessaire à la couche limite pour atteindre la surface libre. Par ailleurs, les profils de vitesses moyennes sont légèrement asymétriques et la pression au sommet des rugosités devient plus importante qu'au niveau du fond. Ces observations ne montrent que les profils des vitesses quantitativement précis sur toute la section de mesure alors que la vitesse de cisaillement est prépondérante devant la viscosité du liquide. Dans les canaux rectangulaires peu profonds, la forme des profils de vitesses possède un effet important sur la stabilité des écoulements.

L'allure des profils de vitesses pour les profondeurs dans lesquels la vitesse moyenne se confond avec la vitesse du fluide dans la zone interne à faible épaisseur ($\delta(x)$) est montrée. Si l'écoulement est pleinement développé, dans cette zone, les profils instantanés des vitesses sont très proches. Dès lors, le régime d'écoulement contenant de l'énergie, devient indépendant de la viscosité du liquide dans lequel le gradient de la vitesse longitudinale (du/dz) est plus élevé au-dessus du fond rugueux que lisse. La redistribution de l'énergie

cinétique ($u^2 / 2g$) est sensiblement affectée par la rugosité du fond loin de la couche externe où la perte d'énergie produite a été transportée hors paroi (Lee et al, 2008).

Les résultats ont suggéré, également, que l'effet de la rugosité du fond sur le champ de la turbulence dépend dans une certaine mesure, des caractéristiques spécifiques des éléments rugueux. Si la profondeur est réduite ($h = 0.100m$) pour un débit d'alimentation constant ($Q = 7l/s$), les profils des vitesses longitudinales sur fond lisse et rugueux sont présentés. Nous observons pour les deux écoulements que les profils sont quasi-identiques où un écart entre les deux profils du même régime a été distingué. La forme des éléments rugueux d'après (Townsend, 1976), est prise de telle sorte que l'écoulement autour d'eux soit presque instable de ce fait, puisse être perturbé violemment par les petites fluctuations provenant des grandes échelles d'écoulement. Cependant, la profondeur sur laquelle l'écoulement est perturbé, devient dépendante de la hauteur du déplacement et l'épaisseur des surfaces de rugosités. Pour la vitesse longitudinale, l'écart est lié aux effets de la gravité relié à la faible pente du dispositif expérimental et à l'erreur de la convergence temporelle.

La comparaison des deux résultats de mesure sur fond lisse ($\overline{k_0} = 0.1mm$) et rugueux ($\overline{k_0} = 2.8mm$) présente deux profils de vitesses longitudinales pour deux nombres de Reynolds pleinement développés ($27940 \leq R_e \leq 28000$) dans le canal d'entrée. Cependant, ces résultats mettent bien en évidence l'évolution de l'écoulement turbulent bidimensionnel et montre le rôle que peut jouer les interactions créées par les effets du frottement du fond. En aboutissement, la détermination du cisaillement au fond du volume de contrôle entoure la surface rugueuse située dans la couche limite à faible profondeur. La viscosité en amont du fond du canal est supposé négligeable, où l'écoulement va devenir égal à celle de l'aval à cause de la symétrie géométrique de l'entrée et de la sortie. Ces hypothèses faudrait vérifiées le fait de supposer le cisaillement au sommet de la rugosité non négligeable puisqu'elle devient plus importante sur un fond rugueux que lisse.

En conclusion, l'augmentation de la rugosité provoque un ralentissement des vitesses près du fond où son effet sur l'interaction de l'écoulement entre la région interne et externe ne sera pas clairement définit.

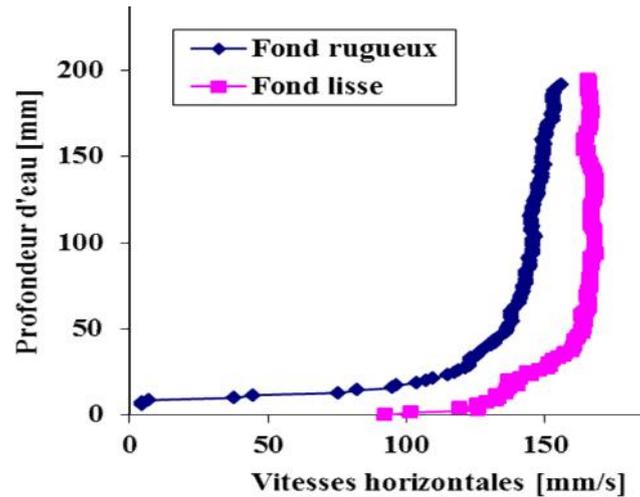


Figure 3.22 : Profils de vitesses longitudinales $(u(z), 0, 0)$ sur deux fonds différents

$$\bar{k}_0 = 0.1\text{mm}, \bar{k}_0 = 2.8\text{mm}, h = 0.200\text{m}, Q = 7\text{l/s}, F_r = 0.1, R_e = 28000$$

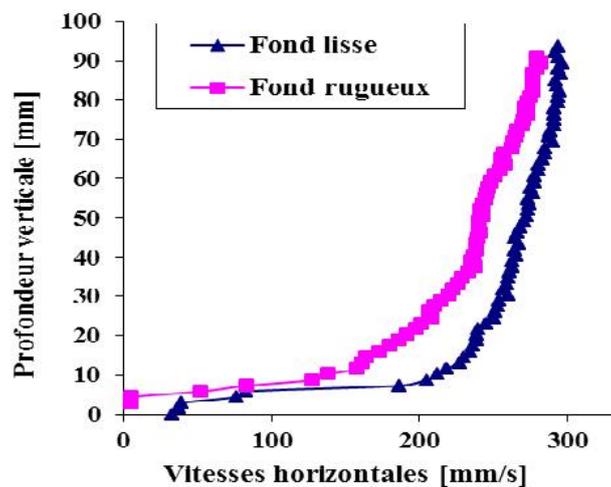


Figure 3.23 : Deux profils de vitesses longitudinales $(u(z), 0, 0)$ sur deux fonds différents

$$\bar{k}_0 = 0.1\text{mm}, \bar{k}_0 = 2.8\text{mm}, h = 0.100\text{m}, Q = 7\text{l/s}, F_r = 0.283, R_e = 27940$$

CONCLUSION

Dans ce travail, les différentes étapes de mesure, le principe de fonctionnement ainsi que le traitement de la méthode de la vélocimétrie ultrason à effet Doppler pulsée UVP menée dans un canal rectiligne en écoulement turbulent peu profond ont été étudiés par cinq sondes ultrasons.

Les résultats d'essais mettent bien en évidence l'évolution de l'écoulement horizontal montrant que sur un fond lisse la rugosité diminue le niveau d'anisotropie par rapport à la vitesse d'écoulement. Ces présents résultats ont suggéré que l'influence de la rugosité sur le champ de l'écoulement dépend des caractéristiques spécifiques des éléments rugueux du lit et du nombre de Reynolds. En effet, la loi logarithmique des profils de vitesses semble donner des résultats encourageants même si des améliorations devront être apportées.

Le choix de cette loi est appropriée pour décrire le profil des vitesses moyennes dans une région qui continue d'être un sujet controversé au sein de la turbulence. Par ailleurs, à partir des données expérimentales la loi logarithmique couramment utilisée, a été adaptée aux diverses zones pour ajuster les profils des vitesses dans la couche limite. En effet, la vitesse de frottement et la rugosité équivalente du fond peuvent être eux même très dispersés, c'est pour cette raison que nous avons pris les profils des vitesses présentant une bonne répartition logarithmique près de la surface du fond afin de calculer la moyenne arithmétique.

Chapitre IV

MESURES A L'AIDE DE LA VELOCIMETRIE PAR IMAGERIE DE PARTICULES A LARGE ECHELLE (LSPIV)

INTRODUCTION

Les écoulements à surface libre naturels ou artificiels sont sujets à des perturbations continues qui peuvent être, fréquemment, rencontrés dans la nature où les zones côtières, les fleuves, les estuaires, et les réservoirs se rangent dans cette catégorie. Cependant la physique du phénomène de la turbulence est en plein développement grâce à la généralisation de l'instrumentation, traditionnellement, utilisée dans les mesures notamment le moulinet, le courantomètre électromagnétique ou acoustique. Ils sont limités et ne répondaient guère aux exigences demandées pour la mesure des vitesses d'écoulement. Au cours de cette dernière décennie, la turbulence a suscité une attention considérable, en raison de sa complexité et son importance dans l'Ingénierie et les études hydrodynamiques. En dépit du défi produit dans la turbulence, la stabilité de la recirculation des écoulements a fait l'objet de nombreuses applications expérimentales et numériques où ils dépendent fortement des conditions aux limites qui peuvent être différentes d'un cas à l'autre. Par ailleurs, les scientifiques ont des nouveaux besoins en termes de mesure qui ne peuvent être acquis que par le développement de nouvelles technologies de mesures.

La technique de la Vélocimétrie par Imagerie de Particules à Large Echelle (*LSPIV*) est la méthode de mesure capable de fournir une carte instantanée du champ de vitesses en écoulement turbulent. Cette méthode de visualisation peut fournir des vitesses de surface mesurées en quelques millisecondes (une mesure instantanée) par les vecteurs transformés en champs d'écoulement prêts à l'interprétation (Holland et al, 2001). En effet, elle a été adoptée dans plusieurs domaines de l'Ingénierie et les études de l'Hydraulique fluviale. Les scientifiques ont montrés son efficacité dans la mesure des vitesses, par analyse de séquences d'images zénithales. Toutefois, la méthode *LSPIV* restitue une trajectoire de l'écoulement dans l'espace de l'orientation de la particule fluide en décrivant l'évolution de la recirculation montrant que les grands tourbillons sont responsables de la plupart du transport dynamique. La détermination du champ des vitesses de surface sur fond lisse et rugueux du réservoir rectangulaire peu profond présente l'un de nos objectifs tracés dans cette étude.

Le présent chapitre donne la conception du dispositif d'essais utilisé dans cette recherche où les mesures expérimentales ont été analysées afin d'évaluer l'influence de la surface du fond du réservoir sur les écoulements bidimensionnels. Cependant, les résultats des combinaisons géométriques formées par les murs du bassin, fabriqués en *PVC*, ont été analysés et comparés avec ceux de l'antérieur. Ces combinaisons donnent lieu à un facteur adimensionnel de forme ($AR = L/B$) et d'élargissement ($ER = B/b$) où la définition de ces de facteurs géométriques ainsi que les configurations asymétriques dans une géométrie symétrique sont décrites.

Dans cette étude expérimentale, l'analyse des modèles d'écoulements observés sur un fond lisse que rugueux ont été examinés pour déterminer la sensibilité de ces paramètres sous l'effet des configurations symétriques et asymétriques. Cependant, la prolongation de ce travail expérimental permet de définir l'effet des paramètres adimensionnels géométriques au-dessus d'un fond lisse et rugueux sur le champ d'écoulement. A cet égard, une vue d'ensemble sur l'installation expérimentale ainsi que les paramètres hydrodynamiques ont été détaillés. L'instrumentation de mesure utilisée, les informations relatives à la composition du matériel ainsi que les ouvrages annexes sont décrits dans la (Partie IV.1.1). L'installation expérimentale de la méthode *LSPIV* ainsi que la description de son mode de fonctionnement sont mentionnées dans la (Partie IV.1.2) qui est suivi du principe de mesure de la méthode examinée.

L'actuel chapitre donne lieu à des réflexions qui précèdent la conception du dispositif expérimental utilisé pour cette recherche. Le chapitre est concentré sur les différents paramètres des données notamment l'examen de l'étude expérimentale où une description détaillée de l'enregistrement, de l'analyse, du traitement et de la correction des vitesses superficielles ont été reportées dans la (Partie IV.2). Le programme expérimental est présenté dans la (Partie IV.3) avec les différentes configurations du champ des vitesses de surface symétriques et asymétriques.

Dans la deuxième partie, une autre étude expérimentale a été basée sur l'influence de la turbulence sur la configuration d'écoulement asymétrique et symétrique dans une géométrie symétrique. Cette transition a été étudiée pour évoquer l'importance des conditions aux limites dans un écoulement bidimensionnel superficiel. En effet, les conséquences de la distribution des vitesses de surface appuyées par les résultats antérieurs sont illustrées dans la dernière partie.

L'influence des caractéristiques de l'écoulement turbulent sur la rugosité du fond et de la géométrie du réservoir rectangulaire peu profond ont été discutées. Les résultats obtenus sont analysés voire interprétés avec la discussion des conclusions dans la (Partie IV.4). Par analyse de couples d'images, l'hydrométrie est une alternative intéressante aux techniques opérationnelles classiques notamment en ce qui concerne la caractérisation de l'écoulement turbulent stationnaire et non stationnaire.

En conclusion, l'effet du facteur de forme et d'élargissement sur le développement des écoulements peu profonds au-dessus d'une surface à fond rugueux n'est pas complètement maîtrisé malgré les efforts qui lui sont consentis.

IV.1 INSTALLATION D'ESSAIS

L'installation d'essais à ciel ouvert a été montée au Laboratoire de Constructions Hydrauliques (*LCH*) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse (*EPFL*) afin d'étudier les différents phénomènes d'écoulement au-dessus d'un fond lisse et rugueux durant la génération des configurations de recirculations asymétriques dans un réservoir de géométrie symétrique. En effet, cette géométrie a été parfaitement définie par la gamme des conditions d'essais données par un facteur d'aspect (h/b) qui représente le rapport de la profondeur d'eau à la largeur d'entrée du canal. Cependant, les phénomènes physiques des écoulements à surface libre en eau peu profonde ont été expliqués par le choix d'utilisation le même protocole expérimental que de celui de (Kantoush, 2008). La configuration a été mise en place lors des précédentes études expérimentales avec des conditions géométriques et hydrodynamiques homogènes. Une vue d'ensemble de la géométrie du bassin, les paramètres testés ainsi que les techniques de mesure adoptées sont mentionnées plus loin. L'analyse détaillée de ces bassins rectangulaires sert comme cas de référence dans le cadre d'un projet de recherche traitant la sédimentation des réservoirs à faible profondeur.

IV.1.1 Modèle physique et annexes

Le dispositif expérimental à fond plat et horizontal ($I \approx 0$) fabriqué en *PVC* a été relié à des canaux d'entrée et de sortie symétrique de forme rectangulaire de longueur ($l = 1.00m$) et de largeur ($b = 0.25m$). Une vue schématique du dispositif expérimental avec des dimensions basées sur l'espace disponible au laboratoire de ($L = 6.00m$) de longueur, ($B = 4.00m$) de largeur et ($h = 0.200m$) de profondeur est montrée dans la (Figure 4.1).

Les grandeurs du modèle physique demeurent, principalement, constantes et homogène durant toute l'expérimentation où une photographie de l'installation expérimentale de forme rectangulaire soutenue par des supports en bois à fon lisse et rugueux est montrée respectivement dans la (Figure 4.2a, b).

Le débit moyen d'écoulement ($Q = 7.0l/s$) est mesuré par un débitmètre électromagnétique et contrôlé par une vanne de dérivation montée sur la conduite d'alimentation (Figure 4.3d) qui permet le maintien de l'écoulement permanent et uniforme. Ce débit est fourni en circuit fermé à travers un réservoir intermédiaire de capacité de 200 litres, par une pompe de $1200tr/min$ (Figure 4.3e).

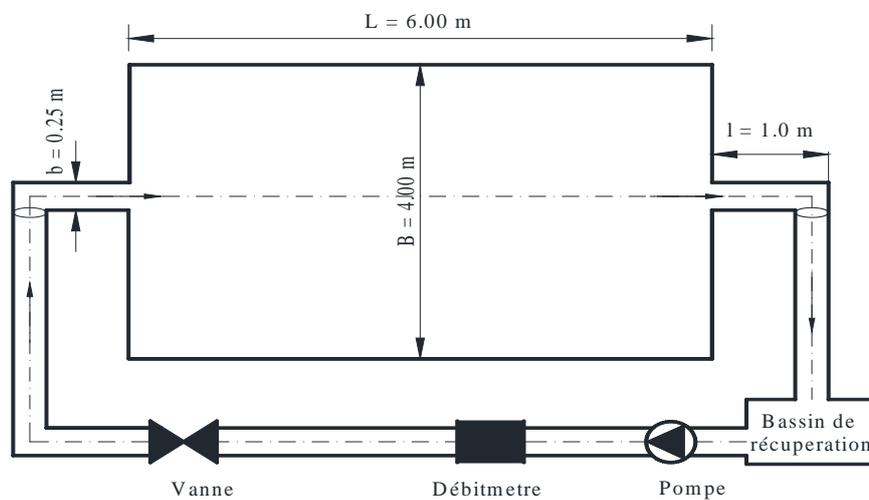


Figure 4.1 : Modèle physique d'entrée et sortie symétrique avec un circuit fermé d'hydraulique ($L = 6.00m$, $B = 4.00m$, $b = 0.25m$, $l = 1.00m$)

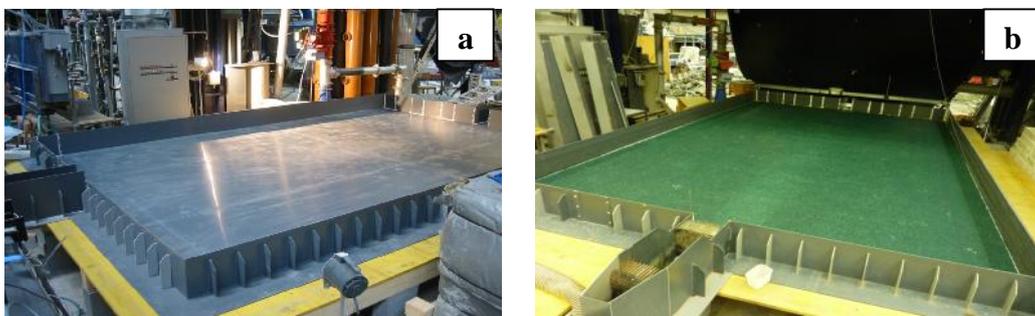


Photo 4.2 : Vue générale du réservoir expérimental

a) Fond lisse : $\bar{k}_0 = 0.1mm$

b) Fond rugueux : $\bar{k}_0 = 2.8mm$

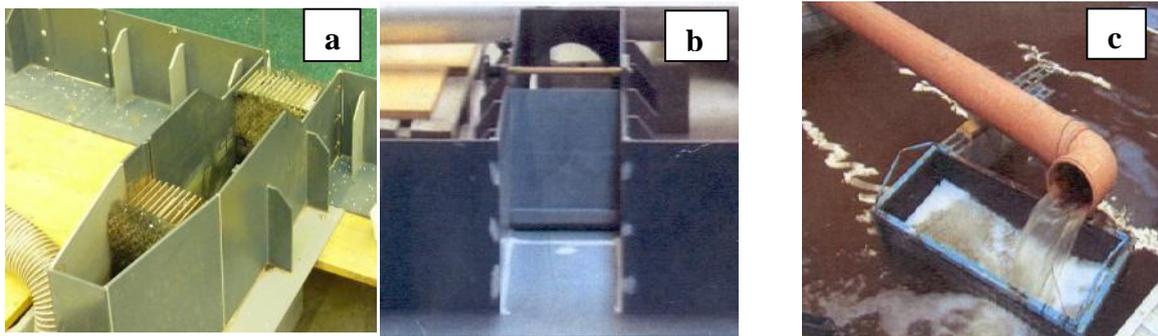
Un nombre de Reynolds pour un écoulement pleinement développé et un nombre de Froude suffisamment faible sont nécessaires pour obtenir un écoulement turbulent correctement modélisé dans une eau peu profonde afin de conduire à une grande installation au laboratoire. Pour tous les essais l'installation physique est exploitée en similitude de Froude ($F_r < 1$) car l'inertie et les forces de pesanteur l'emportent sur la viscosité et la tension superficielle. En effet, dans le canal d'entrée, le nombre de Froude et de Reynolds ont été pris, respectivement, $0.05 \leq F_r \leq 0.43$ et $14000 \leq R_e \leq 28000$. En écoulement à surface libre, la loi de Froude est déterminée systématiquement par la relation $F_r = u\sqrt{gh}$ utilisée pour le régime du type turbulent-fluvial dit (sub-critique). Tandis que la distance entre l'entrée étroite du canal et l'élargissement brusque de la section élargie du bassin a été choisie pour remplir les conditions hydrauliques de sorte que le nombre de Reynolds ($R_e = uh/\nu$) soit suffisamment grand pour maintenir un régime d'écoulement turbulent. Pour obtenir un écoulement de surface correctement modélisé peu profond et turbulent dans les conditions de laboratoire, un nombre de Reynolds suffisamment élevé se traduit généralement par un grand réservoir prohibitif afin d'assurer une turbulence parfaitement développée. La vitesse moyenne d'écoulement, la profondeur d'eau et l'accélération gravitationnelle due à la pesanteur ainsi que la viscosité cinématique du liquide sont respectivement données (u, h, g et ν).

La souplesse des parois latérales fabriquées en PVC ont permis de modifier, facilement, la longueur et la largeur du bassin. Par ailleurs, des murs mobiles peuvent être déplacés pour permettre la réalisation de différents modèles et pouvoir modifier les sections géométriques du réservoir. Néanmoins, l'effet physique des murs latéraux du modèle d'essai hydrauliquement lisse est considéré comme négligeable. L'effet des deux facteurs, de forme (L/B) et d'élargissement (B/b) sur le mode d'écoulement a été examiné de telle façon à réaliser une géométrie variable du réservoir rectangulaire à géométrie variable. En amont du canal, une zone de tranquillisation a été créée par la pose de deux grilles en nid d'abeilles (Figure 4.3a) afin de diminuer le taux de turbulence et maintenir l'énergie gagnée en tout point qui est égale à l'énergie dépensée. L'efficacité de ces filtres est de permettre l'homogénéisation de l'écoulement en favorisant le développement du régime permanent et uniforme. Cela admet l'élimination des ondes, à l'entrée du bassin, dues à la mise en régime de l'installation expérimentale pour pouvoir chasser toutes les perturbations engendrées par les longues vagues. Par l'étude de l'écoulement turbulent développé dans le réservoir peu

profond permet la génération des configurations de la recirculation asymétriques et symétriques dans un bassin symétrique.

Le niveau d'eau en amont et en aval du bassin a été vérifié par deux échelles de limnimétrie, permettant de commander la hauteur d'écoulement de manière à satisfaire la relation « Niveau-Débit ». Les profondeurs d'eau ont été ajustées par un déversoir réglable de forme rectangulaire de large ($b = 0.25m$) et de hauteur maximale ($0.30m$) situé à l'extrémité aval de la prise (Figure 4.3b). Cela convient à maintenir la symétrie d'entrée et de sortie du modèle d'essais durant l'étude expérimentale afin de pouvoir définir le facteur d'élargissement ER .

Un petit bac de restitution a été destiné à recevoir l'eau de drainage qui permet la récupération des particules blanches flottantes (traceur) pour d'autres mesures expérimentales (Figure 4.3c).



a) Entrée du bassin avec les nids d'abeilles

b) Déversoir réglable à l'aval du canal

c) Bassin de restitution et de récupération du traceur



d) Vanne de commande



e) Réservoir intermédiaire

Figure 4.3 : Ouvrages annexes de l'installation expérimentale

IV.1.2. Instrumentation

IV.1.2.1. Matériels de mesure

Le développement de différentes techniques de mesure et matériel d'acquisition comme (les sondes de mesure des vitesses et les hauteurs d'eau à Ultrasons, Anémomètre Laser Doppler, Acoustique Doppler ou la Vélocimétrie des Particules par Imagerie vidéo) a connu une progression considérable durant ces dernières années. Cependant, pour procéder à des mesures précises, il est important de tester beaucoup plus d'appareils afin de connaître leur mode de fonctionnement et leur fiabilité. Par ailleurs, l'avancée observée se situe sur le retour des expériences de ces technologies, principalement, le contrôle des équipements pour valider leur bonne efficacité. En effet, l'évolution de ces outils pour la compréhension de la modélisation physique des écoulements en milieu naturel nécessite beaucoup plus de validation des mesures complémentaires.

IV.1.2.2 Installation expérimentale de la méthode LSPIV

Le montage du dispositif expérimental est présenté en temps réel et continu par la (Figure 4.4) qui est montré par l'installation d'un système de mesure non-intrusif *LSPIV* qui n'est jamais en contact avec l'eau. Cette technique a été utilisée, bien évidemment, pour mesurer les composantes de vitesses horizontales à travers la totalité de la surface libre du réservoir rectangulaire peu profond.

En *PIV* classique, l'ensemble du matériel est simple, il est composé d'une caméra numérique (dans les systèmes modernes), le fluide à analyser, le traceur de l'écoulement et un assemblage optique concentrant la lumière du laser de haute puissance dans un plan de mesure. Le laser fait office du flash de la caméra et sa lumière réfléchiée par les particules contenues (ensemencées naturellement ou artificiellement) dans le volume éclairé du fluide. La technique *PIV* fait partie de la nouvelle génération d'instruments qui modifient la façon de mesurer les ressources en eau de surface. Elle peut fournir des données sur la vitesse du courant qui est nécessaire pour mieux comprendre les processus des eaux de surface et la dynamique fluviale ainsi que les interactions dans les conditions normales et extrêmes. Cependant, elle permet la visualisation des lignes de courant et les vitesses instantanées et moyennes de la surface avec une fréquence fixée auparavant afin de suivre l'évolution de l'écoulement dans le volume de mesure.

- *Le principe de mesure*

Le principe de mesure consiste à positionner une caméra digitale perpendiculairement au volume de mesure, située à une distance d'environ (3.00m). La caméra est fixée au toit du laboratoire qui est pointée verticalement sur le centre de gravité de la section d'essai, couvrant presque la totalité de la surface du réservoir rectangulaire. Tandis que la valeur de la longueur ($\Delta L = 0.50m$) a disparu à l'extrémité amont et aval menant, approximativement, à une surface libre de section ($S = 5.00m \times 4.00m$). La mesure a été effectuée de telle façon à éviter n'importe quelle déformation de l'image due à la présence des ondes de surface au laboratoire. Dans le cas contraire, il faut procéder à la correction des effets de la perspective et de la distorsion affectant les images enregistrées, avec un logiciel utilisé sur la calibration de la caméra (Camera Calibration Toolbox for Matlab). Enfin, de nouvelles images ortho-rectifiées sont construites à condition que l'image corrigée soit à peu près de la même taille que l'image de base enregistrée par la camera.

La visualisation de la position du traceur à la surface libre permet d'enregistrer à la même vitesse, la direction des lignes de courant par des prises de vue réalisées à différents instants. Cette dispersion visuelle des particules blanches flottantes à la surface libre observée à l'œil nu et les photos prises par la camera indiquent le sens de l'écoulement et le nombre de zones de recirculation. La méthode consiste à enregistrer des images vidéo dans le plan d'un écoulementensemencé de particules en plastique. Cependant, cette section de mesure est alors illuminée en un court intervalle de temps afin d'enregistrer la lumière diffusée par les particules sur une ou plusieurs images. Cependant, la lumière dispersée permet que les positions du traceur soient enregistrées par la caméra à deux instants successifs dont le taux arrive parfois jusqu'à 33 images par seconde. Le champ des vitesses de surface correspond à l'espace de l'orientation de la particule liquide où son déplacement coïncide avec la vitesse de surface à condition que le traceur soit visible.

L'analyse de la visualisation des images vidéo zénithales a été, également, introduite pour pouvoir établir la dynamique des structures tourbillonnaires afin d'examiner l'instabilité des écoulements turbulents. Lorsque le mouvement du traceur est dirigé de l'amont vers l'aval, la vitesse est mentionnée positive, tandis qu'un déplacement de l'aval vers l'amont correspond à une vitesse négative.

L'installation de mesure est composée d'une caméra numérique connectée à un ordinateur via le web aux serveurs de l'EPFL qui est munie d'un logiciel d'enregistrement des photos et l'acquisition des données. Suivant la disponibilité, un seul modèle du traceur a été utilisé pour l'ensemencement de la surface libre de l'écoulement, dont les caractéristiques ont été décrites plus loin. Le calcul est résolu par les séquences des couples d'images enregistrées et reliées entre elles pour produire un champ de vecteurs de vitesses moyennés des écoulements peu profond dans un bassin à géométrie variable.

En conclusion, la technique *LSPIV* permet de réduire l'incertitude qui affecte les mesures expérimentales au laboratoire ou bien *in situ*.

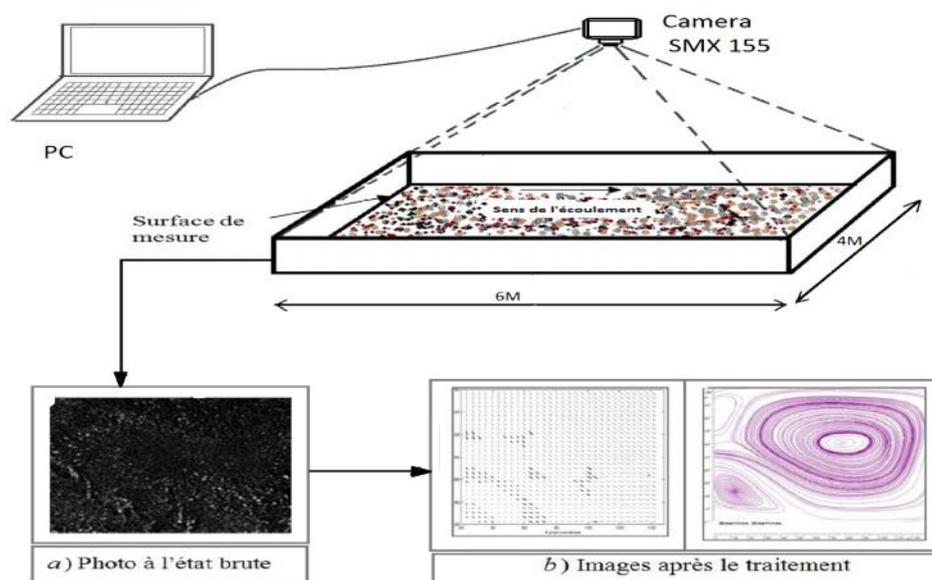


Figure 4. 4: Configuration de mesure par *LSPIV* avec le traitement des images enregistrées par le logiciel Flow Manger développé par (Dantec Dynamics, S/A. 2007)

IV.1.2.3. Caméra vidéo

Le choix le plus flexible de la sélection de la caméra testé était nécessaire pour être adapté à la détermination spatiale des essais et les exigences de la résolution temporelle ainsi que la sensibilité du pixel. La gamme de la caméra numérique est monochrome *CMOS* de résolution *VGA* quantique de 70% (QE) et d'efficacité absolue, du type *SMX-155*, Panasonic Lumix *DMC-ZS.25*, de 12.1MP Digital, de 1.3 méga Pixel (Figure 4.5). La caméra est munie d'un zoom de 12x et d'un stabilisateur d'images de résolution optique. Le capteur est équipé d'un objectif angulaire (un grand angle de 25mm) où il peut arriver à une

résolution de 1280×1024 pixels dans le champ d'écoulement permettant de prendre plusieurs photos atteignant, parfois, les 1075 images/seconde. L'avantage de cet objectif est, quasiment, de ne plus introduire la distorsion durant l'essai en permettant d'enregistrer avec une bonne résolution et très peu d'erreur le champ des vitesses de surface. La caméra intégrée possède une liaison avec l'interface *USB-2.0* permettant d'optimiser les transferts caméra-ordinateur et *frame rate up to 33-FPS* (Dantec Dynamics A/S., 2007). Comme il existe de nombreux modèles de supports de caméra pour adapter le champ de vision à la taille du détecteur où l'appareil définit dans l'illumination du volume et la zone de mesure.

Les ajustements de mesures comprennent plusieurs étapes citées ci-dessous:

- Le bon éclairage pulsé du volume de mesure
- L'ensemencement de la surface libre de l'écoulement
- L'enregistrement de la séquence d'images horodatées de l'écoulement par l'appareil photo fixe permet une connaissance fine de l'intervalle de temps entre les images.
- La correction géométrique des images pour s'affranchir de l'effet de la distorsion de perspective.
- Le calcul du déplacement du traceur de l'écoulement avec l'analyse statistique en corrélation.
- La vérification de la qualité des lignes de courant et la correction des vecteurs de vitesses sont calculées par le logiciel Flow Manager développé par ((Dantec Dynamics A/S., 2007).



Figure 4.5 : Caméra numérique Smx-155.exe, 1.3 Méga Pixel

IV.1.3. Illumination du volume de mesure

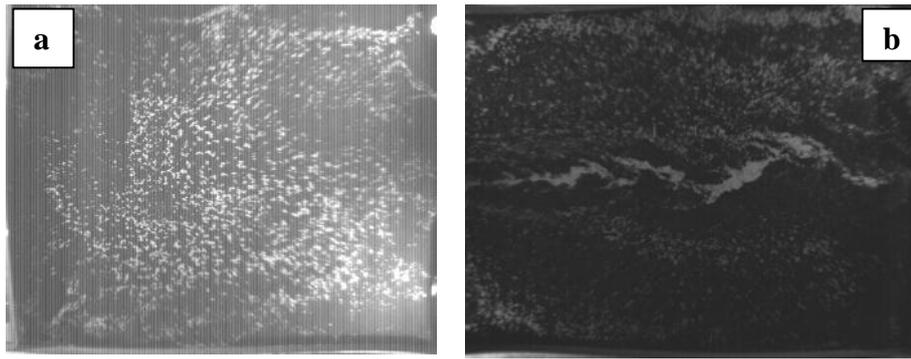
Pour l'application de la *LSPIV*, l'éclairage au laboratoire est contrôlé par une illumination pulsée de la surface de mesure qui est souvent marquée par des ombres et des

réflexions (ce sont les zones de l'image où l'illumination globale est moindre). Alors qu'en milieu naturel, l'analyse de la méthode est non contrôlable dépendant, essentiellement, du soleil, des conditions météorologiques et de l'heure de la prise de vue. Dans ce sens, un filtre polarisant sur l'objectif de la caméra a été installé par (Hauet et al, 2009) afin de permettre l'atténuation mais pas l'élimination complète des reflets se produisant sur la surface libre de la rivière Iowa city où l'algorithme détecte les ombres sur les images du système a développé.

Durant les mesures effectuées, le problème rencontré s'est avéré plus crucial à cause des effets d'ombres enregistrés sur la surface libre (Figure 4.6a). Pour éliminer ces réflexions provenant des trappes et les ouvertures de la halle, plusieurs tentations ont été essayées afin d'atteindre les conditions cohérentes et obtenir des images de bonne qualité. Toutefois, l'éclairage de la surface du liquide se fait par le rayonnement du laser qui fait office du flash de la caméra. Par ailleurs, le volume de mesure a été illuminé par quatre projecteurs afin d'obtenir une distribution homogène de l'intensité de lumière. Ainsi, plusieurs manœuvres et beaucoup de combinaisons des positions des projecteurs ont été envisagés pour que la manipulation soit rendu facile et plus maniable (Weitbrecht et al, 2002).

Pour avoir un bon éclairage conventionnel pulsé (Figure 4.6b), les projecteurs ont été installés dans les quatre coins du réservoir puisqu'un faible éclairage entraîne une perte d'information du fait que la plage du niveau du capteur n'est pas entièrement utilisée. Alors qu'un éclairage trop fort peut provoquer une saturation en pixels et endommager, à terme, le capteur de la caméra. Cependant, il est impossible d'effectuer des relevés de mesure si l'éclairage de la surface de mesure est médiocre et le traceur n'est pas fourni en quantité suffisante. Cependant, lorsque d'autres phénomènes de réflexions sont observés à la surface libre, cela pourra réduire la précision des mesures. Sachant que la qualité de l'acquisition d'images est, étroitement, liée à l'éclairage de la surface d'observation et à l'homogénéité de l'ensemencement.

Rappelons que nos essais se sont déroulés pendant la nuit afin d'éviter toutes ombres et les réflexions afin d'avoir une bonne visibilité qui pourra entraîner une fiabilité des résultats.

Figure 4.6 : Les mesures *LSPIV* en lumière pulsée

a) Image avec ombre

b) Image sans réflexion

IV.1.3.1. Traceur et ensemencement

L'ensemencement d'une surface libre est un élément important dans les mesures *LSPIV* qui fournit un signal de fluorescence robuste. En effet, l'écoulement à surface libre estensemencé avec des particules blanches flottantes dont les caractéristiques sont choisies de manière à ne pas altérer la dynamique du courant. Ce traceur montre, néanmoins, l'entraînement de l'onde d'excitation et d'émission des particules ensemencées qui sont compatibles avec le reste du système optique, conçu pour maximiser le rapport signal-bruit.

En effet, l'ensemencement de la surface de mesure possède une interaction minimale dans l'écoulement ce qui rend la méthode pratiquement non intrusive et entièrement numérique (Muste et al, 2000). En effet, les grandes particules peuvent avoir ensemble une forte tendance de collage, en revanche les petites particules ne peuvent être efficacement détectées par la caméra. Cet inconvénient a été examiné sous toutes ses formes. Cela a conduit au choix du polypropylène (*PP*) de forme sphérique et du diamètre variant entre 2 et 5 pixels. Ce choix a très bien fonctionné en répondant aux exigences de la résolution spatiale élevée (Graf et al, 1991) et se conforme aux conditions d'application. La taille de ces particules ne doit pas être trop petite pour obtenir une intensité de lumière, suffisamment, bien diffusée sur le volume de mesure. Ce compromis de dimensions a été adopté avec un diamètre moyen ($D' = 3.4$ pixels) et de poids spécifique ($\rho' = 960 \text{ kg} / \text{m}^3$). Sachant que la densité doit être choisie de façon que les particules suivent le mieux possible le mouvement local du liquide. Par ailleurs, le traceur doit avoir aussi en surface libre une couleur différente pour être visible à l'œil nu par contraste avec le fond foncé du réservoir (Figure 4.7a). Si le fond du réservoir est de couleur blanche, le traceur est, obligatoirement, sera sombre (Figure 4.7b) le

contraire est vrai. En effet, le rôle de la couleur est de faciliter l'inspection optique du sens du mouvement de l'eau qui devient fondamentale dans les mesures de la visualisation. Il permet de montrer les vitesses superficielles U sans qu'elles soient affectées par la circulation de l'air.

A une faible hauteur par rapport à l'entrée du bassin, la surface libre estensemencée manuellement par des particules flottantes uniformes de couleur blanches sans que l'écoulement ne soit fortement perturbé ou bien troublé par le sillage (Chen & Jirka, 1997) & (Muste et al. 2008). Ce type d'ensemencement est effectué de telle façon à minimiser les différences entre la vitesse du traceur et celle du liquide sans que la surface libre soit perturbée par les vagues externes. Un nombre élevé du traceur peut conduire à une interférence de la lumière diffusée par les différentes particules. Alors qu'une quantité suffisamment grande de particules doit être en nombre satisfait pour effectuer un traitement de qualité et pouvoir valider les résultats de mesures. Par contre l'insuffisance en traceur rend difficile voire impossible la mesure des vitesses de surface puisque la qualité de l'ensemencement doit dépendre fortement de l'homogénéité et la continuité de la distribution de ces particules sur le volume de mesure (Weitbrecht et al, 2002). Lorsque la zone de mesure (plan du liquide) disperse la lumière réfléchiée par les particules (naturellement ou artificiellement) contenues dans les régions spécifiques du volume éclairé, cette lumière sera récupérée par la camera afin de déterminer les vitesses de surface.

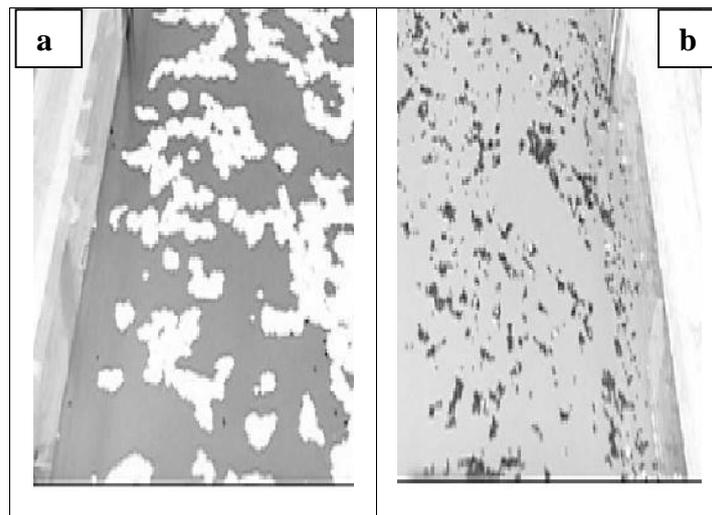


Figure 4.7 : Deux traceurs de couleur différente sur fonds différents

a) Traceur blanc sur fond noir b) Traceur noir sur fond blanche

Les résultats obtenus sont les mesures de vitesses instantanées superficielles d'un écoulement bidimensionnel à condition que le traceur soit visible. Au laboratoire les sources d'erreur affectant les mesures durant l'enregistrement existent où leurs effets sont beaucoup plus importants lors des applications en milieu naturel comme dans les rivières (Hauet et al, 2009).

En conclusion, *LSPIV* fait encore l'objet de nombreuses applications destinées à son amélioration qui nécessite des mesures plus fines et un traitement plus complexe.

IV.1.3.2. Prise d'images

La caméra digitale *SMX –155* est synchronisée avec un laser de haute fréquence qui dispose d'un capteur d'une grande vitesse de lecture d'images et une grande vitesse d'acquisition. L'appareil photo dispose d'un mémoire qui permet de mémoriser des milliers d'images en pleine résolution et de garder, ainsi, un grand nombre. Toutes les particules traçant l'écoulement peuvent être reconstruites via la simple superposition d'images de chaque volume d'écoulement. Sachant que la qualité des images est liée à la précision de l'enregistrement des positions des particules flottantes car plus le traceur est nombreux, plus la résolution spatiale est plus élevée et plus les résultats sont fiables et plus précises. Dans le champ de mesure photographié par la caméra, le champ de l'écoulement dans la section ($S = 6.00m \times 4.00m$) donne une résolution longitudinale de direction (x) et (z) où on peut rétablir une matrice bidimensionnelle d'intensité lumineuse.

IV.1.3.3. Analyse statistique

L'analyse des couples d'images prises par la caméra permet de déterminer le champ des vitesses de surface à condition que le traceur soit lisible à la surface libre pour être détecté efficacement détecté par la caméra. Les vitesses de surface mesurées uniquement dans le plan du déplacement du traceur nécessitent au moins deux expositions successives pour calibrer la vitesse des particules. Ces expositions d'images capturées peuvent être faites sur une paire d'images distinctes qui sont analysées et traitées par un Algorithme basé sur le cross corrélation (Weibrecht et al, 2002). Ces photos numériques capturées déterminent la vitesse du déplacement des particules flottantes (traceur) entre les couples d'images enregistrées consécutivement. Plusieurs méthodes statistiques ont été développées de façon à quantifier le déplacement du traceur d'une image à une autre dont la plus utilisée est celle de la corrélation croisée développée par (Dantec Dynamics A/S. 2007).

IV.2. METHODE DE MESURE PAR LSPIV

L'effet de la rugosité du fond du réservoir peu profond sur le champ des vitesses de surface a été obtenu par la mesure *LSPIV*. Les expériences ont été effectuées dans une installation d'essai conçu déjà par un doctorant au Laboratoire de Constructions Hydrauliques (*LCH*) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (*EPFL*) Suisse.

Cependant, de nombreuses contributions expérimentales et numériques relatives à la stabilité des écoulements peu profonds ont pu mentionnées la visualisation des positions de différentes zones de recirculation. Cependant, dans le même axe que nos prédécesseurs que ce travail de recherche a été élargi dans le but d'analyser le champ d'écoulement superficiel cisailé. Plusieurs essais ont été réalisés dans ce sens afin de mettre en place un guide avec de bonnes pratiques d'utilisation et de fonctionnement. Durant la génération des écoulements nous avons choisi d'utiliser le même protocole expérimental afin de minimiser les mouvements verticaux dans le réservoir (Vreugdenhil, 1994). Pour mieux comprendre le processus physique des réservoirs peu profonds régies par une géométrie variable du bassin rectangulaire de largeur ($B = 4.00m$) et de longueur ($L = 6.00m$), une étude a été menée par des approches expérimentales. Ces essais ont été conduits, notamment, sur la distribution des vitesses dans les écoulements turbulents en eau peu profonde, tant sur des surfaces lisses que rugueuses. Cependant, les différentes recirculations ont été examinées avec des conditions de bords préexistantes régissant de l'écoulement en zone d'entrée et de sortie pendant un temps ($t = 0s$). Ces conditions sont définies par des parois solides mobiles en mouvement limitant l'espace occupé par le liquide et par le champ des vitesses superficielles. L'importance de ces conditions aux limites sur un tel écoulement sera évoquée par les figures obtenues en ces mêmes conditions d'essais mais en journées de travail différentes.

Avant d'aborder la description de l'écoulement turbulent, il est nécessaire de définir les méthodes d'application. En effet, la définition de n'importe quel problème traité scientifiquement passe, obligatoirement, par certains paramètres qui montrent l'effet de la surface du fond sur les caractéristiques de l'écoulement extérieur. L'interprétation du champ des vitesses superficielles au-dessus du fond rugueux initialement lisse est l'un de nos objectifs tracé.

IV.2.1. Protocole de mesure

Dans le plan horizontal de l'écoulement de surface, la partie essentielle a été menée par l'application de la technique *LSPIV* (Large Scale Particle Image Velocimetry). Comme mentionné auparavant, la série d'essais fut commencée après avoir contrôlé la stabilité de la surface libre en amont et en aval du bassin. La confirmation de l'écoulement permanent et uniforme est obtenue à partir de la salle de commande où les paramètres hydrodynamiques ont été vérifiés (Figure 4.8). Les conditions initiales et aux limites sont introduites en amont et en aval du modèle à savoir : le débit moyen d'alimentation d'entrée et de sortie (Q) à travers un temps bien déterminé ($t > 0$) et la profondeur d'eau (h).

Après avoir caractérisé le dispositif expérimental, l'ensemble des résultats des travaux d'un écoulement turbulent-fluvial ont été présentés. Sur un fond lisse et rugueux le volume investigué estensemencé par des particules blanches flottantes (Figure 4.9b) dont les caractéristiques sont choisies de manière à ne pas altérer la dynamique de l'écoulement. En effet, les particules blanches flottantes permettent d'indiquer la direction du jet et la formation des zones de recirculation qui constituaient un plan d'observation des vitesses de surface. Les ajustements liés à l'image du réservoir et la position de la camera sont commandées depuis le sol et contrôlé, principalement, par un *PC* (Figure 4.9a).

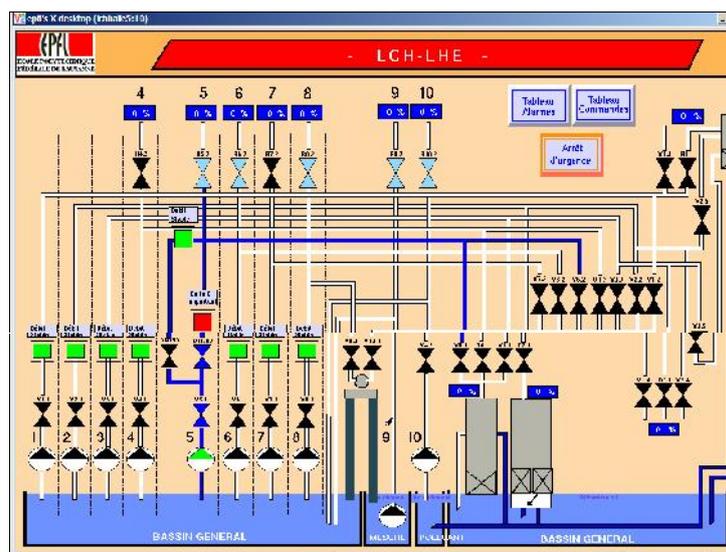


Figure 4.8 : Système de commande des vannes d'alimentation
lié au serveur de l'EPFL

Un écartement manuel des particules d'ensemencement était nécessaire avant chaque essai, en raison de l'effet de la tension superficielle et les forces d'inertie. Les positions des particules blanches réfléchissantes, dans un éclairage artificiel pulsé, sont enregistrées par l'appareil photo. La section de mesure est illuminée en un court intervalle de temps afin d'enregistrer la lumière diffusée par les particules sur une paire ou plusieurs images. Ces paires d'images prises par la camera sont traitées à leur état brut par un Algorithme de corrélation du type software. Les séquences des milliers de couples d'images, successivement, enregistrées avant leur calage sont stockées directement dans un *PC* réservé, exclusivement, au traitement.

Les vitesses moyennes instantanées sont obtenues par un éclairage artificiel pulsé (Figure 4.9c) et l'ensemencement uniforme et homogène sur la surface libre afin de déterminer la recirculation de tel écoulement. Le mouvement entre l'exposition de la première et la deuxième image a été analysé par le logiciel Flow Manager développé par (Dantec Dynamics A/S., 2007) afin de transformer les couples d'images capturées en vitesses instantanées pour pouvoir produire un champ d'écoulement ramené à la moyenne. Une vue d'ensemble de la géométrie du réservoir rectangulaire, les paramètres testés ainsi que la technique de mesure sont données. Le programme d'expériences et la configuration de la géométrie sur un fond lisse ainsi que rugueux et les différentes procédures d'essais sont décrits. Enfin, les conditions expérimentales et les paramètres adimensionnels des sections sont présentés. Les caractéristiques du bassin et des expériences sont données.

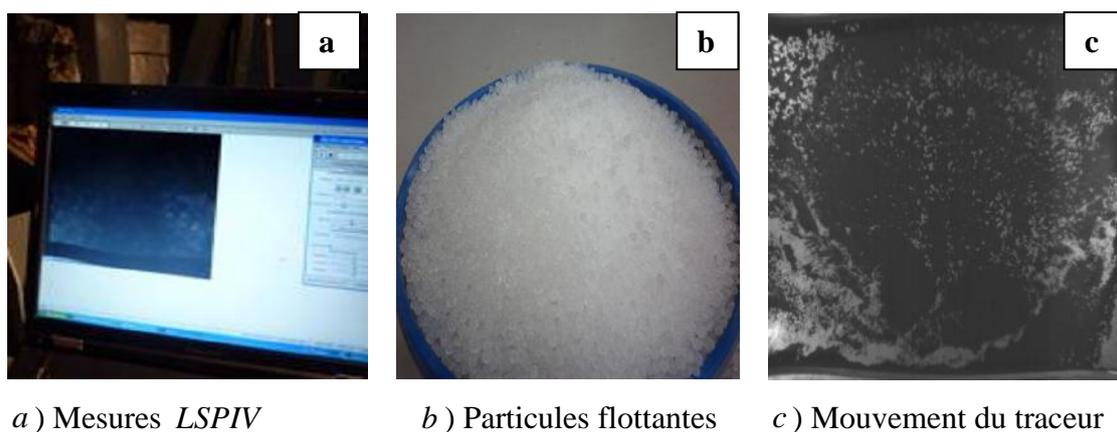


Figure 4.9 : Visualisation d'un jet tourbillonnaire en présence du traceur dans un fluide homogène

IV.2.2. Mise en œuvre

La mise en œuvre de la technique *PIV* requiert l'ensemencement d'écoulement, son illumination ainsi que l'enregistrement d'images de haute qualité permettront la détermination du champ des vitesses dans la section de mesure. Ces éléments doivent répondre à certaines contraintes de manière à assurer une mesure correcte et fiable avec les différentes formes de la géométrie testée du réservoir afin d'étudier le modèle d'écoulement.

Ce chapitre est centralisé sur la mesure *LSPIV* comportant, successivement, les étapes désignées comme suit :

- 1) L'enregistrement de couples d'images.
- 2) La correction géométrique des images s'il y a lieu (ortho-rectification) où leur reconstruction sans effets de perspective devient nécessaire.
- 3) L'analyse classique des images capturées.
- 4) Le traitement des paires d'images corrigées consécutives.
- 5) La correction des faux vecteurs ainsi que la vérification de leur qualité où le champ des vitesses *2D* instantanées est calculé par corrélation spatiale donnant lieu à des vitesses de surface.

IV.2.3. Enregistrement des images

Dans le champ de l'écoulement bidimensionnel, la visualisation du déplacement des particules blanches flottantes par une caméra dans une lumière pulsée rend l'enregistrement des couples d'images plus fiable. En effet, le premier enregistrement fut exécuté à l'instant où le traceur est illuminé par une paire d'images successivement capturées sur la surface de mesure bien déterminée. Par ailleurs, l'appareil photo peut enregistrer jusqu'à 1079 images pour une séquence réglée à une durée d'enregistrement ($t_{enrg} = 3 \text{ min}$), soit 06 images par seconde (*FPS*). Si les couples d'images enregistrés, successivement, sont déformés lors de l'enregistrement, une correction géométrique s'imposera (ortho-rectification). Avec l'analyse statistique des paramètres d'acquisition en corrélation, le calcul est effectué par Excel comme mentionnées plus loin:

- La caméra vidéo est synchronisée avec un laser utilisée à la fréquence (*12Mhz*) d'échantillonnage d'images enregistrées où elle possède un effet sur l'exactitude et le calcul des vitesses de surface.

- Déduire le temps d'acquisition qu'il faut en micro seconde ($\Delta t = \sim s$) via Fragment Per Seconde le $FPS = 8.22$ optimal [Tableau 4.1].
- Le nombre total d'images enregistrées (Exposure time en milliseconde) est établi sur la base de plusieurs expériences.

L'acquisition des données et la description du champ d'écoulement ont été examinés à partir de la commande d'acquisition (Acquisition control) et le champ visuel de la caméra (Field of view). Le temps entre les pulsations $\Delta t[\sim s]$ a été déterminé, après avoir choisi la durée de chaque pulsation ($\Delta t = 0.01ms$). Par enregistrement, pour améliorer le signal-bruit, la pulsation lumineuse indique le sommet de la validation maximale et le filtrage moyen. Ce rapport augmente le nombre de photos des particules flottantes dans la zone de l'image analysée où la vitesse déterminante des particules flottantes peut être prise comme la vitesse du fluide dans lequel sera transportée (Hollande et al, 2001).

Tableau 4.1 : Analyse statistique par Excel des paramètres d'acquisition

Test No	Test period	Frequency	FPS [No]	Exposure time	Delta t micro.S (t in μs)
Test01	22.01.2011	12	8.22	19.18	116667.6454
Test02	23.01.2011	12	8.22	19.18	116667.6454
Test03	24.01.2011	12	8.22	19.18	116667.6454

IV.2.4. Analyse des images capturées

L'analyse classique des paires d'images prises par l'appareil photo numérique permet de déterminer le champ des vitesses superficiel à condition que le traceur flottant à la surface libre soit lisible pour être efficacement détecté par la caméra. Les couples d'images capturées par l'appareil sont traitées par un logiciel basé sur le cross corrélation (Weibrecht et al, 2002). Ces groupes de photos seront, ensuite, analysés et traités par le logiciel Flow Manager développé par (Dantec Dynamics A/S, 2007) afin de déterminer la vitesse du déplacement du traceur entre les couples d'images consécutivement capturées par la caméra. Cependant, par enregistrement, la pulsation lumineuse indique le sommet de la validation maximale et le filtrage moyen afin d'améliorer le rapport signal-bruit. Ce rapport augmente le nombre des

photos du traceur dans la zone de l'image analysée où la vitesse déterminante du traceur peut être prise comme la vitesse du fluide dans lequel il sera transporté (Hollande et al, 2001).

IV.2.5. Prétraitement

Les paires d'images, successivement, capturées par l'appareil photo dans une lumière pulsée sur une surface bien déterminée vont être traitées par un logiciel de corrélation et reliées entre elles afin de produire un champ des vitesses moyennées des écoulements superficiels. Le traitement de ces images capturées nécessite l'appui d'un ordinateur équipé d'une ram de 01 gigaoctet qui pourra repérer chaque particule flottante et désigne la direction du vecteur. En utilisant la méthode commune de cross corrélation calculée dans le domaine spatial, plusieurs logiciels ont été développés et employés pour le prétraitement des images. Pour identifier l'ensemble spatial, le calage des multiples images enregistrées par la *LSPIV*, séquentiellement, correspondant aux corrélations maximales. Elles sont utilisés en jonction avec l'intervalle de prélèvement afin d'obtenir un champ de vitesses extérieures. L'acquisition de ces images peut se faire par une caméra électronique. Cependant la recherche des paramètres optimaux pour la bi-dimensionnalité a été menée par le prétraitement de la *PIV*. En gardant la continuité de l'écoulement local, la méthode utilisée est basée par comparaison de chaque vecteur calculé à ses voisins.

Après le prétraitement des données par filtrage spatiotemporel, des milliers d'images brutes ayant les mêmes coordonnées d'orientation et séparées dans le temps sont transformées en champ de vecteur de vitesses dans la zone photographiée. La méthode de filtrage spatiotemporelle est adoptée, une fois les paramètres optimaux déterminés. Le calcul peut être lancé avec un temps de traitement maximalisé pour le rejet des signaux anormaux et l'élimination des vecteurs jugés incorrects. L'emplacement des vecteurs déterminés, sont rejetés ou changés, bien évidemment, par la moyenne pondérée la plus proche qui entoure la valeur des vecteurs gardés non restitués (Hollande et al, 2001). La détermination des vecteurs de vitesses exige les spécifications de la taille de l'image qui est de l'ordre d'une matrice de 1280×1079 pixels pour une fenêtre d'interrogation de taille $(n \times m)$ soit 32×32 pixels avec $[1 \text{ pixel} = 1.2 \text{ mm}]$. Après avoir supprimés tous les parasites, le prétraitement donne un ensemble de vecteurs corrigés de l'ordre (79×63) puisqu'on préfère supprimer les vecteurs erronés plutôt que d'essayer de les corriger afin d'éviter de se tromper. Le calcul des corrélations par la méthode directe implique un grand nombre d'opérations dans un écoulement plan ($2D$). Néanmoins, les échantillons se corrèlent à la valeur la plus élevée du

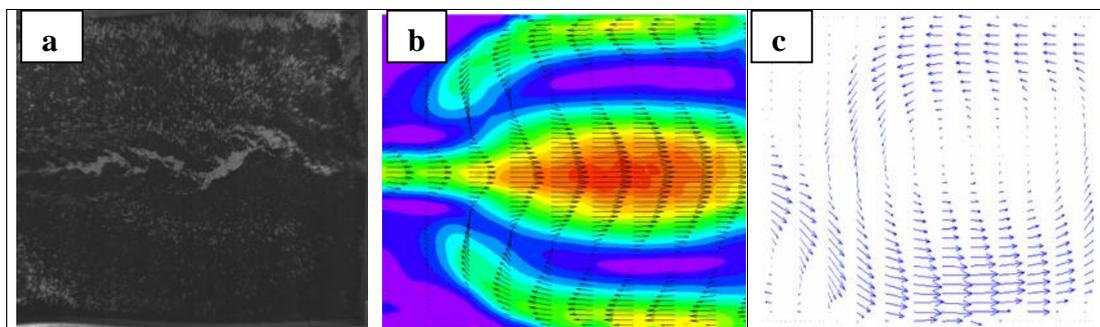
cross corrélation (Meselhe et al, 2004). L'interpolation est employée pour identifier la position et la validation du pic de la corrélation et l'identification des vecteurs sensiblement différents de la direction appliquée du champ d'écoulement.

En conclusion cette technique est, généralement, utilisée dans le cas des données bien résolues spatialement mais présentant un faible nombre d'échantillons temporels.

IV.2.6. Correction

Une fois le calcul du déplacement est effectué, l'algorithme Flow Manager permet de marquer les faux vecteurs, selon certains critères à savoir la valeur de la corrélation, la norme et l'orientation. Le déplacement d'un vecteur par rapport à ses voisins a été employé dans le traitement des images pour corriger les vecteurs des vitesses résultant de l'utilisation incorrecte des grandeurs et de l'ampleur de multiples pics de corrélation. La correction des faux vecteurs ainsi que la vérification de leur qualité font l'objet de cette partie. L'emplacement des faux vecteurs précédemment éliminés, sera déterminé par l'utilisation de la moyenne pondérée la plus proche, entourant la valeur des vecteurs non rejetée. Par ailleurs, des milliers d'images brutes proviennent des vecteurs substitués et retenus par filtrage spatiotemporel (Figure 4.10). Si un des vecteurs différait de la moyenne locale de plus de 30% , il est jugé incorrect et sera éliminé par conséquent il sera immédiatement remplacé par le vecteur interpolé (Fujita et al, 1998). Ce remplacement par la moyenne pondérée des vecteurs substitués et ayant les mêmes coordonnées d'orientation et séparées dans le temps.

En conclusion, la méthode *LSPIV* possède l'avantage de mesurer à distance des vitesses superficielles sur toute la totalité du volume photographié de manière plus fine sans aucun contact avec l'eau.



a) Image brute enregistrée par la camera ; b) Vitesses moyennes superficielles
c) Vecteurs de vitesses en surface libre

Figure 4.10 : Mesures par *LSPIV* dans un bassin à large échelle

IV.2.7. Algorithme de la LSPIV

Le principe de base de la *PIV* par l'imagerie du déplacement des particules consiste à l'évaluation et l'analyse statistique de la forme visible du déplacement du traceur sur les expositions successives des deux images prises dans un bref intervalle de temps connu (Δt). Ces particules flottantes sont éclairées par une source lumineuse qui se déplace entre les deux images successives, de la première image enregistrée à l'instant (t) vers la seconde prise à l'instant ($t + \Delta t$). Les couples d'images capturées par la camera sont traitées par un logiciel de corrélation sur un autre *PC* réservé à cet usage. En effet, cette lumière dispersée par le traceur sera récupérée par la camera pour donner la vitesse moyenne superficielle (U) qui est alors assimilée à celle des particules et est donnée par :

$$U = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Entre les couples d'images, le déplacement Δx séquentielles prise dans l'intervalle du temps en fonction de la position (Δx) génèrent de nombreuses composantes de vitesses superficielles $U(x, y, t)$:

$$U(x, y, t) = \frac{\Delta x(x, y, t)}{\Delta t}$$

où U et Δx sont des vecteurs (Holland et al, 2001) et (Uijttewaal et al, 2003).

Le déplacement de ces particules est déterminé par la corrélation des deux expositions prises successivement et par l'algorithme de traitement d'images Flow Manager développée par (Dantec Dynamics A/S., 2007). La précision de cette opération peut être affectée par différents facteurs tels que la perte de particules entre la première et la deuxième exposition, l'existence d'un gradient de déplacement dans la fenêtre ou encore l'amplitude trop faible du pic de corrélation due à un déplacement trop grand. Pour réduire les limitations de la méthode, divers algorithmes itératifs plus ou moins sophistiqués ont été développés au cours de ces dernières années. Si les deux illuminations sont enregistrées sur une même image, celle-ci sera traitée par autocorrélation afin de déterminer ce déplacement (Δx).

En conclusion, *LSPIV* semble donner des résultats encourageants même si quelques améliorations peuvent être apportées dans le futur afin de mieux rendre la turbulence plus compréhensive sur le fond rugueux.

IV.3. ETUDE EXPERIMENTALE

En conservant les conditions géométriques d'entrée et de sortie du canal, d'autres essais ont été réalisés au-dessus des surfaces lisses et rugueuses. Dans ce chapitre, plusieurs paramètres géométriques du réservoir à faible profondeur et large échelle ont été donnés pour une description des écoulements de recirculation. L'ensemble des grandeurs expérimentales étudiées ainsi que les paramètres hydrauliques utilisés durant les essais sont résumés dans [Tableau 4.2]. La conception de la géométrie de différents bassins utilisés pour les essais peut être, systématiquement, classée pour deux groupes : largeur et longueur du bassin respectivement, réduites. En effet, la variation de l'emplacement des murs mobiles permet d'obtenir de différentes combinaisons géométriques données sous la forme de rapport. Ce rapport (longueur par largeur) est exprimé par un facteur géométrique de forme ($AR = L/B$) qui définit la géométrie du bassin. En effet, la géométrie est justifiée respectivement par une gamme de grandeurs variables ($B = 0.50m$ à $4.00m$) et ($L = 3.00m$ à $6.00m$). Tandis que le facteur d'élargissement ($ER = B/b$) caractérise l'agrandissement brusque de la transition de l'écoulement entre la sortie du canal et l'entrée du grand bassin d'essai.

L'influence du facteur géométrique de forme ($0.5 \leq L/B \leq 12$) sur la recirculation permet de montrer les différentes sections du bassin pour l'analyser des configurations de l'écoulement sur le fond lisse et rugueux. Alors que le facteur d'élargissement ($B/b = 2$ à 16) caractérise l'agrandissement brusque entre le convergent étroit et le bassin. En gardant la symétrie d'entrée et de sortie du canal, une série de mesures a été menée dans le réservoir rectangulaire peu profond et géométrie variable afin d'étudier le champ d'écoulement extérieur avec une grande résolution spatiale. Le débit moyen d'alimentation est maintenu constant ($Q = 7l/s$) dans le réservoir rectangulaire de référence avec les dimensions du bassin ($L = 6m$) et ($B = 4m$) qui deviennent séparément variables par les parois durant plusieurs essais. Par contre si le débit est réduit à la moitié ($Q = 3.5l/s$) pour une profondeur d'eau fixe ($h = 0.200m$), le champ d'écoulement est analysé dans le bassin de dimensions linéaires constantes ($L = 6m$ et $B = 4m$). Comme la gamme de la profondeur est variable ($0.100m < h < 0.200m$), les configurations se réfèrent à l'effet des caractéristiques de la longueur et la largeur pour le même débit. Les différentes formes du réservoir ont été testées dans le but d'étudier l'effet de sa géométrie sur le mode d'écoulement.

Avec différentes sections du réservoir, plusieurs formes ont été testées pour étudier l'effet de la géométrie du bassin rectangulaire sur le champ d'écoulement dans le but de montrer le processus physique des écoulements peu profonds régis par une géométrie variable.

Tableau 4.2 : Grandeurs expérimentales étudiées

Grandeurs	Symboles	Valeurs min - max	Dimensions
Largeur du bassin	B	0.50 – 4.00	m
Longueur du bassin	L	2.00 – 6.00	m
Largeur du canal	b	0.25	m
Longueur du canal	l	1.00	m
Débit d'alimentation	Q	3.50 – 7.00	l/s
Profondeur d'eau	h	0.10 - 0.20	m
Pente du modèle	I	0.0080	%
Vitesse moyenne théorique	u	0.140 - 0.254	[m/s]
Nombre de Reynolds	R_e	27940 - 28000	[-]
Nombre de Froude	F_r	0.100 - 0.283	[-]
Rapport d'aspect	h/b	0.40 - 0.80	[-]

IV.3.1. Séries d'essais

Les écoulements à surface libre se produisent, généralement, dans le milieu naturel avec des conditions aux limites très différentes. Ce type d'écoulement est, néanmoins, sujet à une distribution des perturbations continues vis-à-vis des irrégularités qui sont rencontrés dans la nature où les fleuves, les estuaires, les zones côtières et les retenues peu profondes se rangent dans cette catégorie.

Le développement de l'écoulement plan, particulièrement dans la couche limite est un contribuant significatif à la résistance du mouvement et de la géométrie du bassin. Cependant, l'effet de la rugosité du fond du réservoir peu profond sur le mode des écoulements superficiels a été analysé dans cette partie. Néanmoins, celle-ci est d'une grande importance dans les différentes applications de l'Ingénierie. A cet effet, notre travail de laboratoire a été examiné par la mesure *LSPIV* afin de visualiser l'écoulement plan (*2D*) dans un bassin à ciel ouvert.

Pour les auteurs, la connaissance de la forme de la géométrie du lit, ainsi que l'effet du nombre de Froude sur l'écoulement n'ont jamais été étudiées de façon aussi complète à l'exception de (Kantoush, 2008) qui a pu examiner un essai avec la diminution du nombre de Froude $0.05 < F_r < 0.10$. Néanmoins, ses résultats n'ont pas mis en évidence l'effet de ce paramètre adimensionnel où il demeure insuffisamment, méconnu et mal maîtrisé. Rappelons que ces essais ont commencé avec une petite largeur ($B = 0.50m$) pour une longueur maintenue constante ($L = 6.00m$) afin d'observer les lignes de courant. Le basculement des configurations de recirculation asymétriques dans une installation symétrique a été montré. Les largeurs et les longueurs variables ont été également mentionnées avec une comparaison des résultats antérieurs qui sont considérés comme des données principales.

Le programme d'essais, où d'autres combinaisons ont pu suivre ces grandeurs et les différentes procédures expérimentales ainsi que les résultats obtenus sont décrits et comparés avec une entrée et sortie asymétrique (Camnasio et al, 2011). Malgré que l'écoulement turbulent ait été largement étudié cette dernière décennie sur fond rugueux par des simulations numériques et essais expérimentaux, ce domaine reste mal connu.

- **Première série**

L'influence de la géométrie du réservoir rectangulaire sur les caractéristiques du fond rugueux et lisse du bassin situé dans la couche limite turbulente ont été analysées. Dans ce sens, la largeur du réservoir est pris ($B = 0.5, 1.0, 2.0, 3.0$ et $4m$) pour une profondeur d'eau constante $h = 0.200m$, cela convient à décrire les vitesses superficielles obtenues pour un facteur de forme décroissant ($AR = L/B = 12, 6, 2, 1, 0.5$). Ainsi, la largeur d'entrée et de sortie du canal ($b = 0.25m$) et sa longueur est ($l = 1.00m$) où le débit d'alimentation moyen de ($Q = 7l/s$) ont été maintenues constants durant toute l'étude.

La variation de la taille et de la forme de la zone de recirculation de différents facteurs adimensionnels ont été analysées pour une longueur constante ($L = 6.00m$) dans le but de montrer la transition de l'écoulement asymétrique dans une géométrie symétrique. Les conditions des paramètres essais étudiés montrant les expérimentaux effectués sur un fond lisse et rugueux sont récapitulés dans le [Tableau 4.3].

Tableau 4.3 : Caractéristiques géométriques expérimentales avec une largeur variable

$$L = 6.00m, B \leq 4.00m, Q=7l/s \text{ et } h = 0.200m$$

Essais	L (m)	B (m)	S (m ²)	AR = L/B [-]	ER = B/b [-]	F _r [-]	R _e [-]
29	6.00	0.50	3	12.0	2.0	0.10	28000
27		1.00	6	6.0	4.0		
25		2.00	12	3.0	8.0		
28		3.00	18	2.0	12.0		
24		4.00	24	1.5	16.0		

- **Deuxième série**

Le but principal des essais menés dans un réservoir rectangulaire est l'étude expérimentale de l'effet des combinaisons géométriques sur les configurations d'écoulement asymétriques et symétriques sur fond lisse et rugueux. La deuxième série de mesure a été effectuée pour des longueurs variables ($L = 2.00, 3.00, 4.00$ et $5.00m$). Plusieurs combinaisons géométriques ont été utilisées dans le but d'expliquer les aspects fondamentaux de l'hydrodynamique dans le bidimensionnel à large échelle et pour montrer les différents champs d'écoulement. La diminution du facteur de forme ($L/B = 1.25, 1.00, 0.75$, et 0.50) est calculée pour une longueur variable qui s'accompagne, automatiquement, d'un facteur d'élargissement constant ($ER = B/b = 16$). Par ailleurs, au cours de chaque essai différents paramètres ont été mesurés à savoir: les vitesses d'écoulement, les vitesses de surface, le niveau d'eau ainsi que le débit d'alimentation en conservant l'entrée et la sortie du canal symétrie et invariable. La récapitulation de l'ensemble des valeurs expérimentales sont illustrées dans le [Tableau 4.4].

Tableau 4.4 : Caractéristiques géométriques expérimentales avec une longueur variable

$$L \leq 6.00m, B = 4.00m, Q = 7l/s \text{ et } h = 0.200m$$

Essais	L (m)	B (m)	S (m ²)	AR=L/B [-]	ER=B/b [-]	Fr [-]	Re [-]
40	5.00	4.00	20	1.25	16	0.10	28000
32	40.00		16	1.0			
42	3.00		12	0.75			
43	2.00		8	0.5			

- Troisième série

Dans la même installation expérimentale de géométrie d'entrée et de sortie symétrique, plusieurs paramètres ont été étudiés par les grandeurs hydrauliques et géométriques résumées dans le [Tableau 4.5].

La troisième série d'essais s'oriente vers l'étude de l'influence du nombre de Reynolds ($14000 \leq R_e \leq 28000$) développé dans le canal en eau peu profonde sur le champ de l'écoulement bidimensionnel. Parallèlement, cette série a été examinée par un facteur géométrique adimensionnel de forme ($AR = L/B = 1.5$) pour un débit d'alimentation réduit à la moitié ($3.5l/s \leq Q \leq 7l/s$). La configuration du champ des vitesses extérieures a été analysé pour les trois valeurs du rapport d'aspect ($h/b = 0.8, 0.6, 0.4$) pour une profondeur d'écoulement $h \leq 0.200m$ à différents nombres de Froude ($F_r = 0.1, 0.154, 0.283$).

Tableau 4.5 : Grandeurs expérimentales hydrauliques avec un nombre de Reynolds variable

$$L = 6.00m, B = 4.00m, L/B = 1.5, B/b = 16$$

Essais	h [m]	b/h [-]	h/b [-]	Q [l/s]	U [m/s]	F _r [-]	R _e [-]
1	0.200	1.25	0.80	7.0	0.14	0.100	28000
2	0.150	1.66	0.60		0.186	0.153	
3	0.100	2.50	0.40		0.28	0.283	
4	0.200	1.25	0.80	3.5	0.070	0.050	14000
5	0.150	1.66	0.60		0.093	0.070	
6	0.100	2.50	0.40		0.14	0.140	

IV.3.2. Impact des fluctuations

Dans le canal à large échelle, certaines dispositions ont été prises en considérations afin d'évaluer l'impact des fluctuations des vitesses sur l'écoulement superficiel. Cependant, l'interaction associée aux déformations de la surface libre augmente les fluctuations dans le sens horizontales, amortissant celles des verticales sous l'effet de la redistribution du jet principal. En effet, la mise en place des grilles en nids d'abeilles dans le plan vertical du canal permet d'éliminer ces perturbations de surface afin de favoriser un écoulement permanent et uniforme. Comme mentionné précédemment, ce type d'écoulement reste sujet à des perturbations continues où les zones côtières sont le siège de forte dynamique tourbillonnaire.

En régime turbulent rugueux, l'observation des fluctuations longitudinales entraînent relativement une diminution des fluctuations verticales ce qui traduit une réduction dans la turbulence notamment en écoulement rugueux. Néanmoins, dans d'autres essais il a été observé que la pompe est beaucoup plus stable à de grands débits ceci donne des informations sur les vitesses corrigées dans le plan de mesure (Weitbrecht et al, 2002). Par ailleurs, les paramètres avec leurs résolutions estimés sont les vitesses de surface en ($2D$), les vitesses moyennes d'écoulement ($1D$), le débit d'alimentation ainsi que le niveau d'eau à l'amont et à l'aval du bassin. Par ailleurs, pour chaque instrument utilisé, la mesure des paramètres est influencée par des sources d'erreurs élémentaires. Leurs effets se manifestent par la propagation de ces erreurs dans les valeurs mesurées ce qui génère ainsi des erreurs de précision dans les résultats de mesure. Les faibles divergences constatées dans les mesures restent délicatement imprécises à cause de l'introduction des fréquences Doppler qui affectent les mesures du fond. Par ailleurs, nous tenons compte des dimensions du traceur et la précision souhaitée des mesures. En effet, ces mesures ont été réalisées sur un fond de rugosité homogène dont la description a été faite ultérieurement. D'autre part, une incertitude considérable existe à l'égard de l'effet d'une surface rugueuse sur la turbulente.

IV.3.3. Estimations d'incertitudes

Dans les mesures expérimentales, les sources d'erreur possibles proviennent soient de mauvaises manipulations, d'un mauvais positionnement de la mesure réelle comme : l'appréciation de la distance, de la position du laser, du code du logiciel lors du traitement ou bien encore de l'évolution possible du traceur dans l'eau. Néanmoins, nous avons cherché à lister toutes les sources d'erreur affectant les mesures qui sont dues généralement à :

- Le non uniformité locale d'illumination.
- La luminosité et contraste.
- Le non représentativité de l'écoulement.
- L'évolution temporelle en ensemencement.
- L'intervalle de temps d'enregistrement entre les images.
- Les mouvements parasites et la résolution de la caméra.
- La reconstruction des images corrigées.
- L'interpolation sub-pixel pendant l'analyse du LSPIV
- La rectification et la reconstruction des images.

En effet, le niveau de précision que l'on peut attendre de cette méthode dépend, essentiellement, du soin apporté non seulement dans la réalisation des mesures mais aussi dans la qualité préalable de l'ensemencement, de l'importance de l'écart entre les conditions qui ont prévalu lors des mesures ainsi que les conditions réellement rencontrées dans les essais. Par ailleurs, nous avons introduit la tolérance de différents paramètres géométriques et hydrauliques mesurés, présentant la différence entre l'état initial (t_0) et final (t_f).

Les paramètres hydrauliques et géométriques sont acquis avec une certaine précision plus au moins grande selon : l'appareillage utilisé pour les mesures ponctuelles. Dans notre cas, un faible débit moyen d'alimentation ($Q=7l/s$), donne une précision de ($\Delta Q = \pm 0.3l/s$) pour une profondeur d'écoulement ($h = 0.200m$) où l'incertitude (précision) ne dépassait pas ($\Delta h = \pm 2mm$) ce qui donne une vitesse théorique moyenne de ($u = 1.40m/s$) Souvent, le champ résultant contient des erreurs qui exigent davantage de corrections. Par mesure des fluctuations, la validation exhaustive de l'estimation des erreurs relatives de l'instrumentation sont présentées et illustrées dans [Tableau 4.6] bien que durant les mesures, les erreurs associées lors du traitement ont été en grande partie évaluées.

Nous avons vu que toutes les composantes de mesure notamment l'illumination, l'ensemencement, l'enregistrement, l'analyse des images et le calcul des vitesses sont affectées d'incertitude d'estimation des paramètres à mesurer. Néanmoins, il est possible de montrer les erreurs d'ajustement avec la loi logarithmique à partir des profils des vitesses longitudinales où l'incertitude du débit résulte dans la dispersion de l'ajustement des paramètres à mesurer. Lorsque les conditions de mesure sont optimales, la précision obtenue est très satisfaisante (de l'ordre de 50% . Pour avoir une mesure fiable et plus précise, il faut

que l'écoulement soit équilibré et stabilisé afin de réduire les incertitudes qui dépendent principalement de l'instrumentation et non de la variabilité dans le temps du mesurande.

En conclusion, le niveau de précision que l'on peut attendre de cette méthode dépend non seulement du soin apporté dans la réalisation des mesures, mais aussi de la qualité du dimensionnement préalable et l'importance de l'écart entre les conditions qui ont prévalu lors de l'étalonnage et les conditions vraiment rencontrées dans la mesure au laboratoire.

Tableau 4. 6. Incertitude des paramètres expérimentaux mesurés

Paramètres mesurés	Incertitude	Dimensions	Instrumentation
Débit moyen d'alimentation	± 0.3	[l/s]	Debitmètre électromagnétique
Niveau d'eau amont et aval	± 0.002	[m]	Echelle limnimétrique
Pente du fond	± 0.001	[%]	Théodolite
Vitesses d'écoulement	± 0.001	[m/s]	<i>UVP</i>
Vitesses de surface	± 0.001	[m/s]	<i>LSPIV</i>

IV.4. RESULTATS

En mécanique des fluides, l'instabilité au sein de l'écoulement pourra contrôler la transition de la turbulence et modifier profondément l'hydrodynamique qui crée des structures cohérentes. Cependant, la théorie mathématique et les résultats expérimentaux ont pu fournir des solutions pratiques à plusieurs problèmes d'hydrodynamique, où d'importants ouvrages hydrauliques ont été conçus voire construits après des études plus approfondies. Par ailleurs, les résultats de ces modèles d'essais forment un outil supplémentaire de grande utilité pour les analyses hydrodynamiques. Ils permettent, néanmoins, d'organiser et même simplifier des expériences afin d'obtenir des résultats qui sont constitués par les essais et le calcul des grandeurs de la structure hydraulique. Ces applications sont, en général, bien adaptées, dans le temps, surtout au développement des vitesses moyennes (évolution puis dissipation)

puisqu'elles permettent l'identification des structures turbulentes à large échelle dans le sens horizontal d'un écoulement bidimensionnel pour différents phénomènes. Par ailleurs, la quantification de la taille de ces structures est fortement influencée par la géométrie du réservoir, en générant un champ d'écoulement turbulent. L'aspect de l'analyse de la configuration asymétrique développée dans un réservoir à géométrie symétrique est plus important. En effet, cet aspect présente l'influence de la rugosité du lit sur le mode d'écoulement où le nombre de Froude (F_r) n'a pas encore été traité auparavant.

La visualisation des structures est présentée par des paramètres qu'autorisent l'analyse de la turbulence superficielle telle que la zone de recirculation, la formation des tourbillons et l'étude de leur position. Leur effet d'utilisation quantitative sur le régime d'écoulement a montré la possibilité de le classer comme susceptible dans les mesures expérimentales. Par ailleurs, les mesures effectuées sont comparées aux modèles antérieurs où la recirculation est montrée et peut être de deux types : en configuration asymétrique, un seul tourbillon peut être créé lorsque les forces centrifuges deviennent importantes. Tandis que, si la turbulence est parfaitement développée, la recirculation devient symétrique et comporte deux tourbillons produits avec deux courants secondaires contrarotatifs dans la zone morte où l'effet de ces écoulements secondaires dans la principale zone est assez faible.

Dans la première partie, la série d'essais a été menée dans des conditions géométriques prises initialement symétriques sur fond lisse et rugueux. Si les parois solides du réservoir sont stables, les vitesses d'écoulement dans une section non circulaire sont grandes où la stabilité est liée à la faible viscosité et au nombre de Reynolds pleinement développé. Par ailleurs, l'écoulement dans les grands réservoirs peu profonds, est suivi de l'analyse du champ des vitesses de surface. Néanmoins, la déformation de la surface libre et le cisaillement du fond du canal peut mener également à la génération de la vorticité.

L'interprétation physique et la classification de différents modèles de recirculation s'effectuent par la combinaison géométrique des parois fabriquées en PVC. D'autre part, la propriété classiquement mise en avant de la turbulence réside dans le processus de l'énergie qui explique la division des grands tourbillons en petits tourbillons à cause de la faible fréquence liée aux fluctuations, permettant le transfert de l'énergie des grandes échelles vers les petites échelles. En effet, ces petits tourbillons des coins amont restent de plus en plus courts et finissent par disparaître si le facteur de forme (L/B) est petit où ils sont associés à la grande fréquence déterminée par les forces visqueuses.

Dans la deuxième partie, une autre étude expérimentale a été conduite dans le réservoir rectangulaire peu profond afin d'examiner l'effet du nombre de Reynolds sur la dynamique des structures de l'écoulement superficiel à fond lisse et rugueux. Du point de vue physique, le nombre de Reynolds est relié à la recirculation qui permet de s'affranchir les effets de bords du plan horizontal générés de l'ordre de quelques centimètre. Néanmoins, la nature des courants tourbillonnaires en fonction de la géométrie de mesure ainsi que leurs effets sur le champ des vitesses ont été mentionnés.

Les résultats expérimentaux obtenus ont été analysés et discutés en détails. Toutefois, la vérification de l'effet de la géométrie du réservoir sur la distribution des vitesses de surface a été examinée pour les deux fonds.

En conclusion, les résultats expérimentaux présentent une partie principale de ce chapitre qui décrit les observations d'un écoulement turbulent sur fond lisse qui est beaucoup plus maîtrisé que sur un fond rugueux qui reste méconnu.

IV.4.1. Effet de l'écoulement sur la stabilité de la surface libre

L'étude de la nature de la stabilité de l'écoulement dans un réservoir peu profond a été examinée par la méthode *LSPIV* pour toute la série de géométries testées.

Notre travail de recherche dans un domaine d'analyse a été élargi dans le cadre de la prolongation d'une étude expérimentale déjà réalisée initialement par (Kantoush, 2008). En présence des surfaces de fond rugueux et lisse dans une installation physique que l'effet de la turbulence sur la stabilité du champ d'écoulement superficiel a été présenté. En outre, l'évolution spatiale et temporelle de ces perturbations longitudinales dans un écoulement bidimensionnel *2D* a été évaluée par la visualisation du déplacement du traceurensemencé à la surface libre différent du fond foncé du réservoir afin de restituer le sens de l'écoulement et les zones de recirculation. Ces particules blanches flottantes suivent les trajectoires de la masse liquide, le long du réservoir, en occasionnant un échange de quantité de mouvement lorsque la turbulence devient suffisamment développée.

La série d'essais effectuée sur un fond lisse ($\bar{k}_0 = 0.1mm$) montre la déviation du jet principal sur l'un des côtés du bassin mais à une certaine distance, il se détache pour décrire une configuration asymétrique. Comme le jet évolue de l'amont vers l'aval, l'augmentation de la vitesse entraîne une réduction de la pression locale qui a tendance à amplifier la déviation

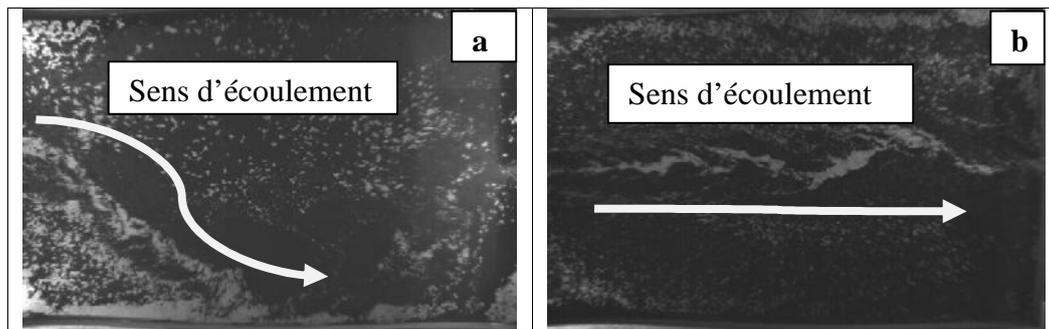
d'écoulement. La croissance du tourbillon du côté de la déviation latérale a donné lieu à un champ d'écoulement non symétrique comme il a été observé sur la (Figures 4. 11a). En outre, ce courant a pu montrer une portion supplémentaire du liquide qui se met en mouvement dans la direction de la déviation induisant une transition non symétrique sans aucun point de rattachement.

La série d'essais sur fond rugueux ($\bar{k}_0 = 2.8mm$) présente un jet rectiligne qui montre deux grands tourbillons symétriques sur chaque côté du bassin. En effet, ces deux tourbillons se propagent le long de l'axe central du bassin avec une distribution des vitesses moyennes de surface qui révèle une stabilité engendrée par un écoulement de cisaillement (Figure 4. 11b). Une fois amorcé, l'écoulement turbulent a tendance de se maintenir et continue à régénérer d'autres tourbillons qui se contractent au fur et à mesure qu'ils commencent à se dissiper. Ces observations expérimentales montrent clairement que la transition est, fortement, affectée par la turbulence d'un écoulement à surface libre.

Lorsque la séparation du lit se produit, la génération des lignes de courant ne dépendait que du nombre de Reynolds et du facteur de forme si on s'attend que le vortex soit dominé par des mécanismes non visqueux (Rockwell, 2008). Ces lignes de courant déterminées parallèlement au fond du bassin possèdent une importance particulière qui montre la coexistence de deux régions de vorticité avec des signes opposés. En effet, l'écoulement rotationnel généré à l'aval du bassin, se développe horizontalement vers l'amont avec deux grands vortex en respectant les vitesses de cisaillement entre le jet principal et la zone morte (Weitbrecht et al, 2002). Tandis que, la (Figure 4.12b) montre la caractéristique de l'écoulement en phase développé, en conséquence le champ des vitesses est complètement modifié. De ce fait, la formation d'une masse d'eau morte dans les angles du coin amont tourbillonne sur place sans participer à l'écoulement où il n'affecte que la partie centrale du réservoir. Par ailleurs, les tourbillons formés en région à forte turbulence commencent à se rapprocher de la couche visqueuse qui diminuent en intensité jusqu'à leur disparition complète, du fait de l'augmentation du gradient de vitesse.

L'invariabilité des quantités de mouvement à l'intérieur du jet montre qu'une vitesse maximale de ce jet varie inversement avec la distance axiale à partir de l'origine du courant. Cependant, la plupart des écoulements sont caractérisés par une faible profondeur ressemblant aux zones côtières et les grandes profondeurs stablement stratifiées en densité comme l'atmosphère et l'océan. (Stratifiées : qui peuvent être influencés par la rotation de la Terre).

En conclusion, la stabilité de la configuration d'écoulement peut facilement être établie en touchant légèrement à l'état initial. Cependant, toutes ces configurations présentées dans ce document ont été choisies parmi tant de configurations observées et caractérisées par une déviation vers la droite ou la gauche, dans le but de faciliter les comparaisons entre les différentes géométries testées.

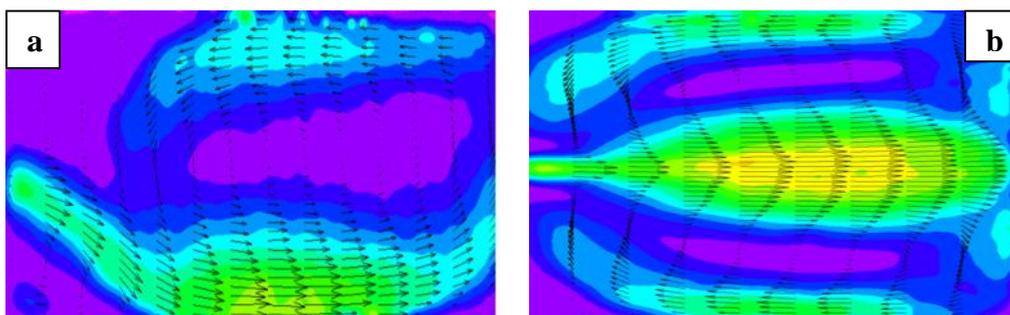


a) Fond lisse $\bar{k}_0 = 0.1mm$ b) Fond rugueux $\bar{k}_0 = 2.8mm$

Figure 4.11 : Visualisation de l'écoulement par une caméra numérique

$$Q = 7.0l / s, h = 0.200m, L = 6.00m, B = 4.00m$$

0.0 0.01 0.02 0.03 0.05 0.06 0.07 0.08 0.90 0.10 0.11 0.12 0.13 0.14 0.15 0.16 [m/s]



a) $\bar{k}_0 = 0.1mm$

b) $\bar{k}_0 = 2.8mm$

Figure 4.12 : Ecoulement de surface traitée par le logiciel Flow Manager

Développé par (Dantec Dynamics, A/S. 2007)

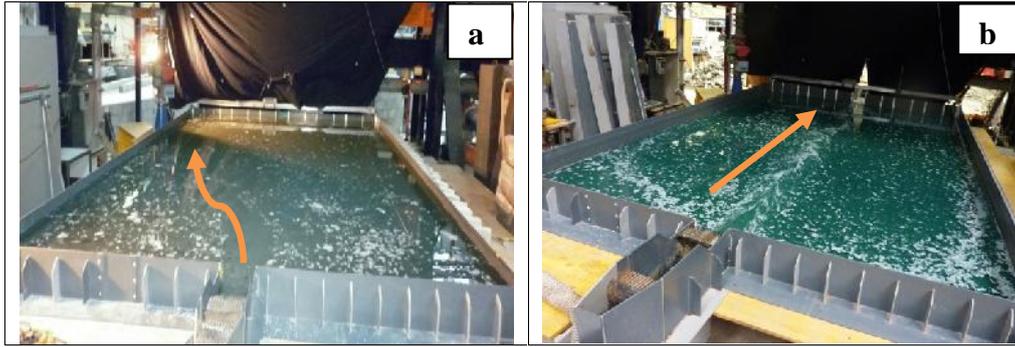
$$Q = 7.0l / s, h = 0.200m, L = 6.00m, B = 4.00m$$

IV.4.2. Effet de la rugosité sur le champ des vitesses superficielles

Dans les cours d'eau comme dans les bassins rectilignes à ciel ouvert, les écoulements possèdent un fond solide qui n'est jamais parfaitement lisse, il comporte des aspérités qui présentent des obstacles à ce mouvement. Dans cette étude, les vecteurs de vitesses et le mode d'écoulement rationalisent les résultats qui ont été utilisés pour suivre les trajectoires des tourbillons, en fonction du temps, afin de déterminer l'évolution du champ de vitesses.

Sur un fond lisse ($\bar{k}_0 = 0.1mm$), les vitesses issues du convergent étroit, se dirigent à travers le canal vers le large bassin qui sont orientées, sensiblement, sur le côté en formant une grande recirculation au centre du bassin (Figure 4. 13a). Ce type d'écoulement contient un nombre de tourbillons de taille variable qui fonctionne comme une région asymétrique, se caractérisant comme non stationnaire. En effet, ces modèles de configurations d'écoulement montrent qu'on peut observer une forte variabilité des grandeurs physiques dans l'espace et dans le temps. Ces écoulements turbulents peu profonds sont presque horizontaux, ce qui permet de supposer une distribution de pression, approximativement, hydrostatique. Néanmoins, à la même position de la profondeur les caractéristiques de la turbulence présentent un ensemble des vecteurs de vitesses instantanées qui deviennent un ensemble d'écoulement global. En effet, ces caractéristiques montrent une vue d'ensemble des vecteurs des vitesses pour des conditions géométriques prises symétriques. Ces vecteurs de vitesses asymétriques observés à la surface libre varient en direction d'une façon aléatoire ce qui signifie que les grandeurs physiques (vitesse et pression) varient dans le temps de manière aléatoire (Figure 4.14a). Ces vecteurs sont dirigés dans le sens longitudinal de l'écoulement où chacune de ces zones présente des vortex composant le mouvement tourbillonnaire. Pour plus de clarté, le champ de vitesses est présenté par une faible résolution que celle de la mesure (*1 vecteur sur 5*).

Sur un fond rugueux ($\bar{k}_0 = 2.8mm$), par contre, le jet cesse d'être dévier sur le côté pour redevenir rectiligne en présence de deux grandes configurations symétriques par rapport à l'axe central du réservoir (Figure 4. 13b). Par ailleurs, les deux petits tourbillons du coin commencent à se former dans la zone morte du coin amont pour accompagner les grands vortex centraux. Néanmoins, ils sont en diminution pour atteindre une vitesse approximativement nulle jusqu'à leur disparition complète au fur et à mesure que la longueur devient plus courte.



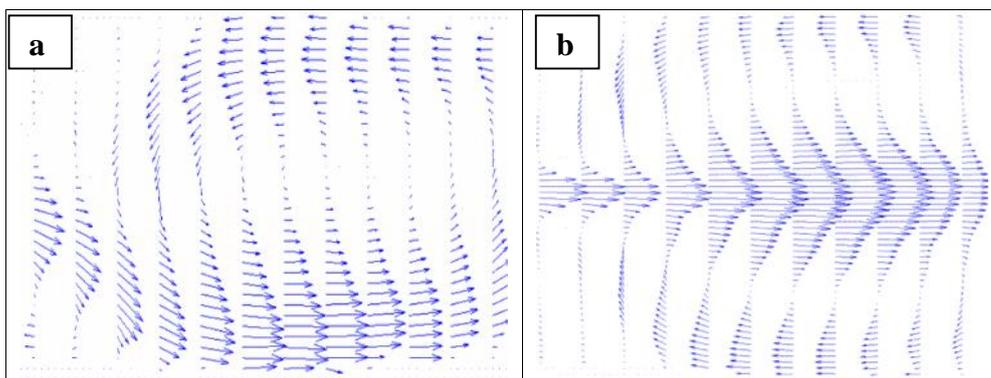
$$a) \bar{k}_0 = 0.1mm$$

$$b) \bar{k}_0 = 2.8mm$$

Figure 4.13 : Configuration d'écoulement dans le réservoir de référence

$$Q = 7.0l/s, h = 0.200m, L = 6.00m, B = 4.00m$$

La présence d'un fond rugueux entraîne un effet important sur l'écoulement superficiel qui devient un processus distribué dans la turbulence, lorsque le débit d'alimentation, la vitesse d'écoulement et la profondeur d'eau varient en fonction de l'espace et du temps (Nikuradse, 1933) & (Clorens, 2010). Cet effet rugueux occasionne un frottement sur le fond du réservoir pour étudier, dans un premier temps la composante de vitesses dans la zone externe qui devait être très peu affectée. Dans cette zone, les vecteurs de vitesses basculent vers une symétrie plus stable fortement corrélés afin d'observer le champ de recirculation symétrique (Figure 4. 14b). Toutefois, l'explication physique de l'effet de la rugosité sur la configuration du champ de vitesses reste confiner à la région interne proche du fond



$$a) \bar{k}_0 = 0.1mm$$

$$b) \bar{k}_0 = 2.8mm$$

Figure 4.14 : Vecteurs de vitesses longitudinales traitées par le logiciel de corrélation Flow Manager

En effet, la modification des configurations sont évoqués en détail par l'effet de la géométrie du réservoir à fond lisse et rugueux sur la recirculation des vitesses de surface.

En conclusion, dans un modèle expérimental d'entrée et de sortie symétrique, des écoulements asymétriques peuvent se développer sous certaines conditions de bords

IV.4.3. Effet du facteur de forme L/B

Dans la théorie des écoulements des liquides incompressibles ($\dots = cte$), la répartition des vitesses de surface ainsi que la forme des lignes de courant sont déterminées par la géométrie des parois latérales du réservoir limitant la surface d'écoulement (Comolet, 1963).

Durant notre étude expérimentale, l'effet de la surface du fond lisse et rugueux sur le champ des vitesses superficielles a été analysé par les combinaisons géométriques des murs du bassin. Ces combinaisons sont définies par un facteur de forme ($AB = L/B$) qui caractérise la géométrie du modèle et modifie sa recirculation. Par contre, le facteur d'élargissement ($ER = B/b$) permet de prédire la transition de l'instabilité asymétrique vers une symétrie plus stable, en raison du convergent entre le canal étroit et le bassin très large. L'analyse de ces combinaisons géométriques sur la transition du champ des vitesses superficielles permet de rappeler que l'effet des murs latéraux du réservoir a été considéré comme négligeable durant toute l'étude. Le déplacement et les changements des murs latéraux composés des plaques fabriquées en PVC donne lieu à différentes combinaisons géométriques afin de modifier les surfaces du réservoir rectangulaire afin de déterminer la nature de la recirculation. En effet, ces modèles d'écoulement rationalisent les tourbillons pour toutes les séries d'essai à fond lisse et rugueux. Par ailleurs, le contrôle de la turbulence sur fond lisse et rugueux a suscité de nombreux intérêts car ils répondent à certaines exigences de la modélisation des structures des écoulements bidimensionnels. Cependant, la transition de l'instabilité de la recirculation a été étudié par Chen & Jirka, (1995 et 1998) pour montrer, que le domaine de la stabilité de l'écoulement latéralement cisailé est déterminé, théoriquement, par la résolution de l'équation d'Orr-Sommerfeld moyennée la profondeur d'eau. Dans un élargissement brusque, l'analyse de l'effet du facteur de forme du réservoir peu profond sur l'instabilité linéaire des écoulements bidimensionnels a été analysée par Mizushima & Shiotani (1996 et 2001) pour un nombre de Reynolds modéré. En effet, la nature de l'instabilité des configurations asymétriques peut être provoquée par les effets de la forme du bassin (Rockwell, 2003).

Dans la littérature, des travaux de recherche ont été analysés afin de mettre en évidence l'effet de la rugosité du lit du réservoir sur la turbulence des écoulements extérieurs. Cette littérature a fait référence aux conclusions d'analyse de beaucoup de travaux réalisés, particulièrement, par (Chen & Jirka, 1997; 1998 et 2002), (Ghidaoui & Kolyshkin, 1999), (Uijtewaal et al, 2003) & (Chu et al, 2004). En effet, l'augmentation du rapport longueur/largeur peut conduire à un écoulement asymétrique si le nombre de Reynolds est constant comme il a été mentionné par (Mizushima et Shiotani, 2001) & (Dewals et al, 2008).

En conclusion, pour un facteur de forme ($L/B = 1.5$), la transition d'un écoulement asymétrique dans le réservoir géométriquement symétrique est observée.

- **Sur fond lisse** $\bar{k}_0 = 0.1mm$

La classification des modèles d'écoulements donnent lieu à des combinaisons géométriques utilisées dans les essais. En effet, la première série d'essais a été menée sur un fond lisse pour une longueur supérieure à la largeur du bassin ($L = 6.00m$ et $B \leq 4.00m$) afin d'examiner l'influence d'une largeur variable ($B = 0.5m, 1.00m, 2.00m, 3.00m$ et $4.00m$) sur le champ de l'écoulement extérieur pour un facteur de forme ($B/L = 12.0, 6.0, 3.0, 2.0$ et 1.5). La classification des modèles d'écoulements donnent lieu à des combinaisons géométriques utilisées dans les essais. Le jet du départ est initialement développé dans une configuration symétrique produit par une turbulence fortement influencée par le rapport de forme (L/B). Par ailleurs, les vitesses superficielles à la surface libre ont été visualisées par le traceur d'une couleur différente du fond du réservoir afin de reproduire le sens des lignes de courant qui peuvent apparaître comme des tourbillons dans un écoulement turbulent bidimensionnel.

Les résultats montrent que les particules blanches flottantes suivent les trajectoires le long du réservoir lorsque le nombre de Reynolds est suffisamment développé, en occasionnant un échange de quantité de mouvement. Au voisinage de la surface libre, la cellule transporte l'énergie et la quantité de mouvement de la paroi vers le centre du réservoir (de la zone de haute production d'énergie) par les petits tourbillons du coin au voisinage du fond. En effet, ce type d'écoulement est largement rencontré dans les régions des flux environnementaux et les rivières ainsi que dans les barrages-réservoirs peu profonds. Cependant, pour une entrée et sortie symétrique, la recirculation maintient sa symétrie au-dessous de la bissectrice du bassin et suivant les positions des tourbillons observés à la surface libre. Par cette approche que la stabilité linéaire en écoulement peu profond a été décrite dans un bassin de forme rectangulaire et géométrie variable. Dans ce cas, l'amplitude

de la vitesse est augmentée à proximité de la paroi du canal et l'écoulement présente un débit asymétrique instable (Dufresne et al., 2010).

En conclusion, les résultats proposent des directives pour suivre l'exploration amorcée nécessitant plus d'applications afin d'envisager des écoulements qui ne sont plus développés.

- **Pour $AR=L/B=12$**

L'effet d'une largeur réduite ($B = 0.50m$) sur le champ d'écoulement superficiel ne définit pas les lignes de courant non observées mais lorsque le jet se stabilise dans le réservoir, la zone centrale devient clairement intense et visible à l'œil nu (Figure 4.15).

Malgré que l'écoulement ne soit pas très bien défini, le courant a tendance à s'orienter vers une asymétrie pour un facteur de forme ($L/B = 12$) et une longueur ($L = 6.00m$). Par ailleurs, avec une longueur du réservoir supérieure à sa largeur ($L = 6.00m$ et $B \leq 4.00m$), l'essai n°1 montre une prédisposition d'un écoulement asymétrique qui peut basculer vers une symétrie plus stable pour un facteur d'élargissement diminué ($B/b = 2$). A l'entrée du bassin, la vitesse moyenne augmente la probabilité de la diminution de la génération du gradient de pression responsable de la recirculation. Alors que toute la masse d'eau observée est en plein mouvement ce qui empêche la stagnation de l'eau dans les coins amont de la zone morte. L'apparition d'une configuration légèrement asymétrique devient, évidemment, de plus en plus marquée avec un jet principal qui se dirige de la sortie du canal étroit vers le bassin rectangulaire plus large

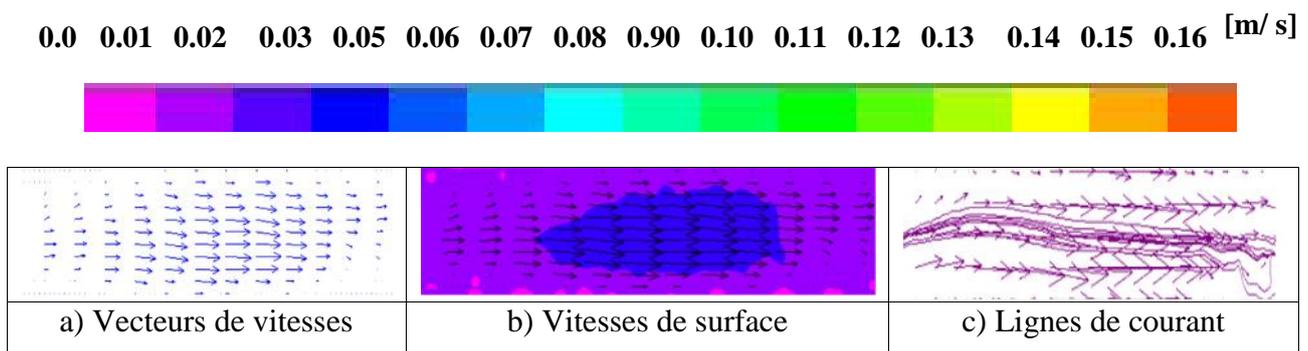


Figure 4.15 : Lignes de courant dans le champ d'un écoulement extérieur

$$\bar{k}_0 = 0.1mm, L = 6.00m, B = 0.50m, Q = 7.0l/s, h = 0.200m$$

Cela peut être expliqué par le rapprochement de la largeur du bassin avec celle des parois latéraux du canal ($B \approx b = 0.25m$) qui peut justifier l'augmentation des vitesses d'écoulement conduisant à une diminution de la pression locale (Dewals et al., 2008).

En conclusion, les caractéristiques géométriques du réservoir ainsi que les vitesses moyennes longitudinales ont une importance significative sur l'écoulement bidimensionnel.

- **Pour $AR=L/B=6$**

Par l'augmentation de la largeur du bassin ($B = 1.00m$), un autre essai a été mené pour examiner l'effet du fond lisse sur le champ d'écoulement superficiel. Cette augmentation devient plus marquée afin de montrer les vitesses de surface visualisées par le traceur de couleur blanche qui peut reproduire le sens des lignes de courant. A la surface libre, ce mouvement est plus lisible que précédemment en favorisant le développement d'une grande zone située au centre du bassin (Figure 4.16). En effet, ce jet peut apparaître comme des tourbillons dans un écoulement turbulent bidimensionnel qui commence à virer sur le côté pour un facteur de forme ($L/B = 6m$). L'apparition de la configuration asymétrique devient plus visible lorsque le jet principal commande l'ensemble de l'écoulement. Dans un tel écoulement, les lignes de courant sont apparentes et ne sont déterminées que par la forme de la paroi latérale du réservoir.

La direction du jet devient plus lisible et prend une allure de plus en plus ovale en générant un mouvement rotationnel beaucoup plus développé afin de dominer l'ensemble de l'écoulement. Tandis que, la formation des petits tourbillons dans l'un des deux coins amont est moins déchiffrable avec des vitesses de surface issus de la sortie du convergent étroit se dirigeant vers le large bassin. A une certaine distance de l'entrée du réservoir, ces vitesses sont sensiblement orientées sur le côté pour donner une configuration asymétrique. Toutefois, ces courants sont produits par l'anisotropie de la turbulence liée à la géométrie du bassin et aux conditions de bords du réservoir (fond, parois et surface libre). En effet, les quantités à faibles mouvements sont transportées vers le centre de l'écoulement par les courants tourbillonnaires du voisinage de la paroi solide. Lors du passage du jet à travers le canal de sortie, l'écoulement se détache pour une déviation latérale et les vitesses dans le réservoir sont plus grandes en ligne droite. Ce modèle est noté asymétrique qui peut être expliqué par les légères perturbations en conditions initiales et aux limites. Le développement d'un tel écoulement devient clairement lisible qui se traduit par une seule grande zone de recirculation, en dépit des conditions géométriques expérimentales initialement identifiées

symétriques. Dès lors, les vitesses de surface sont bien tracées et deviennent intenses bien que la formation des petits tourbillons dans l'un des deux coins amont reste à peine moins lisible.

En conclusion, la largeur du bassin entraîne un effet important sur la modification de l'écoulement, montrant une asymétrie persistante dans la zone de mesure

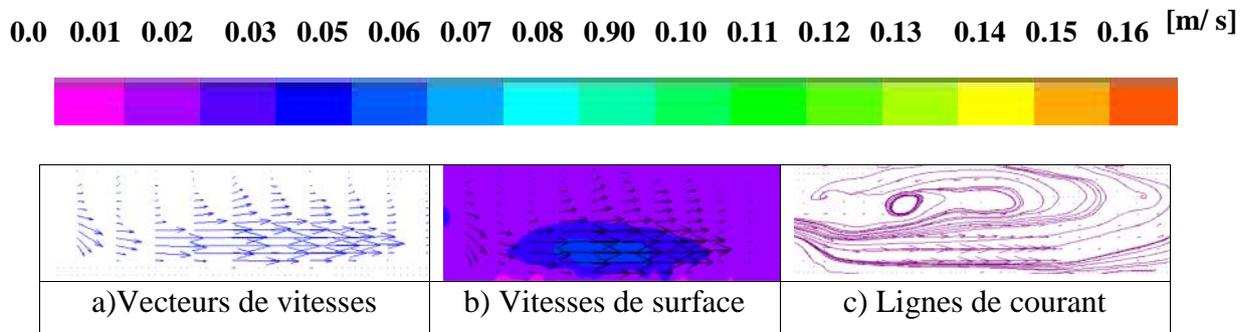


Figure 4.16 : Lignes de courant dans le champ d'un écoulement extérieur

$$\overline{k_0} = 0.1mm, L = 6.00m, B = 1.00m, Q = 7.0l/s, h = 0.200m$$

- **Pour $AR=L/B=3$**

Tout changement brusque dans la section du courant liquide provoque, sans cesse, une diminution dans la perte d'énergie depuis l'élargissement brusque jusqu'à la section élargie du bassin. Par la suite, les particules liquides tendent à conserver leurs vitesses qui heurtent celles qui les précèdent, donnant naissances à des tourbillonnements.

Après le rétablissement de l'écoulement, le jet jaillissant du canal étroit tend à entrer continuellement d'une manière assez courbée jusqu'à sa stagnation sur l'un des deux côtés du réservoir. Selon les conditions d'essai, la déviation observée sur le coté (droit ou gauche) peut-être incertain, dépendant de légères perturbations existantes en conditions initiales et aux limites où il n'y a aucun effet systématique comme il a été décrit par Kantoush et al., (2006 et 2007). Dans ce cas, l'écoulement sépare la paroi du bassin et induit une recirculation asymétrique plus stable pour un facteur de forme ($AR = L/B = 3$), ce qui reflète une partie de la stabilité en raison de l'augmentation de la largeur du réservoir. Cependant, une phase de transition de gauche vers la droite avec la désélection du jet où une nouvelle paire de tourbillons dans les coins en amont avec une taille de l'ordre de la largeur de la géométrie. Par ailleurs, la taille de la zone du coin accroît avec l'augmentation du facteur de forme jusqu'à ce qu'elle devienne instable, par la suite se décompose en produisant d'autres tourbillons plus petits. Bien entendu, le passage à cette instabilité est déterminé par la modification de la

direction du courant principal qui entraîne l'apparition spontanée des vortex longitudinaux. Par ailleurs, l'écoulement montre un nombre de zones en plein développement qui donne lieu à une configuration asymétrique si le facteur d'élargissement devient plus grand ($ER = B/b = 8$). Cette recirculation commence, par la suite, à s'agrandir par rapport au cas précédent, formant un grand vortex au centre du bassin, dominant l'ensemble d'écoulement. L'asymétrie est positive par rapport à la bissectrice du coin, elle devient négative le long de la paroi latérale qui est à l'origine de l'écoulement secondaire du coin amont. Ces petits tourbillons situés dans la zone morte deviennent de plus en plus bien dessinés et changent alternativement de forme et de taille en contrôlant l'emplacement du tourbillon principal situé au centre du bassin. Ils tournent plus lentement dans le sens contraire des aiguilles d'une montre comme il a été indiqué dans la (Figure 4.17).

L'instabilité du régime d'écoulement est dominée par un comportement asymétrique résultant, principalement, de la croissance des troubles en conditions initiales et aux limites. Ces conditions sont les différentes valeurs prises, initialement, aux parois de l'installation expérimentale identifiée géométriquement symétrique. Lorsque l'amplitude de la vitesse est augmentée à proximité de la paroi du bassin, l'écoulement asymétrique mène à une augmentation de la vitesse du côté du jet donnant lieu à une pression locale réduite qui tend à amplifier la perturbation résultant de l'écoulement (effet Coanda). Ce jet Coanda est défini comme un courant le long de la paroi tendant à rétablir l'effet de la symétrie de l'écoulement. Alors que ce comportement conduit à une pression locale réduite dans cette région qui à son tour a tendance d'augmenter, alternativement, la déviation de l'écoulement. Simultanément, dans le jet dévié, une augmentation de la vitesse mène aux forces centrifuges accrues, qui tend à rétablir la symétrie d'écoulement où un équilibre est atteint entre ces deux effets. Les résultats obtenus par (Kantoush, 2008) dévoilent une zone très sensible de transition aux perturbations extérieures induisant des configurations non symétriques. Par ailleurs, le phénomène de l'asymétrie est dû, principalement, à une décélération de la vitesse axiale sur la ligne centrale qui peut être expliqué par l'augmentation de la vitesse de l'eau du côté de la déviation.

En conclusion, toutes les configurations n'ont pas été choisies parmi les modèles d'écoulement caractérisés par la déviation du jet vers le côté pour faciliter les comparaisons entre les différentes combinaisons géométriques

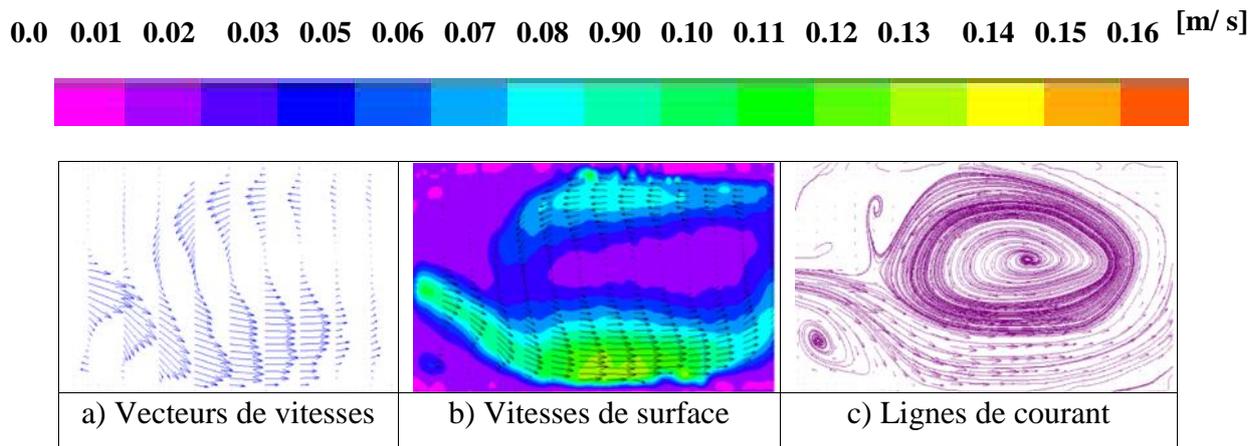


Figure 4.17 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement extérieur

$$\bar{k}_0 = 0.1mm, L = 6.00m, B = 2.00m, Q = 7.0l/s, h = 0.200m$$

- **Pour $AR=L/B=2$**

L'objectif de cette analyse est de présenter l'effet de la géométrie du réservoir rectangulaire peu profond sur le champ de l'écoulement symétrique et asymétrique. Les observations à travers un élargissement brusque sont données par les résultats d'essais analysés avec un facteur de forme ($AR=L/B=2$) pour une largeur plus grande que précédemment ($B=3.00m$). Cependant, plusieurs paramètres du réservoir à large échelle sont donnés dans ce chapitre par une description des écoulements de recirculation.

La formation d'une grande recirculation plus intense a été observée au centre du bassin juste au-dessus de la bissectrice pour une augmentation du facteur d'élargissement ($B/b=12$). L'emplacement et la taille des tourbillons montrent une déviation latérale observée sur l'un des deux cotés préférentiel du jet. Dans ce cas, nous dénombrons deux tourbillons au-dessous de la bissectrice du coin amont, occupant des petites places comparables à celle qu'occupe la grande cellule de la surface libre, activée par l'homogénéité de la surface du fond et la surface libre (Labioud, 2005). Alors que, les deux petits tourbillons possèdent une intensité de vitesse très faible à l'amont du bassin, qui se trouve dans un état presque hydrostatique. Ils se dirigent vers l'aval le long de la bissectrice pour une combinaison géométrique réduite. Tandis qu'au voisinage de la surface libre, la zone de surface transporte l'énergie et la quantité de mouvement de la paroi vers le centre du réservoir. Alors qu'au voisinage du fond du bassin, elles sont transportées du coin (la zone de

haute production de l'énergie) par la cellule du coin vers le milieu du réservoir. Compte tenu de l'augmentation du gradient plus intense du frottement au fond. Cependant, les deux petites zones qui se sont formées dans la zone morte amont sont caractérisées par un système de recirculation assez lent et se dirigent le long de la bissectrice, bien qu'elles soient séparées l'une de l'autre qui sont en rotation dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. Nous remarquons, par ailleurs, que la cellule de gauche a presque disparu (ces conditions sont les différentes valeurs prises à la paroi) et la configuration d'écoulement peut être facilement établie en adaptant doucement les conditions initiales et aux limites à une pression locale réduite (Figure 4.18c).

Le décollement du jet peut être expliqué par une augmentation des vitesses du côté de la déviation du courant menant à une pression locale réduite, qui tend à amplifier, alternativement, l'écoulement. Ces observations évoquées sont compatibles avec les configurations examinées par (Camnasio et al., 2011) et confirmés par les analyses d'essais données par (Dufresne et al, 2010) qui a étudié les quatre configurations du réservoir (A_1). Tandis que les simulations numériques ont montrées que l'asymétrie peut être expliquée par la sensibilité des conditions aux limites entre l'écoulement au centre du bassin et la zone morte des deux coins amont (Dewals et al., 2008). En effet, l'écoulement devient sensible aux conditions de bords pour le même rapport d'élargissement montrant que la recirculation diminue en taille lorsque le Reynolds est en augmentation.

En conclusion, les résultats montrent la tendance de la configuration asymétrique qui se développe en dépit d'une installation symétrique sous l'effet des conditions géométriques.

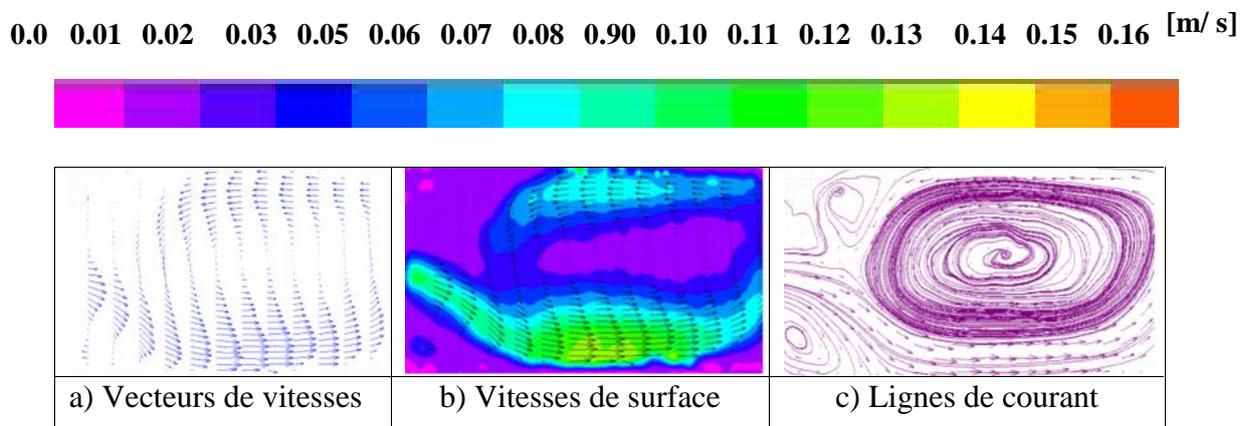


Figure 4.18 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement extérieur

$$\overline{k_0} = 0.1mm, L = 6.00m, B = 3.00m, Q = 7.0l/s, h = 0.200m$$

- *Pour $AR=L/B=1.5$*

L'effet particulier de la géométrie de différents modèles sur le champ d'un écoulement extérieur a été analysé sur un fond lisse pour un facteur de forme ($L/B = 1.5$). La zone de séparation des deux côtés montrée par le sens des vitesses examinée dans la région de recirculation pour un rapport d'élargissement constant ($B/b = 16$). L'expérience a montré que la perturbation s'amplifie au coin du bassin et envahit l'écoulement aval, par conséquent, les vitesses subissent d'importantes variations continues en intensité et en direction. Collectivement, une augmentation de la vitesse de ce jet dévié sur le côté mène à un accroissement de forces centrifuges accrues qui tendent à rétablir la symétrie. La stabilité de l'écoulement peut facilement être établie en touchant légèrement à l'état initial qui mène à une augmentation de la vitesse du courant et donne une pression locale assez réduite où un équilibre est atteint entre ces deux effets (Kantoush, 2008), (Dewals et al., 2008) & (Dufresne et al., 2010). L'écoulement du fluide se caractérise par une pression locale réduite inférieure à la pression ambiante qui entraîne une fixation de l'écoulement à la paroi du bassin. Ce type d'écoulement est omniprésent dans les fleuves, les estuaires, les zones côtières et les réservoirs de stockage.

Sur un fond lisse ($\bar{k}_0 = 0.1mm$) le jet commence à pénétrer dans le réservoir qui est beaucoup plus large que le convergent d'entrée, donnant lieu à une déviation sur l'un des deux côtés du bassin. Le choix préférentiel de l'orientation du jet est aléatoire et peut être expliqué par de faibles perturbations existantes en conditions initiales et aux limites (Kantoush, 2008) & (Dufresne et al., 2010). A l'intérieur et aux alentours du jet, la pression se maintient constante de manière à ce que la quantité de mouvement reste inchangée dans le sens axial. Néanmoins, une intense activité a été remarquée du côté de la déviation du jet, caractérisé par le développement d'un tourbillon unique et plus stable occupant la majeure partie de la section (Figure 4.19). Cependant, la zone située au centre du bassin est souvent désignée comme une zone de surface à large échelle qui est fortement activée par l'anisotropie produite par la surface de l'eau. Son effet sur la distribution des vitesses longitudinales est très marqué avec une grande zone centrale, s'accompagnant de deux autres zones de forme triangulaire situées dans les deux coins amont de la zone morte.

Les configurations géométriques étudiées permettent de déduire que la formation d'écoulement multicellulaire est observée à partir d'un facteur de forme ($L/B \geq 1.5$) où l'écoulement est noté asymétrique. Ces observations sont similaires aux résultats décrits par

(Kantoush, 2008) et confirmés par (Camnasio et al., 2010). L'augmentation de la vitesse tend à accroître périodiquement la déviation du jet et l'accroissance du petit tourbillon du coin, conduit à l'augmentation de sa taille comparant avec le deuxième côté. L'écoulement asymétrique commence à se maintenir une fois, ces petits tourbillons sont rétablis, où leur taille dépend, essentiellement, des dimensions géométriques du bassin. Conjointement, une accélération axiale de la vitesse entraîne une augmentation des forces centrifuges qui tend à rétablir la symétrie d'écoulement où à l'état stationnaire entre ces deux effets un équilibre est atteint. L'écoulement observé ne diffère pas de ce qui a été expliqué précédemment, sauf que la taille du tourbillon central est beaucoup plus développée que les petits vortex des coins. Par ailleurs, les configurations présentées n'ont pas été choisies parmi les écoulements caractérisés par la dispersion sur le côté pour montrer que la déviation est aléatoire.

En conclusion, deux écoulements différents peuvent se développer sous certaines conditions géométriques et hydrauliques avec la même rugosité de fond et le même facteur de forme ($L/B = 1.5$).

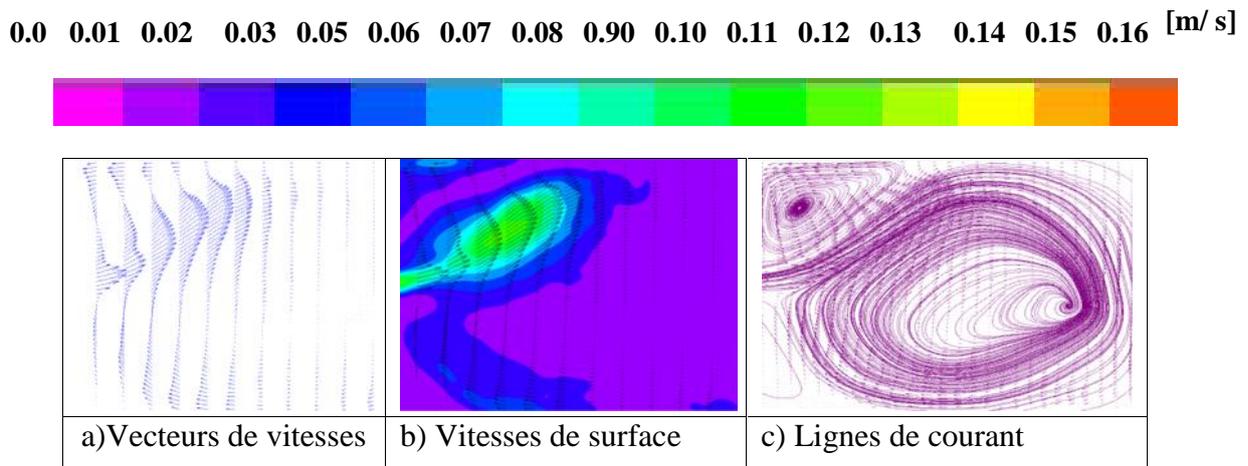


Figure 4.19 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement extérieur

$$\overline{k_0} = 0.1mm, L = 6.00m, B = 4.00m, Q = 7.0l/s, h = 0.200m$$

- **Pour $AR=L/B=1.25$**

Plusieurs combinaisons géométriques ont été calculées pour décrire le champ des vitesses superficielles pour différentes longueurs donnant lieu à un facteur de forme décroissant avec une description détaillée du procédé donnée, systématiquement, par la variation de l'effet de la longueur et la largeur du bassin. A travers l'élargissement brusque, le jet principal jaillissant du canal étroit tend à entrer continuellement dans bassin jusqu'à sa

stagnation pour une largeur constante ($B = 4.00m$). Après la stabilité de la surface libre, l'écoulement se détache latéralement le long de l'axe central réduit à la longueur ($L = 5.00m$) avec la formation d'un couple de remous sur chaque côté de la section du réservoir rectangulaire pour un rapport de forme ($L/B = 1.25$). Une telle configuration développée au centre du bassin domine l'ensemble d'écoulement lorsque les particules liquides tendent à conserver leurs vitesses qui heurtent celles qui les précèdent. La taille des deux zones tourbillonnaires situées dans la région hydrostatique augmente avec l'accroissement du rapport de forme jusqu'à ce qu'elles deviennent instables puis elles se décomposent en produisant d'autres vortex plus petits. Ces petits vortex comparables à ceux qu'occupent les plus grands au centre de la section, deviennent activer non seulement par la surface libre mais aussi par l'homogénéité et l'isotropie du fond du bassin (Labioud, 2005).

Les résultats d'essais montrent l'observation des lignes de courant analysées qui sont déterminées par la forme de la surface du fond. En donnant un aperçu sur les lignes de courant développées dans un bassin à large échelle, l'asymétrie disparaît complètement lorsque la longueur du bassin diminue et devient variable comme il est montré dans la (Figure 4.20). Simultanément, le jet principal conduit à une augmentation de la vitesse menant à la diminution des forces centrifuges qui tendent à rétablir la symétrie (Dewals et al., 2010). Par ailleurs, le nombre de recirculations a augmenté de trois zones à quatre zones de chaque côté du bassin.

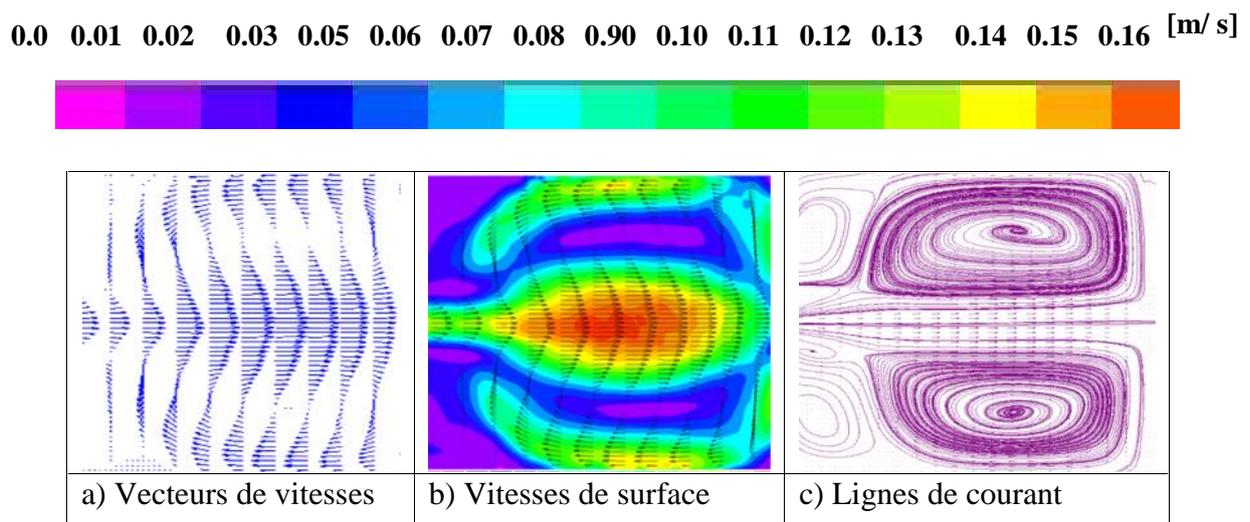


Figure 4.20 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement extérieur

$$\bar{k}_0 = 0.1mm, L = 5.00m, B = 4.00m, Q = 7.0l/s, h = 0.200m$$

Cette symétrie a été évoquée par l'analyse de (Dufresne et al., 2008) dans des quatre configurations des petits réservoirs ($(d)S_0$). Au voisinage de la surface libre, le tourbillon de surface transporte l'énergie et la quantité de mouvement de la paroi vers le centre du bassin. Alors qu'au voisinage du fond, elles sont transportées du coin (la zone de la haute production de l'énergie) vers le milieu du bassin par le tourbillon du coin. Dans cette tendance, le côté droit paraît être stable et semble beaucoup plus grand dans la taille que celui de gauche. Ce comportement d'écoulement a été évoqué par (Kantoush, 2008) et confirmé par (Dufresne et al., 2010) & (Camnasio et al., 2011).

En conclusion, les résultats auxquels nous nous sommes parvenu, ont montré que le régime d'écoulement influence significativement les vitesses extérieures qui deviennent sensible aux conditions de bords.

- **Pour $AR=L/B=1.0$**

L'effet de la paroi à fond lisse sur le champ d'écoulement extérieur a été examiné pour une longueur réduite à l'égalité des deux dimensions du bassin ($L = B = 4.00m$) avec un facteur d'élargissement demeurant constant ($B/b = 16$). Par contre, lorsque le jet devient régulier, il décrit une configuration symétrique plus stable pour un facteur de forme unitaire ($B/L = 1$), occupant la totalité du réservoir. Dans ce cas, le nombre de zone se réduit à deux tourbillons le long de la ligne médiane du bassin peu profond avec une taille homogène. Tandis que les deux petits tourbillons observés dans les coins amont du réservoir donnent naissance à une masse d'eau morte qui tourbillonne sur place sans participer à l'écoulement et n'affecte que la partie centrale constituant l'eau vive. Alors que les tourbillons formés en région turbulente, se rapprochent de la couche visqueuse et commencent à diminuer en intensité jusqu'à la disparition complète, du fait de l'augmentation du gradient de vitesses. Concernant l'échelle temporelle, les petits tourbillons, se dissipent après seulement une rotation sur eux-mêmes (ce qui est de l'ordre d'une fraction de seconde) que les grands tourbillons à large échelle (Figure 4.21). En effet, la stabilité de l'écoulement peut facilement être établie en touchant légèrement à l'état initial. Cette observation a été évoquée par (Dufresne et al., 2010) afin d'analyser les quatre configurations symétriques (S_0) et asymétriques (A_1) dans les deux petits réservoirs. Pour toutes les combinaisons testées, le développement du modèle symétrique est dû en grande partie au ralentissement de la vitesse axiale autour de l'axe central du réservoir.

En conclusion, les résultats obtenus révèlent la présence d'un écoulement symétrique avec un jet de surface rectiligne présentant deux grands vortex au centre du bassin

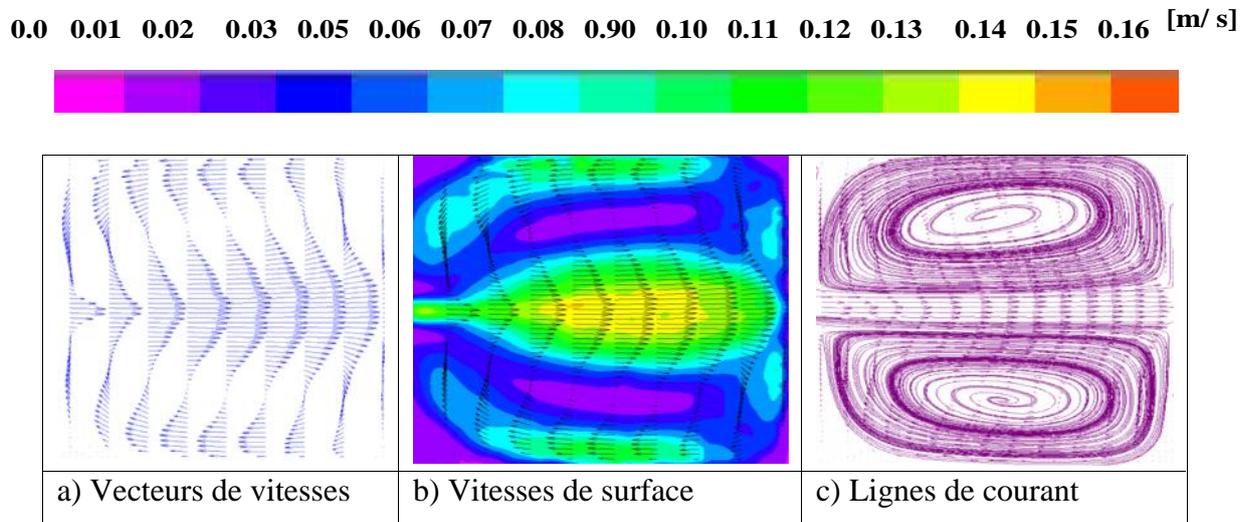


Figure 4.21 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement extérieur

$$\overline{k_0} = 0.1mm, L = 4.00m, B = 4.00m, Q = 7.0l/s, h = 0.200m$$

- **Pour $AR=L/B=0.75$**

Pour les longueurs courtes, l'écoulement demeure symétrique, avec une seule zone de recirculation sur chaque côté de la ligne centrale du bassin. Par ailleurs, les deux tourbillons coexistent dans le bassin qui interagit avec le jet où ce dernier possède une certaine tendance d'onduler le centre du réservoir pour un facteur de forme réduit à la valeur ($L/B = 0.75$). Ces tourbillons centraux avec une recirculation plus longue contrôlent, belle et bien, l'écoulement principal en montrant la régularité du jet principal dans sa direction droite et rectiligne vers la sortie de chaque côté comme le montre la Figure (4.22).

Les résultats d'une longueur intermédiaire dans la section rectangulaire correspondent à un facteur de forme ($L/B \leq 1.5$) pour un facteur d'élargissement qui se maintient toujours constant ($B/b = 16$) en donnant lieu à un champ symétrique stable. Lorsque la largeur du bassin est plus grande que sa longueur, la disparition complète des petits tourbillons situés dans les coins amont où un modèle symétrique émerge par rapport à la ligne médiane dépendant de sa longueur. Les deux zones de recirculation observées, précédemment, dans les angles du réservoir commencent à disparaître au fur et à mesure que la longueur du bassin est diminuée. Leur position est montrée clairement par les lignes de courant. Cette hypothèse

stipule que la variation transversale de la vitesse est plus importante sur un fond lisse qu'un fond rugueux (Dufresne et al., 2010). En effet, l'indépendance du jet peut être expliquée par l'augmentation des vitesses du côté de la déviation qui mène aux forces centrifuges accrues dans la section de mesure. L'interaction en sens inverse entre la rotation de la paire de tourbillons située au centre du bassin et ceux situés aux coins amont ralentissent les vitesses de surface ce qui provoque la disparition de l'énergie cinétique.

En conclusion, l'état actuel des connaissances concernant l'ampleur des effets de la rugosité du fond sur la turbulence n'a jamais été très bien maîtrisé durant toutes ces décennies.

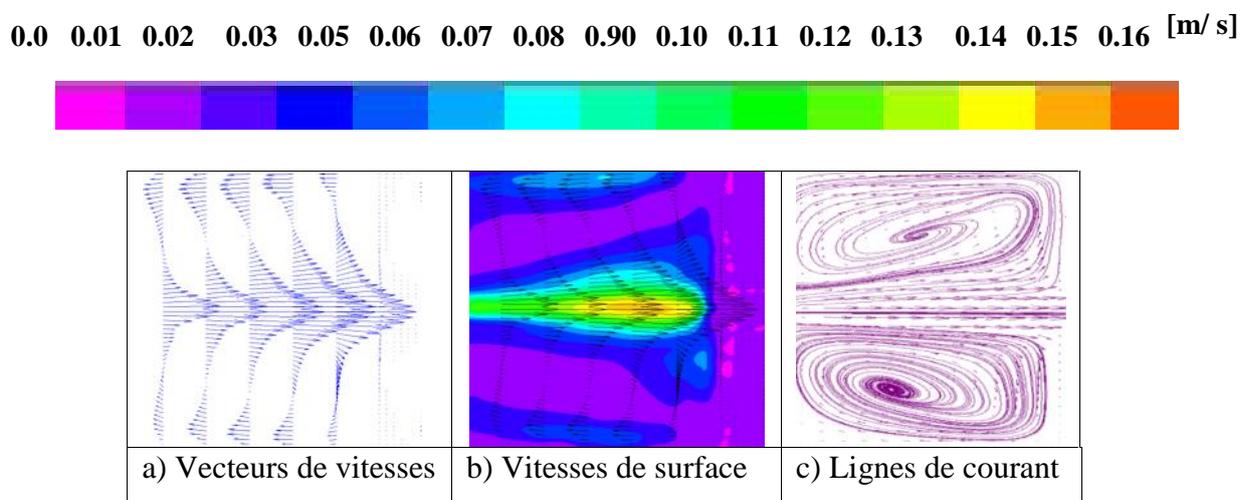


Figure 4.22 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement extérieur

$$\overline{k_0} = 0.1mm, L = 3.00m, B = 4.00m, Q = 7.0l/s, h = 0.200m$$

- Pour $AR=L/B=0.5$

Tout changement dans la section du modèle provoque, sans cesse, une diminution de la perte d'énergie depuis l'élargissement brusque jusqu'à la section élargie du bassin. En effet, si la longueur du bassin est prise plus courte, le courant principal fournit par le convergent, à travers une entrée symétrique, présente un écoulement essentiellement homogène et identique. Par ailleurs, la formation d'une zone de recirculation le long de la ligne centrale montre l'apparition des lignes de courant qui sont plus accomplies au milieu du réservoir pour un débit moyen d'alimentation ($Q = 7,0l/s$) et une profondeur d'eau ($h = 0.200m$).

Si la longueur du bassin est réduite ($L = 2m$) pour un facteur de forme ($L/B = 0.5$), nous comptons une formation de deux zones de recirculation au-dessous de la bissectrice du coin amont où les deux petits de forme triangulaire ont complètement disparu (Figure 4.23). Par ailleurs, ce nombre de tourbillons reste constant et l'écoulement est plutôt symétrique par rapport à l'axe du réservoir. Cependant, l'écoulement stagnant dans la zone morte, donne lieu à deux petits tourbillons qui ont complètement disparu pour une largeur constante ($B = 4m$). Néanmoins, ce qui précède fournit une vue qualitative et quantitative de la mise au point de l'envergure et par fractions des structures tourbillonnaires. Ces vitesses de surface mesurées par Lee et al., (2002) ont montré qu'elles sont de bonne qualité avec une erreur maximale estimée à 10%. Par ailleurs, le nombre de tourbillons devient plus grand pour une longueur plus petite. L'évolution des particules liquide à la surface est illustrée dans les figures ci-dessous, montrant la présence des structures tourbillonnaires secondaires, principalement, qui entoure les noyaux de la paire du vortex primaire. Ces structures sont soumises à une amplification en raison de la transition de la paire du tourbillon en écoulement turbulent pleinement développé à une distance courte de l'entrée du bassin rectangulaire. Pour toutes les géométries testées, le jet du départ est initialement développé dans une configuration symétrique.

Nous pouvons conclure que la longueur du réservoir joue un rôle essentiel dans la détermination de la configuration de l'écoulement

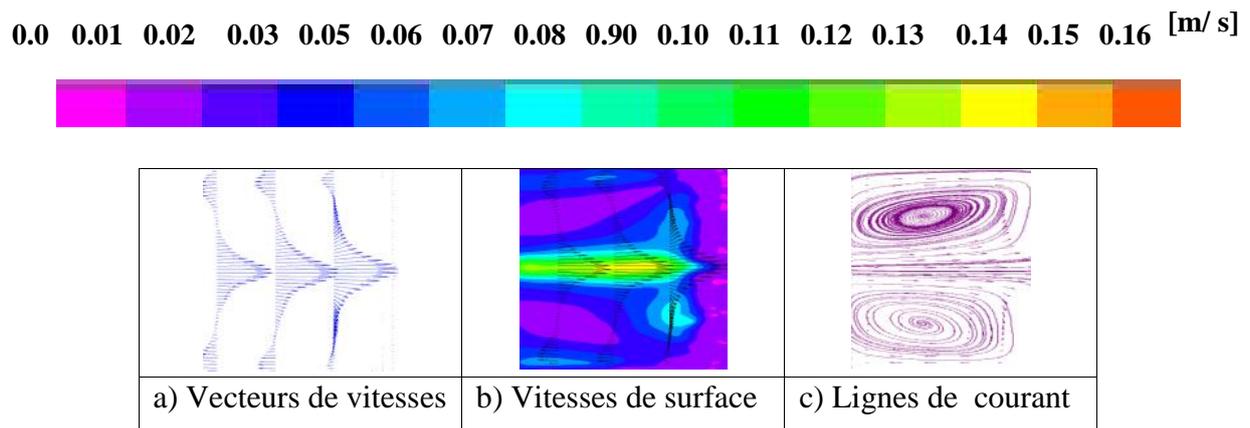


Figure 4.23 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement extérieur

$$\overline{k_0} = 0.1mm, L = 2.00m, B = 4.00m, Q = 7.0l/s, h = 0.200m$$

- **Sur fond rugueux** $k_0 = 2.8mm$

Après l'ajout d'une rugosité au fond du bassin, la turbulence devient plus réduite en provoquant une croissance du gradient de vitesse par rapport au débit d'écoulement (Kantoush, 2008). Pour mettre en évidence l'effet de la rugosité du fond sur le champ des vitesses extérieures, une série d'essais a été menée sur un fond de rugosité homogène. Avant d'aborder l'analyse des résultats sur un fond rugueux, il nous a paru utile de donner quelques explications servant comme outil de diagnostic de la méthode *LSPIV* utilisée dans l'examen de la validité des modèles de recirculation.

L'introduction d'une surface rugueuse sur fond lisse d'épaisseur ($e_A = 6.2mm$) affecte l'écoulement, en conduisant à de grandes intensités turbulentes dans le voisinage de la paroi (Lee & Zung, 2007). Dans l'esprit de cette hypothèse, l'effet du frottement du fond sur la stabilité linéaire basée sur la solution de l'équation des eaux peu profondes a été présenté par (Guidaoui & Kolyshkin, 1999). Par contre dans les bassins à grande largeur, les écoulements peuvent jouer un rôle important dans l'échange de quantité de mouvement transversal qui contrôle le frottement (Jirka, 2001). Par modélisation numérique et essais expérimentaux (Mizushima et Shiotani, 1996 et 2001) ont étudié dans un élargissement brusque le nombre de Reynolds augmentée à ($R_e = 1500$) dans des canaux symétriques.

L'influence de la rugosité du lit sur la turbulence est difficile à expliquer par rapport à la profondeur d'eau où l'effet de la viscosité peut être négligé pour l'écoulement turbulent. Les caractéristiques du fond rugueux spatialement en développement ont été examinées dans un réservoir peu profond. Les principaux processus responsables des phénomènes physiques observés à la surface libre comme les modèles d'écoulement asymétriques, la symétrie de différentes combinaisons sont analysés.

Pour une étude détaillée de l'écoulement turbulent rugueux à large échelle, les vitesses de surface ont été ramenées à la moyenne. Les observations visuelles montrent que l'écoulement est contracté à l'entrée brusque avant de s'élargir sur la largeur du bassin ($B = b + 2\Delta B$) suivant l'axe d'entrée et sortie symétrique du canal pour un débit moyen ($Q = 7l/s$) et une profondeur d'eau ($h = 0.200m$) constants. L'épanouissement latéral du jet principal se développe de manière symétrique avant de remonter à l'amont pour décrire deux zones tourbillonnaires stables sur chaque côté du jet. Ces configurations occupent la majorité de la surface libre du réservoir et accompagnées de deux autres plus petites de forme

triangulaire, stagnants dans les deux coins amont de la zone morte. Elles tournent plus lentement dans le sens opposé des deux grandes cellules en changeant alternativement de forme et de taille.

En conclusion, la littérature existante indique que sur la surface rugueuse, une mesure précise du frottement pose encore un autre défi pour les expérimentateurs dans le futur.

- **Pour $AR=L/B=12$**

Si la rugosité est à la base de la création des forces de frottement et la résistance au déplacement du liquide, son effet sur le mode d'écoulement devient significatif. Dans le cas d'un réservoir rectangulaire à fond rugueux, la configuration symétrique et asymétrique a été montrée en fonction des facteurs géométriques adimensionnels à travers la base des essais.

Avec la diminution de la largeur du réservoir ($B = 0.5m$), la grandeur des vitesses augmentent la déviation d'écoulement vers l'axe central du bassin qui devient clairement visible (Figure 4.24a, b, c). Dans les premiers instants, le démarrage de la pompe suit l'écoulement, essentiellement, non rotationnel où les particules liquides immobiles se trouvent à la périphérie du réservoir en contact avec la paroi solide. Néanmoins, le gradient de vitesse élevé fait preuve que l'écoulement monte rapidement où il engendre des forces de cisaillement occasionnant un décroissement de la vitesse par rapport à la paroi du fond. La vitesse affectée par les dites forces de cisaillement dans la couche du liquide constitue la zone limite qui tend asymptotique vers la vitesse de l'écoulement principal. A l'extrémité amont, la zone limite en mouvement est très fine alors qu'à l'aval, elle devient de plus en plus épaisse sous l'effet du cisaillement, tendant à freiner d'autres particules liquides. Comme nous l'avons déjà mentionné précédemment, le traceur circule librement à la surface libre au-dessus du fond rugueux pour former des tourbillons le long de la ligne centrale sans décollement ou rattachement.

La formation des zones de recirculation a été intensivement étudiée pour une large variété de modèles d'écoulement qui peut se produire dans la couche limite sous l'effet du frottement de la paroi. Par ailleurs, l'inertie du tourbillon principal pousse le jet à se dévier sur le côté pour décrire une configuration qui tient à se maintenir avec une largeur réduite du réservoir. Cependant, les travaux antérieurs ont montré que l'asymétrie ne peut être expliquée que par la grande sensibilité d'écoulement en conditions initiales et aux limites. Les interactions associées aux déformations de la surface libre augmentent les fluctuations

horizontales qui amortissent celles des verticales sous l'effet de la redistribution de l'eau. Néanmoins, l'énergie provenant des fluctuations verticales est directement transférée aux longitudinales (Cloens, 2010).

En conclusion, les sommets d'aspérités du fond jouent un rôle important dans la résistance du mouvement du liquide ainsi que l'interaction des structures de l'écoulement près de la paroi latérale de la couche limite.

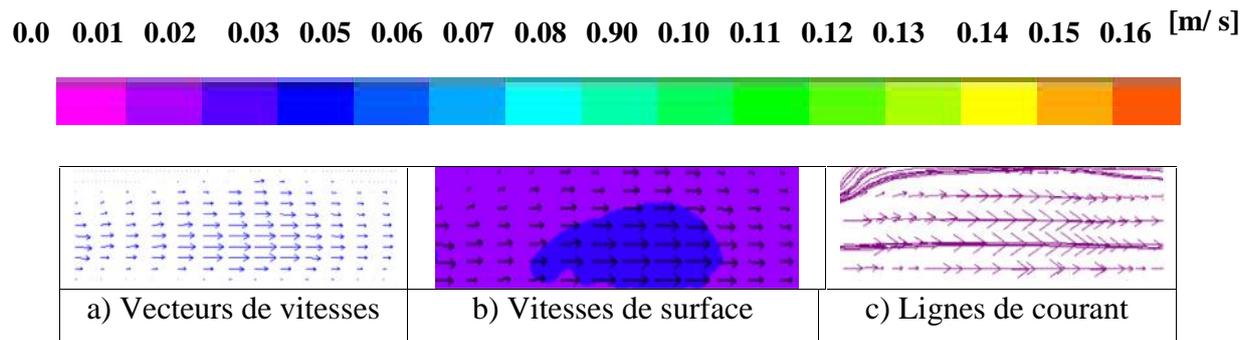


Figure 4.24 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement extérieur

$$\overline{k_0} = 2.8\text{mm}, L = 6.00\text{m}, B = 0.50\text{m}, Q = 7.0\text{l/s}, h = 0.200\text{m}$$

- **Pour $AR=L/B=6$**

Les essais effectués montrent le rôle que peuvent exercer les interactions de la surface libre et du fond rugueux du bassin sur la génération des écoulements de recirculation. Pour un rapport de forme ($L/B = 6$), l'écoulement en plein développement montre l'instabilité de la surface libre qui décrit une asymétrie légèrement persistante. Le jet devient encore plus marqué avec déviation latérale sur l'un des deux coté et commence à devenir plus lisible avec un modèle de tendance non symétrique. L'apparition d'une grande recirculation domine l'ensemble de l'écoulement et s'explique par le rapprochement des parois latérales du canal ($B \approx b = 0.25\text{m}$). Elle pourra être justifiée par le développement de vitesses qui conduit à une diminution de la pression (Dewals et al., 2008). L'augmentation de la largeur courte du bassin ($B = 1.00\text{m}$) montre une diminution du rapport de forme en présence d'un courant plutôt instable. Après le contact du jet à l'entrée du bassin avec la paroi du mur, il prend une déviation pour s'orienter sur le côté le long de la ligne médiane qui semble être attiré par l'une des parois latérale du bassin. Un décollement se produit et génère une instabilité au centre du bassin et un tourbillon plus petit et plus court commence à se former sur le côté du jet avec une rotation en sens contraire des aiguilles d'une montre.

Le jet principal génère une rotation instable et commence à favoriser le développement d'une configuration asymétrique comme il est montré sur la figure (4.25). Ce problème de commutation d'asymétrie se poursuit jusqu'à l'extrémité aval du bassin, lorsque le jet est forcé de passer à travers le canal de sortie. La configuration de l'écoulement superficiel est clairement identifiée où un ralentissement d'écoulement sur fond rugueux entraîne un éloignement des lignes de courant vers l'extérieur du réservoir à une hauteur de $(0.2h)$ par suite de la continuité de l'écoulement (Hug, 1975). La vitesse longitudinale est ainsi développée suivant la profondeur d'eau qui s'établit tout près de la couche limite du fond qui commence par être laminaire, au fur et à mesure, que son épaisseur augmente. Dans ce cas l'écoulement se fait de plus en plus instable et devient par la suite turbulent. La recirculation du liquide a tendance de se maintenir, car l'inertie du tourbillon pousse le jet à entrer sur le côté du bassin où le fond lisse favorise cette tendance. En effet, l'analyse est en parfait accord avec les résultats de (Kantoush, 2008) estimés par (Dufresne et al., 2008) et analysées par (Dewals et al., 2010) & (Camnasio et al., 2011).

En conclusion, l'écoulement domine la majeure partie du bassin à comparer avec le fond lisse où le jet principal ressemble à une instabilité sans cesse croissante.

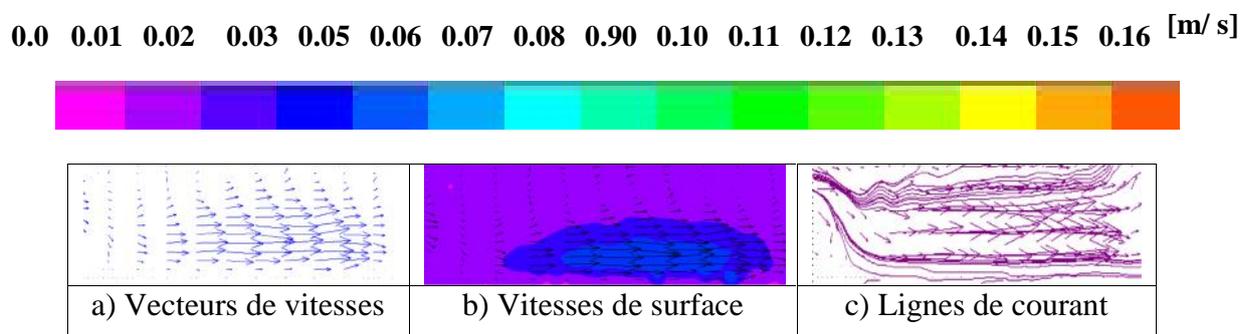


Figure 4.25 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement extérieur

$$\bar{k}_0 = 2.8mm, L = 6.00m, B = 1.00m, Q = 7.0l/s, h = 0.200m$$

- **Pour $AR=L/B=3$**

Pour une longueur systématiquement constante ($L = 6.00m$), la largeur du réservoir est pris variable ($B = 2.00m$) quand l'écoulement est pleinement développé ($h = u$). Alors que la stabilité de l'écoulement asymétrique présente une déviation sur le côté qui rattache la paroi du bassin avec une distance conduisant à une grande zone de séparation. Par ailleurs, le jet tend à se dévier, alternativement, sur un des côtés, dépendant des légères perturbations

existants en conditions initiales et aux limites. Ce choix de la déviation du jet observée sur le côté droit ou gauche est aléatoire et dépend de légères perturbations existantes en conditions initiales et aux limites. Lorsque la déviation latérale du jet donne naissance à un modèle asymétrique caractérisé par une grande zone de recirculation au centre du bassin, la symétrie disparaît complètement. Elle s'accompagne de deux petites cellules situées aux coins amont de la zone morte tournant dans le sens contraire du tourbillon principal où le côté droit apparaît beaucoup plus mouvementé que celui de gauche qui semble être stagnant.

Ce comportement est similaire à une instabilité sans cesse croissante observée dans l'essai précédent. En effet, le phénomène de l'asymétrie est dû, principalement, à une décélération de la vitesse axiale sur la ligne centrale qui peut être expliquée par l'augmentation de la vitesse du côté de la déviation. Dans ce cas, le jet principal fonctionne comme une région à trois tourbillons (Figure 4.26) où l'écoulement montre une certaine tendance à serpenter l'axe central du bassin et demeure essentiellement asymétrique. Par ailleurs, la distribution des vitesses devient suffisamment précise, sauf tous près des aspérités, il existe de légères divergences qui réagissent avec l'écoulement.

En conclusion, l'accroissance de la rugosité du fond (k_0) augmente l'épaisseur de la couche limite ($u(x)$) et la force de frottement (u_*) afin de rétablir la symétrie d'écoulement.

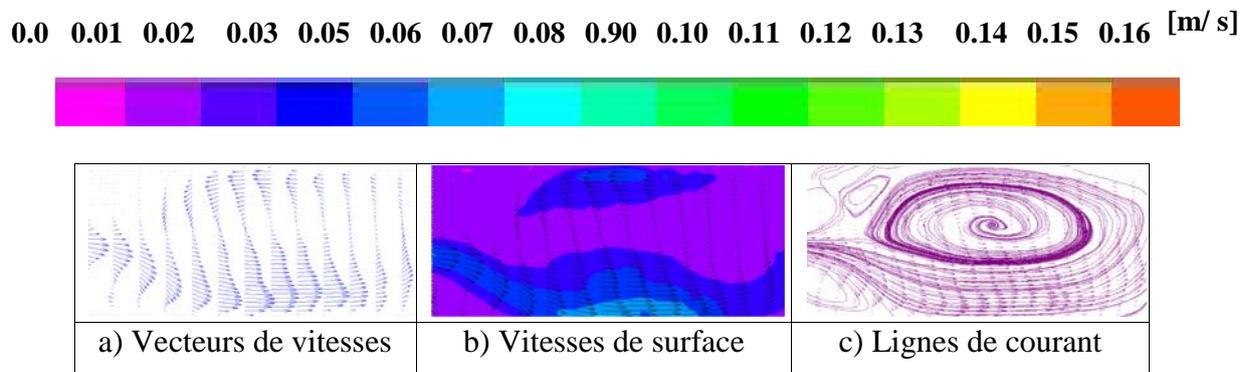


Figure 4.26 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement extérieur

$$\bar{k}_0 = 2.8\text{mm}, L = 6.00\text{m}, B = 2.00\text{m}, Q = 7.0\text{l/s}, h = 0.200\text{m}$$

- **Pour $AR=L/B=2$**

L'objectif de ce travail est d'améliorer à la fois la compréhension des effets de la rugosité du fond sur le champ des vitesses superficielles et la vitesse moyenne d'écoulement dans la couche limite turbulente à gradient de pression, approximativement, nulle.

L'augmentation de la largeur ($B = 3.00m$) montre la non-uniformité de l'écoulement qui demeure essentiellement asymétrique pour toutes les grandeurs. Il est à noter que l'essai n°28, montre le jet sortant du canal est considérablement dévié sur le côté, tendant à se canaliser contre la paroi du mur en favorisant le développement de trois vortex. Le grand mouvement qui se produit à l'amont du bassin, se développe vers l'aval dans la direction longitudinale de l'écoulement en raison du cisaillement des vitesses entre le jet principal et la zone morte (Weitbrecht et al., 2002). Cette grande rotation en sens inverse des aiguilles d'une montre domine l'écoulement du côté de la ligne centrale (Figure 4.27) où, il n'y a aucun effet systématique pour son orientation comme il a été décrit par (Kantoush et al., 2008) & (Dufresne et al., 2010). Tandis que, les deux petits vortex de forme triangulaire sont homogènes et non identiques dans la taille qui se développent sur les deux cotés amont du coin du réservoir. Par contre au voisinage de la surface libre, la grande cellule intense transporte l'énergie et la quantité de mouvement du coin vers le centre du bassin. Alors qu'au voisinage du fond, elles sont transportées de la zone de haute production d'énergie vers le milieu du bassin par la zone du coin où toutes les deux se dirigent vers le coin du réservoir le long de la bissectrice. Dans ce cas, l'écoulement devient rectiligne, le long de l'axe central, et bascule vers une symétrie plus stable développant deux paires de tourbillons sur chaque côté du réservoir.

Nous pouvons conclure que le changement des formes du lit (la rugosité standard) peut ainsi modifier complètement la configuration globale de l'écoulement.

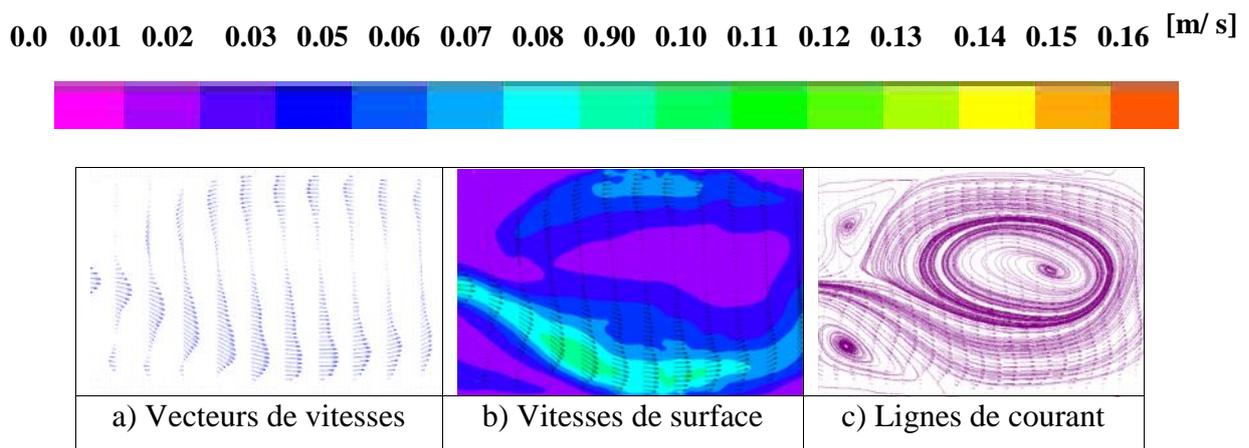


Figure 4.27 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement extérieur

$$\overline{k_0} = 2.8mm, L = 6.00m, B = 3.00m, Q = 7.0l/s, h = 0.200m$$

- Pour $AR=L/B=1.5$

Après le changement des conditions de bords et l'ajout d'une rugosité homogène uniformément répartie sur le fond du réservoir, l'asymétrie disparaît complètement pour un facteur de forme plus petit ($L/B=1.5$). Les observations ont montré que l'écoulement est contracté par le convergent (b) à la sortie du canal d'entrée avant de s'élargir brusquement sur toute la largeur du bassin ($B=b+2\Delta B$). Dans ce cas, le jet débouche dans l'espace contenant le même liquide en état immobile, perturbé par les forces de frottement, agissant sur le jet d'une part et sur le fluide qui l'entoure d'autre part. La Figure (4.28) montre la fonction de la deuxième phase du jet développé à la suite des formes des aspérités du fond et le champ d'écoulement a complètement changé. La dispersion latérale du jet s'effectue d'une manière symétrique sur les deux côtés du réservoir, avant de remonter vers l'amont pour décrire deux zones tourbillonnaires symétriques par rapport à l'axe central. La présence d'un nombre de tourbillon homogène augmenté à deux zones principales similaires sur chaque côté de la ligne médiane ont été examinées pour un facteur de forme plus grand ($L/B=1.5$). Bien évidemment, elles restent symétriques et stables occupant presque la totalité de la surface du bassin sur chaque côté du courant. Néanmoins, elles sont accompagnées de deux autres tourbillons plus petits dans les deux coins amont du réservoir qui changent alternativement de taille et de forme en stagnant complètement de temps à autre.

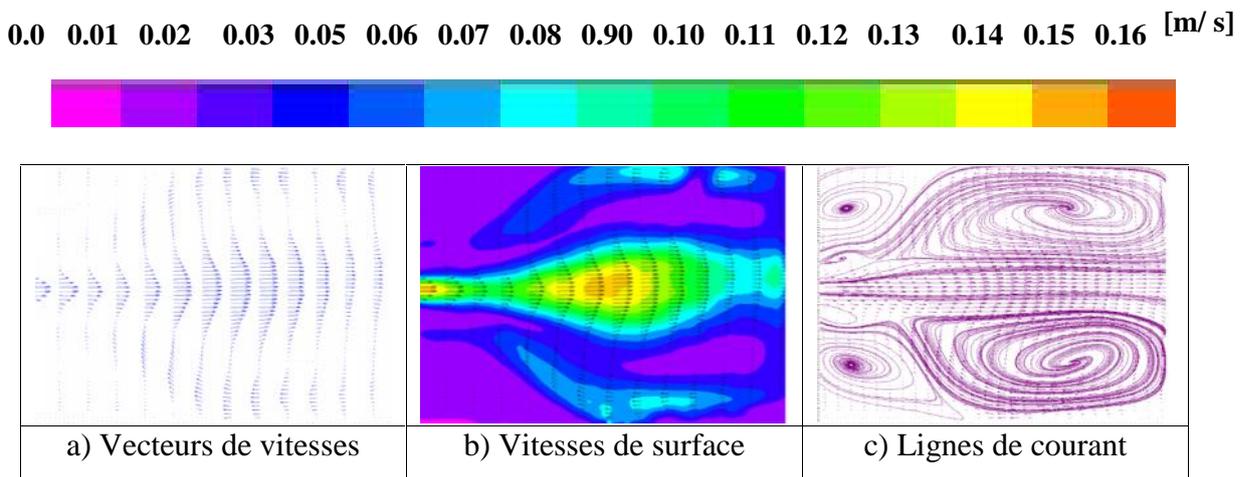


Figure 4. 28 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement extérieur

$$\overline{k_0} = 2.8mm, L = 6.00m, B = 4.00m, Q = 7.0l / s, h = 0.200m$$

Evidemment, ces petits tourbillons tournent plus lentement dans le sens opposé des deux grandes recirculations. Selon l'analyse des résultats expérimentaux, il peut être mentionné qu'au cours des changements de la transition d'écoulement, l'influence du fond confirment l'effet de l'essai effectué. Cependant, notons que la stagnation de ces deux tourbillons du coin amont aurait pu devenir un régime laminaire.

En conclusion, les résultats ont montré que toutes les figures ne diffèrent pas de l'écoulement turbulent lisse où les sections présentent une comparaison entre les longueurs réduites du réservoir.

- **Pour $AR=L/B=1.25$**

Sous l'effet de la rugosité du fond du bassin, l'écoulement superficiel a été examiné par la diminution de la longueur du réservoir. Ce comportement symétrique est illustré avec un jet régulier pour une longueur intermédiaire réduite ($L = 5.00m$), alors que la largeur du bassin reste maintenue constante ($B = 4.00m$) donnant lieu à un facteur de forme ($L/B = 1.25$). A travers le canal d'entrée, le passage du jet uniformément mouvementé est soudainement contracté à la sortie du bassin à large échelle où les vitesses résultantes sont plus élevées en ligne droite. Cependant, l'écoulement rectiligne se maintient symétrique le long de la bissectrice, suivant l'axe central, avec une formation de deux paires de zones de recirculation identiques dans la taille. Elle est accompagnée de deux autres petits vortex de plus en plus lisibles dans leurs apparitions. Ils sont situés dans les deux coins amont de la zone morte, en tournant plus lentement en changeant alternativement de taille et de forme. Cela a été évoqué par l'analyse de différentes configurations des petits réservoirs (Dufresne et al., 2010). Néanmoins, le domaine de la stabilité d'écoulement présente des effets séparés et cumulés de la viscosité cinématique du liquide et du frottement du fond (Chen & Jirka, 1998).

Sur un fond rugueux ($\overline{k_0} = 2.8mm$), le jet est, fondamentalement, dévié sur le côté qui bascule vers une configuration symétriquement plus stable conduisant à un accroissement de forces qui tend à rétablir l'équilibre entre les deux effets (Dufresne et al., 2010). Après l'émission de l'écoulement rotationnel observé par la visualisation des lignes de courants, les deux grandes zones formées au centre du bassin se sont générées à l'aval qui se développent horizontalement vers l'amont, en respectant les vitesses de cisaillement entre le jet et la zone morte (Weitbrecht et al., 2002). Elles s'accompagnent de deux autres petites cellules situées dans la zone morte changeant alternativement de taille et de forme (Figure 4.29). Cependant,

le régime turbulent a tendance à se maintenir et continue à régénérer d'autres tourbillons qui tendent à se dissiper.

En conclusion, l'augmentation de la rugosité contribue à l'accroissement de la vitesse de cisaillement et l'intensité de la turbulence qui est capable de modifier l'écoulement.

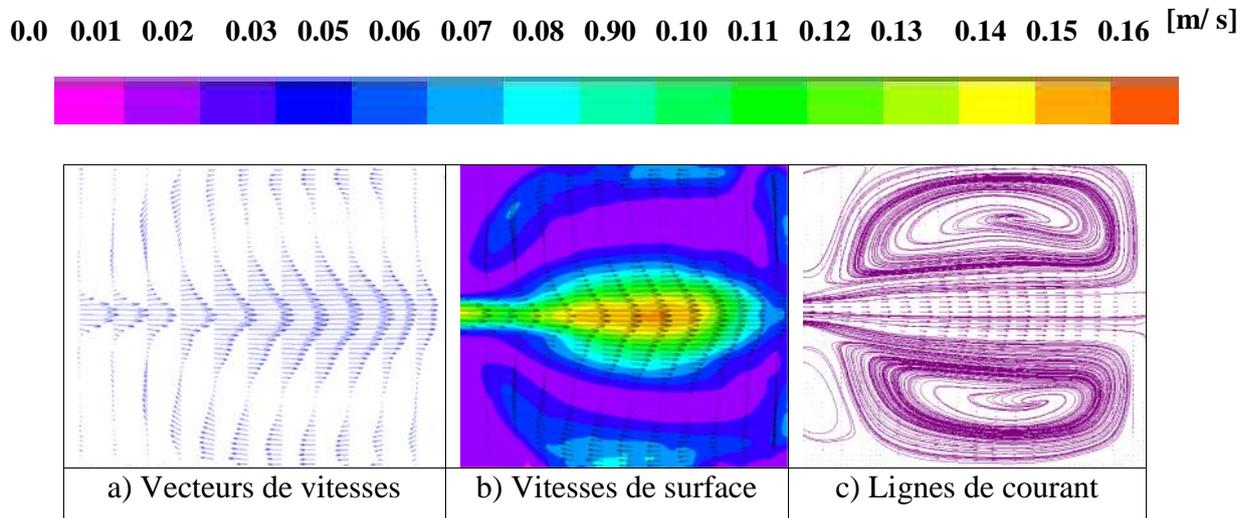


Figure 4.29 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement extérieur

$$\bar{k}_0 = 2.8\text{mm}, L = 5.00\text{m}, B = 4.00\text{m}, Q = 7.0\text{l/s}, h = 0.200\text{m}$$

- **Pour $AR=L/B=1$**

Une nouvelle série d'essais a été menée dans le but d'examiner l'effet du fond rugueux sur le champ d'écoulement superficiel. Sur la base des mesures précédentes, cet effet a été examiné sur l'écoulement de surface avec une largeur plus courte et homogène à sa longueur ($L = B = 4.00\text{m}$) avec les mêmes conditions initiales et aux limites. Cependant, le front de jet est atteint à la sortie du réservoir et les deux angles amont sont encore en état statique en raison de la variation des vitesses sur le côté gauche et droit le long de l'instabilité du jet. Celui-ci conduit à la formation des tourbillons de la zone de cisaillement et qui subissent ensuite une ou plusieurs étapes de couplage vortex. En réduisant la longueur de bassin, le jet principal devient plus élargi sur le fond rugueux que lisse en conservant les deux grandes zones par conséquent la diminution du facteur de forme unitaire ($L/B=1$), l'écoulement symétrique est stabilisé. Alors que les zones secondaires observées précédemment dans les coins amont du réservoir ont complètement disparu sous l'effet du facteur II a été constaté que, le jet est plutôt régulier à partir de l'entrée du canal jusqu'à la sortie avec le développement d'une symétrie (Tableau 4.8).

Les deux zones de recirculation sont identiques dans la taille et la forme (Figure 4.30). Les écoulements tourbillonnaires occupant toute la section de mesure du bassin sont devenus plus intenses à la surface libre, activées par l'isotropie du lit, compte-tenu de l'augmentation du gradient du frottement. En revanche, les deux petites zones du coin amont circulent avec de faibles vitesses où leur stagnation provoque leur disparition définitive. Cet effet a été confirmé par (Dewals et al., 2008) en montrant par simulations numériques que le champ d'écoulement est très sensible aux perturbations extérieures dans la zone de transition. Les résultats d'essais ont montré qu'ils sont en parfait accord avec ceux évoqués par (Kantoush, 2008), (Dewals et al., 2008), (Dufresne et al., 2010) & (Camnasio et al., 2011).

En conclusion, le champ d'écoulement initialement asymétrique sur un fond lisse, devient symétrique plus stable après le changement des conditions de bords qui se développe sous l'effet du jet principal.

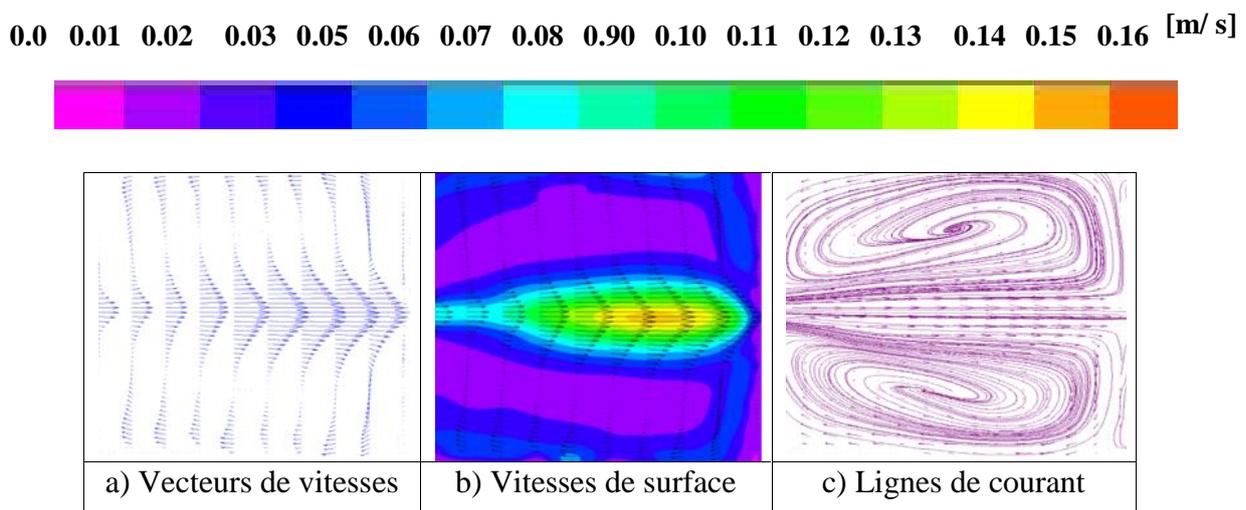


Figure 4.30 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement extérieur

$$\bar{k}_0 = 2.8mm, L = 4.00m, B = 4.00m, Q = 7.0l/s, h = 0.200m$$

- **Pour $AR=L/B=0.75$**

L'effet d'une largeur plus courte ($L = 3.00m$) sur le régime d'écoulement a été étudié avec un jet parfaitement symétrique, donnant naissance à deux grandes zones principales dominant la totalité du centre de la section de mesure (Figure 4.31). Après avoir effectué des mesures sur la stabilité de la symétrie du jet par rapport à l'axe horizontal du bassin, la même procédure d'essais a été utilisée pour montrer la formation de modèles d'écoulement.

Tout changement brusque dans la section d'écoulement du courant liquide provoque une diminution de vitesse depuis la sortie du convergent jusqu'à la section élargie du bassin. Il en résulte que les particules liquides tendent à conserver leurs vitesses pour heurter celles qui les précèdent en donnant naissance à des tourbillonnements. Durant les premiers temps de l'essai, l'écoulement atteint la paroi latérale et suit le parcours des lignes de courant vers le canal de sortie due aux forces de frottement qui exerce un effet important sur le champ des vitesses. Le modèle symétrique dépend essentiellement du facteur de forme qui se produit pour une longueur plus petite et entraîne une influence sur le maintien des tourbillons des coins.

En conclusion, la géométrie du réservoir peu profond peut influencer les structures d'écoulement à grande turbulence.

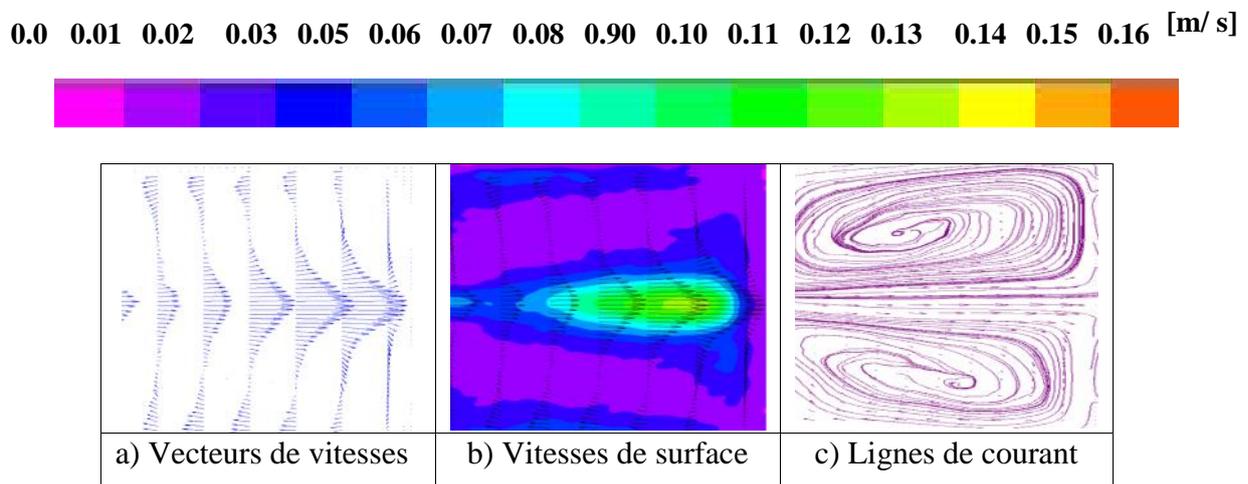


Figure 4. 31 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement extérieur

$$\bar{k}_0 = 2.8mm, L = 3.00m, B = 4.00m, Q = 7.0l/s, h = 0.200m$$

- **Pour $AR=L/B=0.5$**

L'influence du rapport adimensionnel de forme et d'élargissement sur les écoulements symétriques et asymétriques au-dessus du fond lisse et rugueux sont analysés et montrés. En effet, différents types de recirculation ont été identifiées en fonction du rapport de la longueur à la largeur ainsi que le rapport d'élargissement du réservoir. L'effet de la longueur du bassin rectangulaire sur le changement du régime d'écoulement extérieur apparaît nettement dans l'essai présenté ci-dessous.

Suivant l'axe des canaux d'entrée et de sortie, un jet se développe dans la partie centrale pour un facteur géométrique de forme ($L/B = 0.5$) avec une longueur diminuée ($L = 2.00m$) pour une longueur du bassin constante (B). Avec cette diminution l'asymétrie disparaît complètement exerçant un effet important sur la modification du champ d'écoulement de surface. Avec la largeur du réservoir maintenue constante les conditions d'écoulement se stabilisent sur un fond rugueux. La taille et la position de ces zones de recirculation est clairement montrée par les lignes de courants où la variation de ces vitesses devient plus importante au-dessus d'un fond lisse que rugueux où les deux petits tourbillons observés précédemment dans les coins amont ont complètement disparu (Figure 4.32). Dans le phénomène de la rupture de la symétrie, le nombre de Reynolds permet au facteur de forme ($AR = L/B$) d'être utilisé comme une variable dans l'évaluation de certains paramètres correspondants à la zone logarithmique de la vitesse de frottement et la rugosité équivalente. Cependant, de nombreuses études ont mis en évidence des structures cohérentes très importantes au sein des écoulements turbulents. Les observations présentées par les différents auteurs sont pratiquement similaires, montrant un parfait accord entre les configurations observées dans le réservoir rectangulaire en écoulement peu profond.

En conclusion, les résultats d'essais indiquent qu'en fonction des conditions initiales et aux limites, l'écoulement peut facilement basculer vers différentes configurations.

0.0 0.01 0.02 0.03 0.05 0.06 0.07 0.08 0.90 0.10 0.11 0.12 0.13 0.14 0.15 0.16 [m/s]

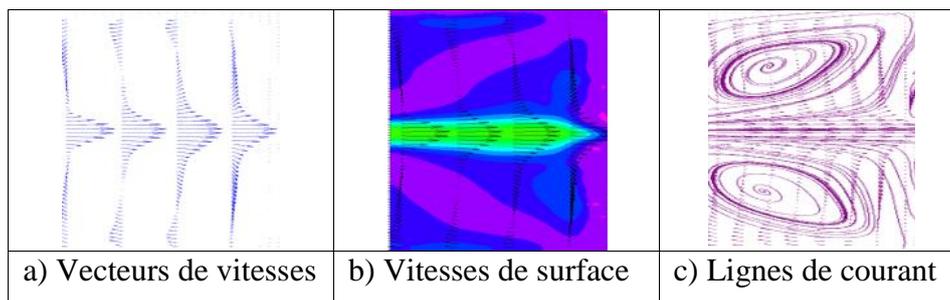


Figure 4.32 : Ligne de courant dans le champ d'un écoulement extérieur

$$\bar{k}_0 = 2.8mm, L = 2.00m, B = 4.00m, Q = 7.0l/s, h = 0.200m$$

IV.6.4. Effet de la turbulence

Depuis les expériences réalisées par Reynolds en 1883, le phénomène de la transition de l'écoulement laminaire vers la pleine turbulence ont gardé, en mécanique des fluides, un intérêt constant. D'après la définition de l'écoulement à grand nombre de Reynolds, le contrôle de la transition de l'instabilité de ce paramètre est caractérisé par la prépondérance des forces d'inertie, qui conduit à négliger les forces visqueuses dans les équations du mouvement et à traiter le fluide comme un liquide parfait. Par ailleurs, plusieurs critères empiriques ont été, principalement, utilisés pour prédire la transition mais au-delà d'une certaine valeur critique, la couche limite laminaire bascule vers la pleine turbulence. Cependant, l'examen de l'impact de la variation de certains paramètres à savoir : le facteur de forme, le nombre de Reynolds et de Froude sur le champ de vitesses ont été mentionnés. À cet égard, le modèle d'écoulement, le tourbillon et le nombre de recirculation deviennent importants car la prévision correcte de ces caractéristiques est une condition nécessaire pour faire correspondre la phase moyenne des profils d'écoulement dans l'essai.

Dans un premier temps notre but est de caractériser quantitativement la structure bidimensionnelle des tourbillons, autorisant l'accès à deux composantes de vitesses dans le volume d'écoulement. Cependant, les mécanismes physiques peuvent provoquer des effets de turbulence sur l'instabilité des vitesses de surface qui seront expliquées plus loin.

Pour décrire la stabilité hydrodynamique des écoulements peu profonds, une approche a été suggérée par (Ghidaoui & Kolyshkin, 1999) montrant l'effet très faible du nombre de Reynolds supérieur à 10^3 ($Re > 10^3$). Par contre, (Mizushima & Shiotani, 1996 et 2001) ont examinés par essais expérimentaux et validés par modélisation numérique l'effet de l'allongement du bassin dans les canaux à élargissement brusque pour un Reynolds modéré s'abaissant approximativement à (10^3) sur la stabilité linéaire de l'écoulement. Cette fois ci les perturbations des écoulements asymétriques ont été analysées par (Shipara et al., 1990) dans un élargissement progressif pour un nombre de Reynolds ($50 < Re < 300$) afin de montrer l'évolution de la stabilité linéaire. Cependant, ce paramètre adimensionnel est lié non seulement à la profondeur d'eau (h) mais aussi aux propriétés géométriques de la section de mesure (Graf et al., 2000). A cet effet, nous considérons que la viscosité cinématique du liquide peut dépendre de la direction de l'écoulement et du nombre de Reynolds. Tandis que, si le nombre de Reynolds croit, la transition de la couche limite se déplacera vers l'amont,

alors que pour un Reynolds plus élevé ($R_e \leq 28000$), la couche limite devient plus résistante au gradient de la pression lors de son passage à l'état de turbulence. Cela dit que le mécanisme de la transition asymétrique vers une symétrie plus stable dépend essentiellement de nombreux paramètres auxquels nous sommes confrontés dans cette étude, principalement: à la turbulence de l'écoulement, à l'état de la surface superficielle et à la nature du fond du réservoir. Lorsque le nombre de Reynolds est suffisamment élevé l'interaction entre les couches interne et externe devient plus faible.

- **Sur fond lisse** $k_0 = 0.1mm$

Ce travail couvre l'étude de l'influence du nombre de Reynolds sur le mode d'écoulement mené par différents essais dans le réservoir rectangulaire de référence. Lorsque le nombre de Reynolds demeure plus élevé, les forces visqueuses deviennent favorables à la stabilité et ne joueront que dans un domaine plus petit situé au voisinage de la surface, limitant l'écoulement où une extension est souvent possible (Hug, 1975). Dans ce sens, une analyse expérimentale présente une synthèse des résultats obtenus dans le champ des vitesses de surface pour une turbulence bien développée dans une eau peu profonde. Comme il a été mentionné auparavant, le champ des vitesses superficielles a été testé avec un débit moyen d'alimentation constant ($Q = 7.0l / s$) pour les différentes profondeurs.

Pour une profondeur d'eau ($h = 0.200m$), les résultats obtenus montrent un modèle symétrique avec deux tourbillons couplés à l'écoulement du même ordre de grandeur, révélé par la figure (4.33). A travers l'élargissement brusque, le jet traverse le canal d'entrée en s'étalant sur toute la surface de mesure pour observer la stabilité symétrique de l'écoulement au centre du bassin pour une profondeur variable. Le long de l'axe central, le vortex produit un écoulement localisé qui est un moyen facile de pouvoir suivre le déplacement ainsi que l'emplacement de ce tourbillon afin d'observer l'effet de la vitesse locale sur la ligne du jet.

Alors que pour une diminution de la profondeur d'eau ($h = 0.150m$), l'écoulement initialement asymétrique bascule vers une symétrie autour de l'axe central du réservoir rectangulaire peu profond. Par ailleurs, pour franchir le bassin de référence, le jet principal traverse le canal étroit en fonction des conditions d'essai pour décrire la configuration d'écoulement homogène. L'apparition des deux grandes recirculations le long de la ligne centrale a été forcée par les effets d'allongement du réservoir à large échelle (Figure 4.34). Ce phénomène résulte d'une interaction complexe entre la géométrie de l'ouvrage, les propriétés

du fluide et la vitesse d'écoulement du jet (Rockwell, 2008). Ces deux recirculations seront accompagnées de deux autres petits tourbillons de forme triangulaire, situées dans les coins amont du bassin. Ces derniers tournent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Ce modèle devient plus développé avec des lignes de courant correspondant au champ de vitesses extérieures. La position minimale de la profondeur d'eau est située à ($h = 0.100m$) pour un rapport d'aspect ($h/b = 0.4$), montrant que l'écoulement commence à serpenter l'axe central pour redevenir régulier et cela après la stabilisation du niveau d'eau dans le bassin (Figure 4.34). Le courant faisant le coin amont décrit deux petites zones contre-rotatives de forme triangulaire accompagnant les deux principaux vortex qui tournent en sens inverse des aiguilles d'une montre.

La comparaison utilise à la fois les lignes de courant présentées dans les figures mentionnées pour le même facteur (L/B). L'examen de l'impact de la variation de certains paramètres à savoir : le facteur de forme, le nombre de Reynolds et de Froude sur le champ de vitesses ont été mentionnés. À cet égard, le modèle d'écoulement, le tourbillon et le nombre de recirculation deviennent importants car la prévision correcte de ces caractéristiques est une condition nécessaire pour faire correspondre la phase moyenne des profils d'écoulement dans l'essai. Pour interpréter l'effet du nombre de Reynolds réduit à la moitié ($Re = 14000$) sur le champ des vitesses de surface, plusieurs paramètres ont été analysés pour un régime d'écoulement observé.

Si le débit d'alimentation est réduit à la moitié ($Q = 3.5l/s$) pour une profondeur d'eau maintenue constante ($h = 0.200m$), le champ d'écoulement peut être provoqué pour le rapport de forme ($L/B = 1.5$). En effet, le courant d'eau ne se stabilise pas dans le bassin de référence ($L \times B = 6.00m \times 4.00m$) et commence à osciller entre la non symétrie et la symétrie. Par ailleurs, suivant le modèle géométrique, les grandes vitesses mettent en évidence au centre de l'asymétrie une zone maximale avec la variation de recirculation (Figure 4.36). A la base des études expérimentales effectuées, le mode d'écoulement se maintient régulier et demeure, efficacement, symétrique en vertu des conditions géométriques initialement identifiées symétriques. Pour la profondeur ($h = 0.150m$), les résultats montrent bel et bien que le jet principal n'est sensible qu'au nombre de Reynolds lorsque l'écoulement dans le convergent amont devient turbulent (Figure 4.37). Les essais expérimentaux révèlent clairement qu'en vertu des conditions géométriques et hydrauliques identifiées symétriques, le jet s'avère asymétrique et peut se développer en fonction de ces conditions de bords.

En réduisant la profondeur d'eau à sa valeur minimale ($h = 0.100m$), le graphique montre une seule zone, relativement, très grande pour un écoulement noté asymétrique. Toutefois, le jet d'eau maintient sa déviation sur le côté droit avec le tourbillon du coin amont droit qui devient plus petit que celui de gauche comme il a été montré (Figure 4.38). Le choix préférentiel de cette orientation est aléatoire et peut être expliqué par de légères perturbations extérieures dans les conditions initiales et aux limites comme il a été mentionné par (Kantoush, 2008). Ces observations sont en parfaite accord avec l'analyse des configurations développées durant l'étude menée par Dewals et al., (2008). Cette analyse se concentre sur l'apparition éventuelle d'une instabilité et ne peut pas prédire directement des tourbillons observés expérimentalement par les échelles de longueur. Par conséquent, l'appréciation actuelle devrait être confirmée par d'autres, peut-être sur la base de la faible analyse de la stabilité non linéaire

Conclusion,. En effet, pour un débit d'alimentation réduit à la moitié, le jet peut basculer d'une configuration asymétrique vers une symétrie plus stable.

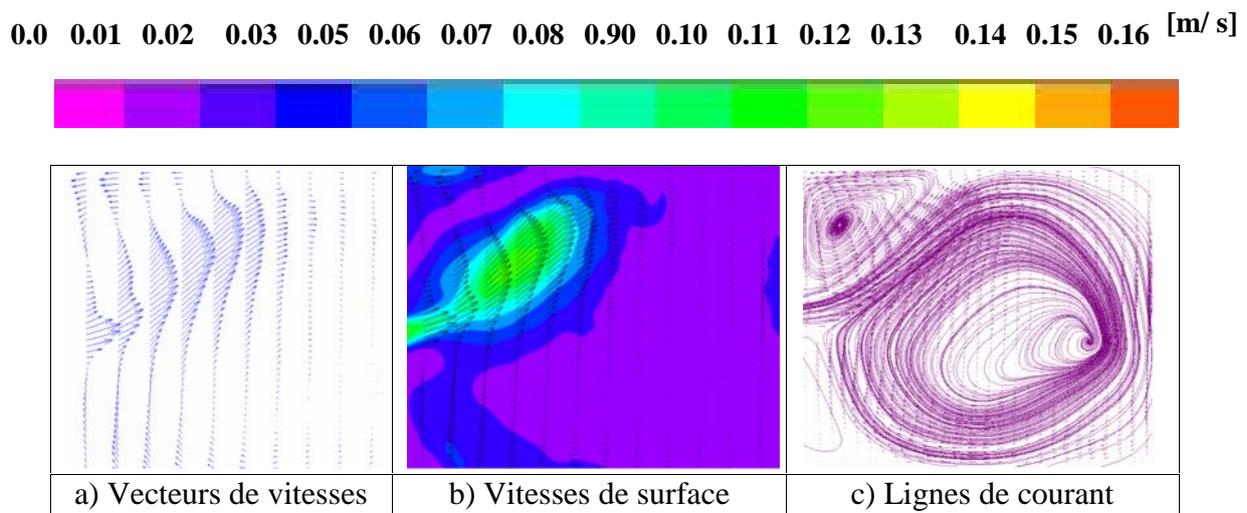


Figure 4.33 : Turbulence du champ d'écoulement extérieur pour un nombre de Reynolds

$$R_e = 28000, F_r = 0.1, \bar{k}_0 = 0.1mm, Q = 7.0l/s, h = 0.200m$$

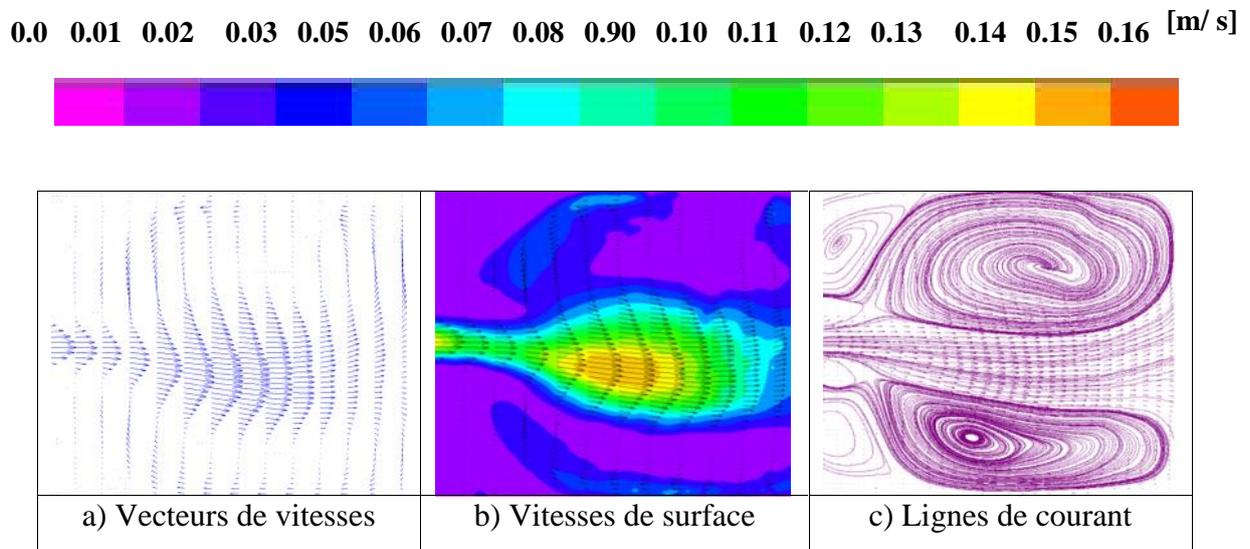


Figure 4. 34 : Turbulence du champ d'écoulement extérieur pour un nombre de Reynolds

$$R_e = 28000, F_r = 0.186, \bar{k}_0 = 0.1mm, Q = 7.0l / s, h = 0.150m$$

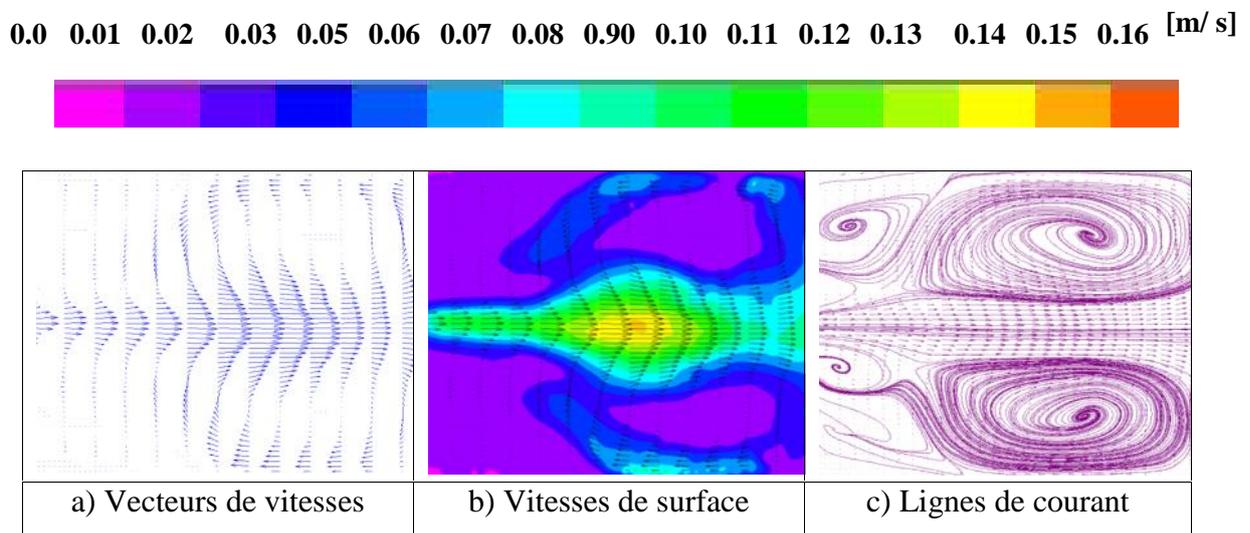


Figure 4.35: Turbulence du champ d'écoulement extérieur pour un nombre de Reynolds

$$R_e = 28000, F_r = 0.283, \bar{k}_0 = 0.1mm, Q = 7.0l / s, h = 0.100m$$

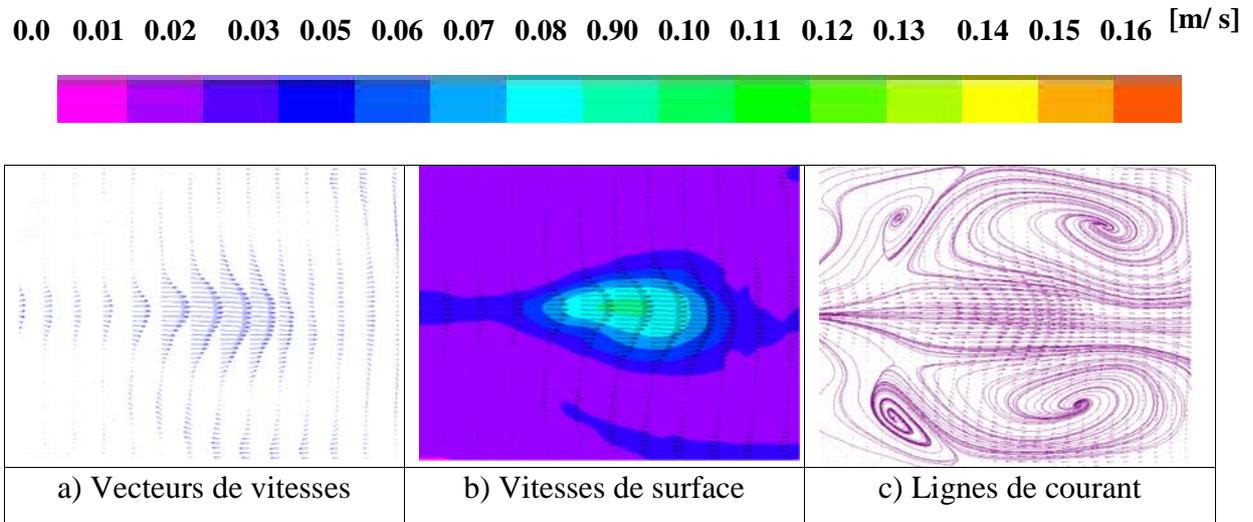


Figure 4.36 : Turbulence du champ d'écoulement extérieur pour un Reynolds

$$R_e = 14000, F_r = 0.05, \bar{k}_0 = 0.1mm, Q = 3.5l/s, h = 0.200m$$

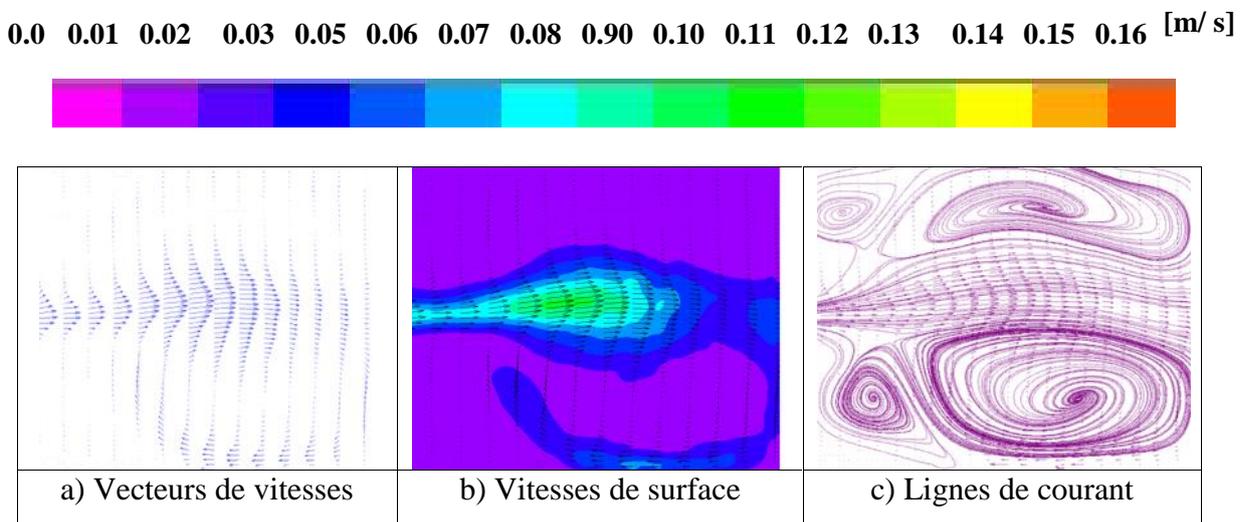


Figure 4.37 : Turbulence du champ d'écoulement extérieur pour un nombre de Reynolds

$$R_e = 14000, F_r = 0.07, \bar{k}_0 = 0.1mm, Q = 3.5l/s, h = 0.150m$$

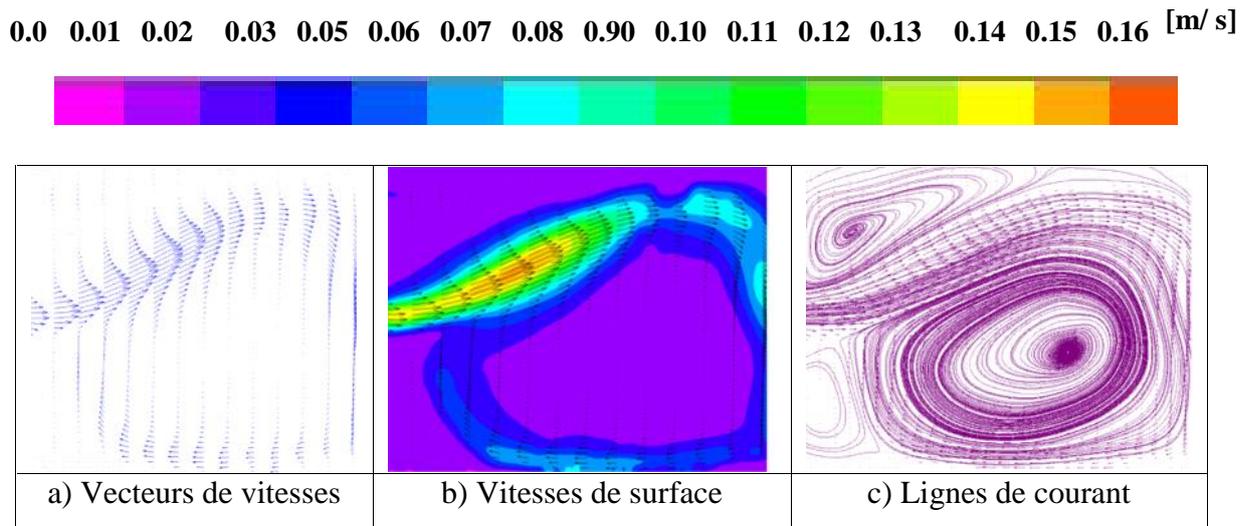


Figure 4.38: Turbulence du champ d'écoulement extérieur pour un nombre de Reynolds

$$R_e = 14000, F_r = 0.14, \bar{k}_0 = 0.1mm, Q = 3.5l/s, h = 0.100m$$

- **Sur fond rugueux** $\bar{k}_0 = 2.8mm$

Dans ce travail de recherche, les essais menés dans le réservoir rectangulaire à fond lisse et rugueux ont pour objectif l'analyse des observations qualitatives et quantitatives de l'évolution spatiale et temporelle des écoulements turbulents. Après avoir mentionné, précédemment, en détail, l'effet de la surface d'un fond lisse sur la configuration d'écoulement, à présent nous aborderons l'influence de la rugosité sur le mode d'écoulement. Par ailleurs, l'écoulement superficiel a été évalué par la visualisation du déplacement du traceur flottant à la surface libre afin de restituer le champ des vitesses de surface. Cependant, l'écoulement reste asymétrique pendant son développement, au cours duquel la recirculation a existé, par la suite, le courant bascule vers une symétrie plus stable.

Avec l'ajout de la rugosité au fond du réservoir ($\bar{k}_0 = 2.8mm$) l'écoulement est modifié avec le changement des conditions aux limites et présente un champ de vitesses extérieures symétrique plus stable. Dans ce sens, différents paramètres ont été examinés au-dessus d'un fond de rugosité homogène afin d'évaluer et d'interpréter les résultats obtenus pour deux nombres de Reynolds différents. En effet, le rôle du fond rugueux peut provoquer la transition de l'écoulement pour analyser la phase d'une bi-dimensionnalité développée.

Par contre l'augmentation de la profondeur peut avoir un effet de basculement vers la pleine tridimensionnalité. L'influence du frottement du lit sur la turbulence associée à des structures turbulentes à trois dimensions est très faible car ces structures tridimensionnelles à large échelle deviennent annulées. Elles commencent à perdre leur cohérence en raison de l'influence accrue de la friction du fond et les deux dimensions turbulentes associées. Cependant, pour satisfaire le rapport (u / k_0) entre l'épaisseur de la couche limite et la rugosité du fond (Jiménez, 2004) a proposé un critère où la similitude de la paroi doit être supérieure à 40. En écoulement bidimensionnel la faible turbulence produit dans la couche limite exerce un effet négligeable où la viscosité peut agir toute seule (Uittewaal et al., 2003). L'examen de la stabilité linéaire de l'écoulement bidimensionnel a été analysé pour un débit maintenu constant ($Q = 7l/s$) et un rapport d'aspect variable ($h/b = 0.8, 0.6, 0.4$).

Pour une profondeur ($h = 0.200m$), l'écoulement asymétrique a pu, facilement, basculer vers une configuration symétrique en fonction des conditions initiales et aux limites. Le jet principal devient plus régulier avec deux paires de cellules identiques dans la taille et séparées par l'axe central, ce comportement est illustré ci-dessous par la (Figure 4.39). Alors que le régime d'écoulement persiste et devient symétrique le long du bassin de référence avec quatre zones agissant l'une sur l'autre. Si la profondeur d'écoulement est diminuée ($h = 0.150m$), pour un même débit réduit à la moitié que précédemment suivant les indications illustrées sur la (Figure 4.40). Cependant, le jet principal forme deux paires de zones symétriques et identiques, séparées par l'axe central du bassin qui se sont développés dans la zone morte du coin où la vitesse devient plus importante pour le même nombre de Reynolds. Par contre, si la profondeur d'eau atteint sa valeur minimale ($h = 0.100m$), l'écoulement reste plus accéléré et plus régulier et se concentre au milieu du bassin avec une vitesse plus grande. Alors que la vitesse produite par le cisaillement longitudinal devient plus intense sur la profondeur et son augmentation fournit un effet stabilisateur du champ d'écoulement (Vikram et al., 2010). L'écoulement se caractérise par deux paires de vortex symétriques sur chaque côté, séparées par l'axe et s'accompagne de deux petits tourbillons symétriques de forme triangulaire, situés dans les coins amont du réservoir (Figure 4.41).

Dans la deuxième partie, nous avons été motivés par l'étude de l'effet de la turbulence sur la stabilité de l'écoulement peu profond qui est l'un de nos objectifs de l'étude expérimentale. Cependant, pour un débit moyen d'alimentation réduit à la moitié ($Q \leq 3.5l/s$) par rapport à l'étude précédente, d'autres essais ont été répétés avec une

profondeur variable ($h = 0.200m$, $h = 0.150m$, $h = 0.100m$) dans le but de vérifier la sensibilité du modèle d'écoulement sur fond rugueux. Dans ce cas le nombre de Reynolds est diminué ($R_e = 14000$) à la moitié où l'étude de la configuration permet d'analyser les conditions d'écoulement et clarifie le processus physique régissant de différentes expériences. En effet cela explique que l'écoulement peut commuter à différente direction selon les conditions initiales et aux limites (Kantoush, 2008). La variabilité du débit d'alimentation a été étudiée pour une profondeur d'eau ($h = 0.200m$) dans le bassin de référence ($L = 6.00m$ et $B = 4.00m$).

Les essais menés sur un fond rugueux ont montrés que la recirculation des vitesses de surface est parfaitement stable avec deux grandes recirculations au centre du bassin. Alors que les deux petites zones du coin se développent lentement à cause de la faible vitesse (Figure 4.42). En effet, la variation de la symétrie du champ des vitesses de surface devient plus important au-dessus d'un fond rugueux que lisse. Néanmoins, le paramètre adimensionnel du Reynolds donne un effet stabilisateur à l'aval du jet puisque avec des petites valeurs l'écoulement demeure essentiellement symétrique (Vikram et al., 2010). L'écoulement maintient une configuration symétrique pour un facteur de forme ($L/B = 1.5$).

Pour une profondeur ($h = 0.150m/s$), l'observation montre les différentes caractéristiques du modèle de recirculation. Par ailleurs, ce jet tend à se canaliser contre les deux parois du réservoir et au centre du bassin pour favoriser le développement d'une paire de recirculation suffisamment grande, produite par la force centrifuge. Les deux paires de tourbillons symétriques situés sur les deux côtés, sont séparées par l'axe central du bassin ont été montrées (Figure 4.43). Dans ce sens, la rugosité du fond peut jouer un rôle important sur la redistribution des vitesses moyennes superficielles dépassant ($U \geq 0.150m/s$) qui persistent à un nombre de Reynolds plus élevé. Cette recirculation est accompagnée de deux petits tourbillons de forme triangulaire, situés au coin amont. Néanmoins, on s'attend, dans le futur, que l'évolution des études de recirculation soit dominée par des mécanismes non visqueux une fois la séparation du lit se produit (Rockwell, 2008).

La présente partie traite une profondeur ($h = 0.100m$) en présence d'un nombre de Reynolds pleinement développé où il caractérise l'importance des forces visqueuses dans un écoulement permanent et uniforme. L'analyse des travaux présentés par différents chercheurs confirme que sous l'effet des perturbations périodiques, la symétrie peut être observée pour un nombre de Reynolds suffisamment développé. Les zones de recirculation en eau peu

profonde dépend, essentiellement, du nombre de Reynolds et du facteur de forme. Néanmoins, le jet présente une symétrie instable qui passe par la suite à une symétrie parfaitement stable. D'après la (Figure 4.44) les vitesses observées sont plus stables, dominées par une configuration symétrique.

En conclusion, la dynamique de la couche limite sur fond rugueux continu à être un domaine de recherche très vaste et méconnue malgré les efforts qui lui sont consentis.

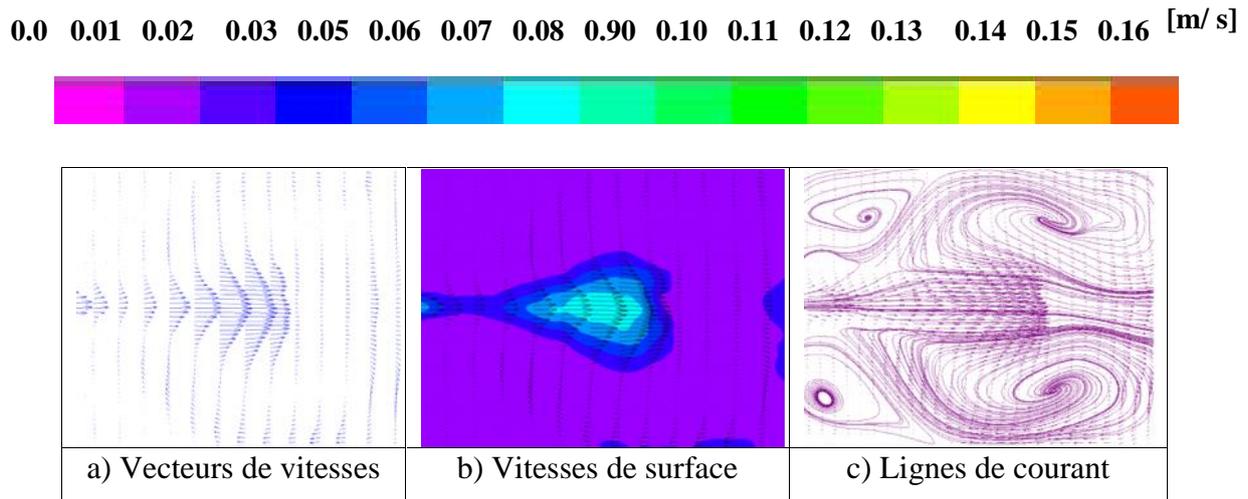


Figure 4.39 : Turbulence du champ d'écoulement extérieur pour un nombre de Reynolds

$$R_e = 28000, F_r = 0.283, \bar{k}_0 = 2.8mm, Q = 7.0l / s, h = 0.200m$$

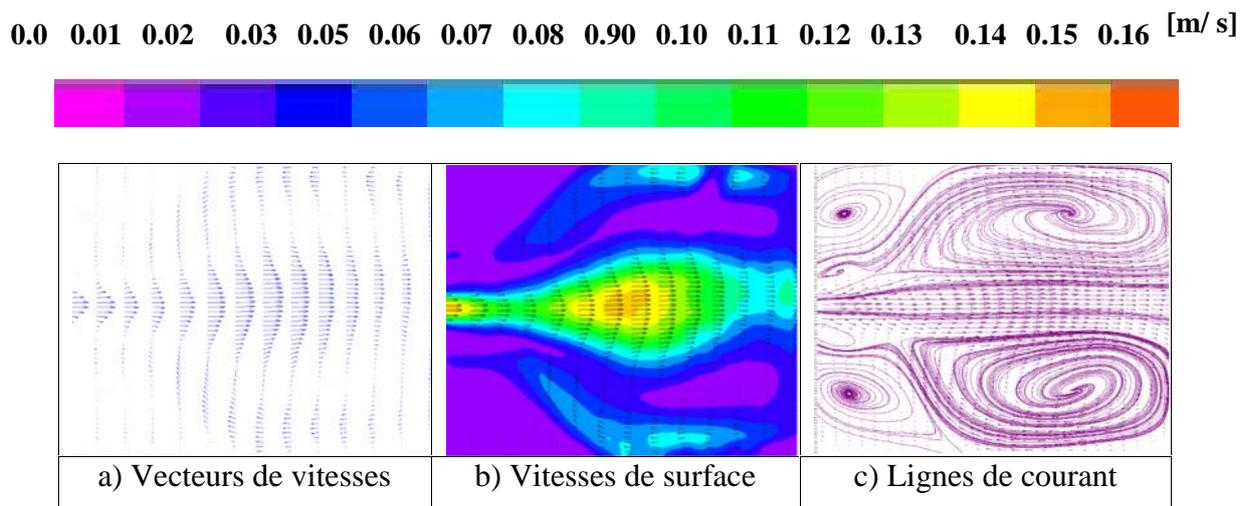


Figure 4.40 : Turbulence du champ d'écoulement extérieur pour un nombre de Reynolds

$$R_e = 28000, F_r = 0.283, \bar{k}_0 = 2.8mm, Q = 7.0l / s, h = 0.150m$$

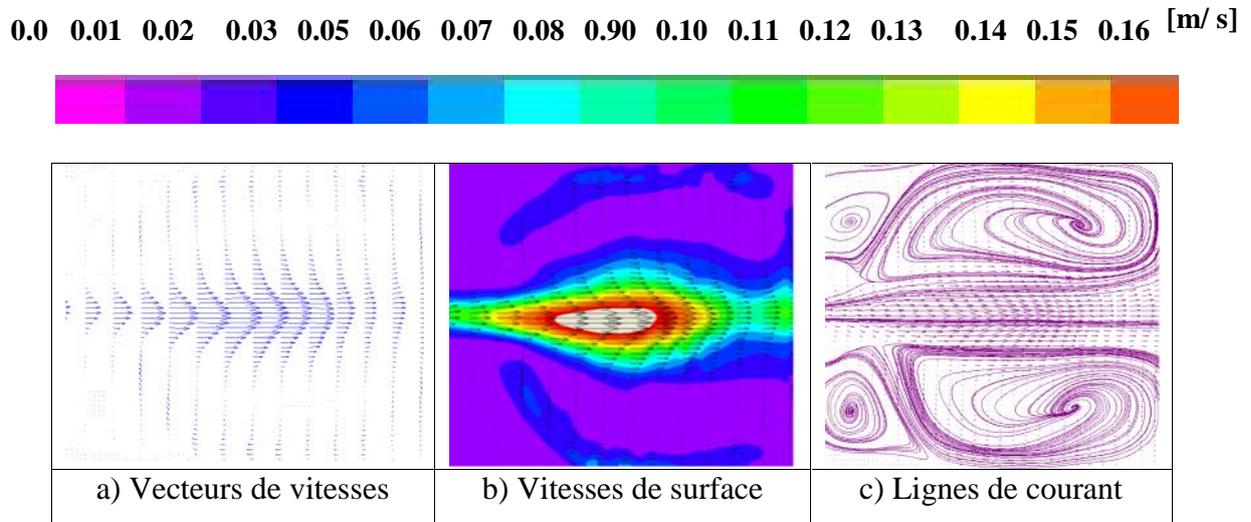


Figure 4.41 : Turbulence du champ d'écoulement extérieur pour un nombre de Reynolds

$$R_e = 28000, F_r = 0.283, \bar{k}_0 = 2.8mm, Q = 7.0l / s, h = 0.100m$$

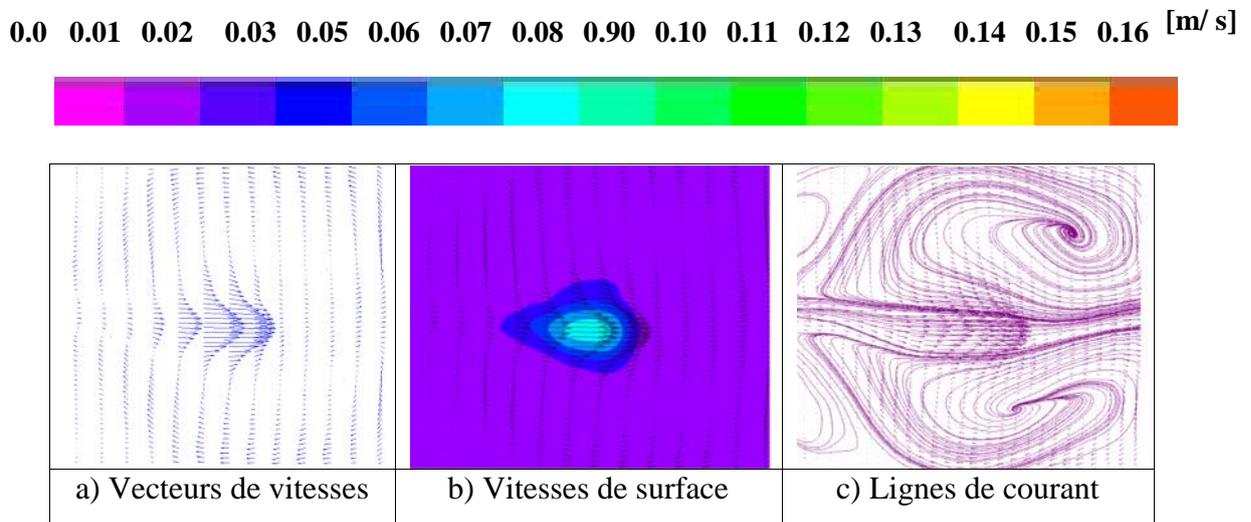


Figure 4.42 : Turbulence du champ d'écoulement extérieur pour un nombre de Reynolds

$$R_e = 14000, F_r = 0.14, \bar{k}_0 = 2.8mm, Q = 3.5l / s, h = 0.200m$$

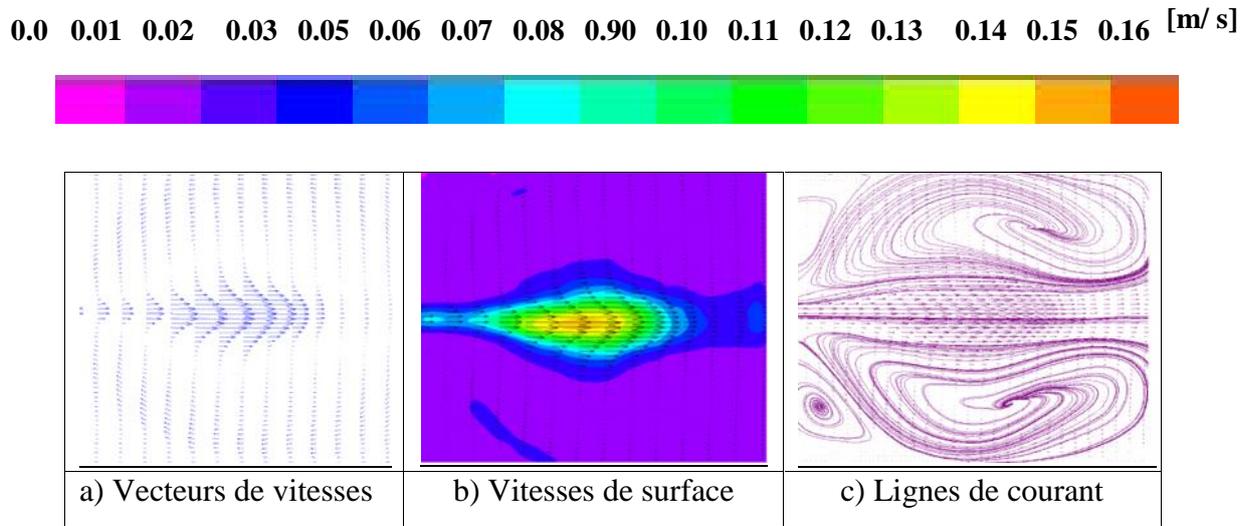


Figure 4.43 : Turbulence du champ d'écoulement extérieur pour un nombre de Reynolds

$$R_e = 14000, F_r = 0.14, \bar{k}_0 = 2.8mm, Q = 3.5l/s, h = 0.150m$$

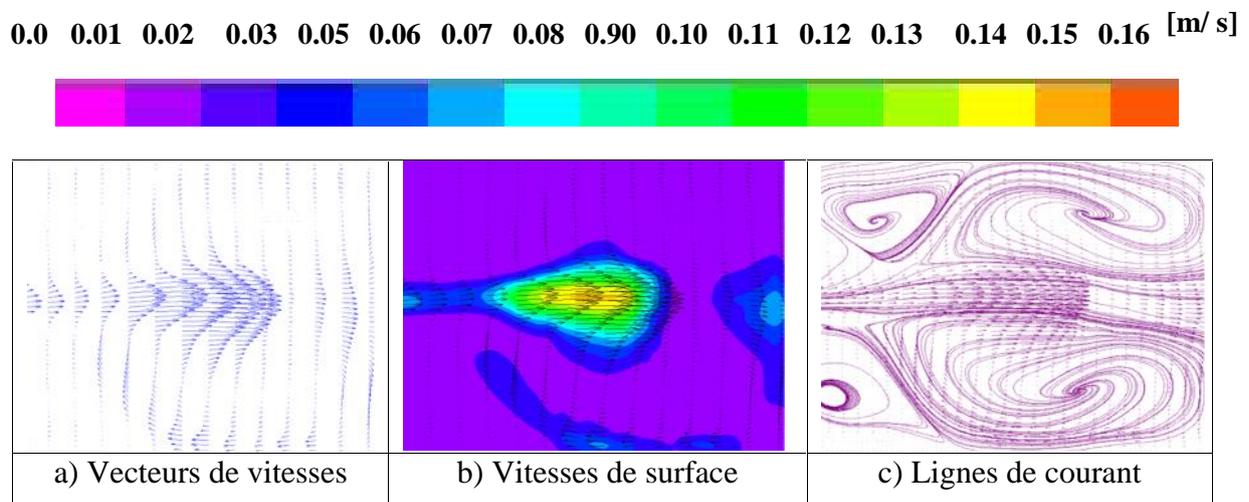


Figure 4.44 : Turbulence du champ d'écoulement extérieur pour un nombre de Reynolds

$$R_e = 14000, F_r = 0.14, \bar{k}_0 = 2.8mm, Q = 3.5l/s, h = 0.100m$$

CONCLUSION

L'objectif principal de ce travail de recherche est d'examiner l'effet de la rugosité du fond du réservoir de faible profondeur et géométrie variable sur le champ d'écoulement superficiel avec l'application du logiciel Flow Manager.

La distribution des vitesses de surface dans les réservoirs peu profonds ont été mesurées avec succès par la méthode *LSPIV*. Elle a fait la preuve d'un diagnostic d'un écoulement plus fiable où elle possède un potentiel pour caler des modèles hydrauliques plus complexes soit en (*2D* ou *3D*).

Les résultats d'essais présentés, apportent la preuve du bon fonctionnement et l'efficacité de la technique *LSPIV* qui est considérée comme un outil fiable et puissant pour le diagnostic des mesures des écoulements bidimensionnels. Elle a été révélée compétitive vis à vis des autres techniques notamment pour la mesure des vitesses superficielles dans les écoulements en surface libre. En soulignant l'intérêt expérimental de la recirculation à surface libre à fond lisse et rugueux qui peut être utilisée dans diverses activités notamment dans les projets d'exploitation et la gestion pour mesurer les vitesses des écoulements peu profond

CONCLUSION

L'objectif de ce travail de recherche est d'étudier, par des approches théoriques et expérimentales, les effets de la rugosité de la surface du fond du réservoir rectangulaire peu profond et géométrie variable sur le champ des vitesses superficielles. Dans ce sens, une étude bibliographique a montré que malgré les travaux déjà réalisés ou en cours de réalisation, nous connaissons encore très peu la dynamique fluviale du fond rugueux tant en terme de modélisation qu'en résultats expérimentaux. En effet, les études futures nécessitent beaucoup plus d'améliorations afin de pallier aux insuffisances scientifiques rencontrées dans la prédiction du champ d'écoulement.

Dans ce travail, les différentes étapes de mesure, le principe de fonctionnement ainsi que le traitement de la méthode de la vélocimétrie ultrason à effet Doppler pulsée menée en écoulement turbulent peu profond ont été étudiés par cinq sondes ultrasons dans un canal rectiligne. Néanmoins, les différentes expériences réalisées sur fond lisse et rugueux répondent bien à l'objectif principal tracé, montrant l'effet stabilisateur d'une rugosité homogène située au fond du bassin sur le champ des vitesses superficielles. Par ailleurs, la turbulence dans la couche limite reste un domaine très complexe et méconnu, contrairement, à l'écoulement turbulent sur un fond lisse qui est bien maîtrisé. D'autre part, cette étude a donné accès à la réalisation constitutive de deux méthodes distinctes *UVP* & *LSPIV* où plusieurs paramètres adimensionnels ont été examinés. Quel que soit le mode d'utilisation, cette recherche consiste à montrer que la méthode *UVP* reste parmi tant de méthode tout à fait apte à l'étude de la turbulence des écoulements dans les cours d'eau et les canaux à ciel ouvert. Cette technique s'avère être la plus adaptée à cause de sa simplicité d'utilisation pour la mesure des profils de vitesses qui fournit la preuve d'être capable d'effectuer des mesures à l'intérieur de l'écoulement. Elle permet de relever des vitesses à l'intérieur de l'écoulement alors que sa répartition présente 99% de la valeur du jet libre. Par ailleurs, nous avons tenté de montrer que la loi de la paroi prédisait bien que la rugosité équivalente moyenne dépend fortement du cisaillement de la surface du lit. Dès lors, nous avons essayé de montrer le rôle que peut jouer la surface rugueuse située dans la zone interne. L'analyse de l'écoulement turbulent pleinement développé nous a montré que la vitesse de frottement suit une loi logarithmique qui mène à une distribution horizontale.

- **Détermination de la rugosité équivalente moyenne du fond du canal rectangulaire en écoulement peu profond.**

Les essais préliminaires que nous avons effectués au-dessus d'un fond rugueux initialement lisse étaient indispensables pour mettre en place la méthodologie de détermination de la rugosité équivalente du fond afin de caractériser l'évolution des écoulements bidimensionnels.

Après avoir donné le principe du fonctionnement de la méthode de la vélocimétrie Ultrason à effet Doppler pulsée (*UVP*). Au cours de ce travail les différentes étapes de mesure ainsi que le mode de traitement ont été expliqué où il a été observé une bonne concordance entre les résultats expérimentaux ne montrant aucune différence significative entre les caractéristiques dans la couche externe. De ce fait, l'augmentation de la rugosité du fond provoque le ralentissement de l'écoulement Néanmoins au laboratoire, les différentes surfaces rugueuses mesurées nous permettent d'affirmer que les profils de vitesses révèlent la présence d'une zone interne influencée par les effets du fond rugueux qui augmente l'effort de cisaillement et l'énergie cinétique de la turbulence. Cependant, à travers les résultats d'essais, nous avons tenté de montrer que la vélocimétrie ultrason à effet Doppler pulsée apparait bien adaptée à l'approche expérimentale. En outre, nous avons essayé de montrer qu'à partir des profils de vitesses longitudinales, il est possible de présenter la loi logarithmique dans les canaux à fond horizontal et à surface libre avec des erreurs d'ajustement très faibles.

En paroi délimitée, le choix de cette loi est approprié à l'écoulement turbulent pleinement développé afin de décrire les profils des vitesses dans la région interne qui continue d'être un sujet controversé au sein de la turbulence. Par conséquent, la forme de ces profils de vitesses possède un effet significatif sur la stabilité du champ d'écoulement. Les résultats d'essais ont suggéré que l'effet de la rugosité du lit sur le champ d'un écoulement turbulent dépend des caractéristiques spécifiques de la rugosité et de l'effort du Reynolds. Ces résultats mettent en évidence l'évolution de l'écoulement turbulent montrant que la rugosité du fond diminue la vitesse et le niveau d'anisotropie par rapport à un fond lisse. Les effets de la rugosité du fond sur les profils des vitesses et de la température moyenne sont bien connus (voir par exemple l'article de revue de Raupach et al, 1991), bien qu'il y ait encore une certaine difficulté à identifier l'échelle de longueur qui caractérise la géométrie de la rugosité.

- **Effet de la rugosité de la surface du fond du réservoir à géométrie variable sur le champ d'écoulement superficiel en eau peu profonde**

L'objectif principal de ce travail de recherche est d'examiner l'effet de la rugosité du fond du réservoir peu profond et géométrie variable sur le champ d'écoulement superficiel. En effet, les essais expérimentaux ont été réalisés dans un bassin peu profond rectangulaire avec des dimensions maximales intérieures de ($L = 6m$) et ($B = 4m$) avec une entrée et sortie d'un canal rectangulaire de large ($b = 0.25m$) et ($l = 1m$) de longueur.

La distribution des vitesses superficielles ont été mesurées avec succès avec la méthode *LSPIV* qui a fait preuve d'un diagnostic d'écoulement plus fiable. Elle peut être utilisée dans diverses activités notamment dans les projets d'exploitation et de gestion pour la mesure des vitesses en écoulement à faible profondeur. L'étude de la configuration d'écoulement bidimensionnel permet d'analyser les conditions dans lesquelles une configuration devient symétrique plus stable et clarifie le processus physique régissant des essais expérimentaux. Néanmoins, dans des réservoirs du même rapport de forme ($L/B = 1.5$) mais de rugosité différente deux écoulements différents ont été observés.

Sur un fond lisse ($\overline{k_0} = 0.1mm$), le jet présente une asymétrie instable, en revanche, l'écoulement symétrique reste parfaitement stable sur un fond rugueux. Ils révèlent clairement qu'en vertu des conditions géométriques identifiées initialement symétriques, le jet s'avère asymétrique et peut se développer en fonction de certaines conditions de bords. Néanmoins, pour un seul facteur de forme (L/B), l'écoulement peut basculer d'une configuration asymétrique sur un fond lisse vers une symétrie plus stable sur fond rugueux.

Les résultats des essais expérimentaux dans différentes géométries permettent de montrer qu'en dépit des conditions géométriques expérimentales parfaitement symétriques, des écoulements asymétriques peuvent se développer en fonction de certaines conditions de bords. Ces résultats soulignent l'intérêt expérimental des écoulements de recirculation à surface libre au dessus d'un fond lisse et rugueux. Par ailleurs, ils montrent l'efficacité du bon fonctionnement de la technique *LSPIV* qui est considérée comme un outil fiable et puissant pour le diagnostic des mesures. Cette méthode a été révélé compétitive vis à vis des autres techniques de mesure, notamment pour mesurer la vitesse superficielle dans l'écoulement bidimensionnel.

Conclusion

La mesure de vitesses de surface par analyse d'images car c'est une méthode peu onéreuse, mettant en œuvre un matériel léger et facilement utilisable. En laboratoire, les mesures de vitesses de fluides par analyse d'images sont classiques pour de petites échelles et ce depuis plusieurs années. La méthode est connue sous le nom de Particle Image Velocimetry (*PIV*) et plus récemment, elle a été appliquée à des surfaces à grandes échelles, particulièrement, les rivières, sous le terme Large Scale Particle Image Velocimetry (*LSPIV*). Ces applications ont été fructueuses pour une large gamme de longueur et largeur réalisées de manière ponctuelles et en conditions d'illumination et d'ensemencement très bonnes et idéales. Il est à signaler que de nombreuses études ont mis en évidence l'importance des structures cohérentes au sein de l'écoulement turbulent où les difficultés à les définir ont conduit au développement de différentes techniques d'identification.

RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

Durant ces travaux de recherche, mesures et modèles ont été utilisés de différentes manières mais complémentaires dont l'une correspond à une démarche classique : des résultats de mesure et d'observations utilisés dans la construction du modèle d'essais, en l'occurrence de la répartition spatiale des vitesses pour un débit moyen donné.

Les résultats d'essais mentionnés sont d'ores et déjà encourageants et utiles pour la validation des codes numériques. Néanmoins, ils sont comparés avec les résultats de l'antérieure où des améliorations devront être apportées, montrant que le frottement du fond exerce une influence stabilisatrice sur l'écoulement peu profond. Par ailleurs, leur analyse permet de proposer de nouvelles stratégies qui ont contribué, en amont du bassin versant, à la maîtrise des apports sédimentaires. En effet, le maintien des réservoirs contre le processus de la sédimentation s'est révélée extrêmement important même s'il s'avère très coûteux dans les pays accidentés.

La compréhension de la turbulence dans la couche limite semble être un objectif très important pour les recherches futures. Par ailleurs, nous ne pouvons pas trouver des valeurs précises des écoulements turbulents à fond rugueux afin de déduire que sa compréhension reste toujours beaucoup moins méconnue et plus complexe qu'un fond lisse. En effet, il serait intéressant de considérer l'effet d'un fond hétérogène sur la stabilité du champ d'écoulement. Dans ce contexte, il serait, ainsi, intéressant d'étudier l'instabilité de l'écoulement turbulent au-dessus d'une pente variable afin de comparer les vitesses d'écoulement avec le fond horizontal. L'état actuel des connaissances de l'ampleur des effets de la rugosité du fond sur la turbulence n'a jamais été très bien maîtrisé durant ces décennies. Toutefois, la compréhension de la turbulence sur le fond rugueux semble être un objectif très important dans les recherches futures. En outre, la littérature actuelle indique qu'une mesure précise du frottement sur la paroi rugueuse pose encore un autre défi pour les expérimentateurs dans le futur.

Sur fond rugueux ($\bar{k}_0 = 2.8mm$), nous ne pouvons pas trouver des valeurs précises sur les écoulements turbulents pour déduire que sa compréhension reste toujours beaucoup moins méconnue et plus complexe que sur un fond lisse. D'autre part, il pourrait être intéressant d'étudier une rugosité hétérogène sur une pente du fond horizontale ou inclinée afin d'analyser et comparez la stabilité des écoulements extérieures. Ce ci nous impose l'étude de

l'effet d'une pente variable avec une entrée et sortie du canal asymétrique. A cela s'ajoute la détermination de la constante universelle de Von Kàrmàn ($\kappa = 0.4$) qui continue à être un domaine de recherche important dans la communauté de la turbulence où elle est supposée être indépendante du Reynolds Re . Les informations obtenues peuvent aider à assurer une bonne gestion en eau bien exploitée et leur pérennité, en atténuant le processus de l'alluvionnement des réservoirs. Ainsi il pourrait être intéressant d'étudier une rugosité hétérogène sur une pente à fond inclinée pour l'analyse et la comparaison de la stabilité des écoulements extérieures.

A la lumière des résultats obtenus dans cette étude, la fin se résume comme suit:

Un travail de recherche n'est jamais, véritablement, achevé car de nombreuses questions ont pu surgir au cours de ces essais qui feront l'objet d'un autre thème de recherche que nous n'avons pu examiner en détail. Au cours de cette recherche, nous avons essayé de répondre à certaines questions en étudiant, par voie expérimentale, l'effet de la rugosité de la paroi du fond sur le régime d'écoulement superficiel. Toutefois, la compréhension du processus de la turbulence dans la couche limite rugueuse semble être un objectif très important pour les recherches futures. Il serait intéressant de considérer l'effet d'un fond hétérogène de pente incliné et sur la stabilité du champ d'écoulement. De même, il serait très intéressant d'étudier l'instabilité de l'écoulement turbulent au dessus d'une pente variable afin de comparer les vitesses moyennes d'écoulement avec notre fond horizontal.

Cette partie résume les résultats expérimentaux et montre les recommandations pour les pratiques hydrodynamiques d'ingénierie où les remarques portant sur ces résultats sont données avec quelques perspectives pour les travaux futurs sont fournies. Cependant, des perspectives intéressantes dans le domaine du traitement d'images peuvent concerner les zones d'ombres où le développement d'un éventuel algorithme permettra la détection de ces zones. En effet, le problème des reflets est d'identifier au mieux les contours de ces zones qui sont difficiles à examiner. Si on veut procéder à la bonne mesure de ces deux méthodes, il est indispensable de connaître le bon fonctionnement de tout instrument. Néanmoins, la *LSPIV* fait encore l'objet de beaucoup d'études pour améliorer son efficacité dans diverses conditions de fonctionnement. Ces techniques ont ouvert une ère nouvelle en simplifiant les observations hydrologiques et en réduisant leur coût, tout en augmentant le nombre de mesure à faire.

L'emploi de cette nouvelle génération d'instruments pourrait apporter des précisions sur des processus importants tels que l'écoulement dans le lit principal et l'effet des aménagements sur l'écosystème. Ces instruments pourraient contribuer à améliorer le processus de la stabilisation, la modification de la bathymétrie, l'écologie des cours d'eau.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. Adrian R. J. (1991). Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid mechanics. *Annual Review of Fluid Mechanics* 23, pp 261–304.
- [2]. Akinlade G. O. A. (2005). Effect of surface roughness on the flow characteristics in a turbulent boundary layer. PhD in Department of Mechanical Engineering University of Saskatchewan.
- [3]. Albagnac J. (2010). Dynamique tridimensionnelle des dipôles tourbillonnaires en eau peu profonde. Thèse de Doctorat, Institut de mécanique des fluides de Toulouse (IMFT) Université Paul Sabatier Toulouse III. France.
- [4]. Arrus R. (1985). L'eau en Algérie de l'impérialisme au développement. O.P.U. Alger, Algérie.
- [5]. Battaglia F., Tavener S., Kulkarni A. K., & Merkle C. L. (1997). Bifurcation of low Reynolds number flows in symmetric channels. *AIAA Journal*, 35: 97–117.
- [6]. Berriche E., Aloui F., Pierra D., Pintrand G., Gros L., Hermon C., Legrand J. (2008). Investigations expérimentales par la technique de PIV en vue de valider des approches numériques modélisant un écoulement turbulent à travers des élargissements brusques et progressifs. Congrès Francophone de Technique Laser, CFTL, Futuroscope.
- [7]. Bonakdari H., Larrarte F., Joannis C. (2006). Profil de vitesses dans les couches limites turbulentes. Département de Génie Civil, Université de Razi, Iran, Laboratoire central des ponts et chaussées, Division eau et environnement, Bouguenais, Cedex.
- [8]. Boillat J. L., Oehy Ch., Schleiss A. J. (2003). Gestion de la sédimentation des réservoirs Suisses, 3^{ème} Forum Mondial de l'eau, Kyoto, Japon, pp 143–158.
- [9]. Camnasio E., De Cesare G., Kantoush A. S. (2010). Flow field and sediment deposition in rectangular shallow reservoir with non symmetric inlet and outlet configuration. 7th ISUD Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg Sweden.

- [10]. Camnasio E., Orsi E., Schleiss A. (2011). Experimental study of velocity fields in rectangular shallow reservoirs. *Journal of Hydraulic Research* Vol. 49, No.3, pp. 352–358.
- [11]. Carlier M. (1980). *Hydraulique générale et appliquée*. Edition Eyrolles, Collection de la direction des études et recherches d'Electricité De France.
- [12]. Cebeci T. (2004). *Analysis of turbulent flows*. Second Revised and Expanded Edition Elsevier Ltd, Oxford, UK, 372.
- [13]. Clauser F. H. (1954). Turbulent Boundary Layers in Adverse Pressure Gradient. *Journal. Aeronaut. Sci.*, 21, pp. 91-108.
- [14]. Choufi L. Kettab A. (1997). Effet de la granulométrie sur le phénomène de l'évaporation. Thèse de Magister, Département d'Hydraulique, ENP Alger, Algérie.
- [15]. Choufi L., Kettab A., Schleiss A. (2014). Effet de la rugosité du fond d'un réservoir rectangulaire à faible profondeur sur le champ d'écoulement. *Houille blanche* n° 5, 79-88.
- [16]. Comolet R. (1963). *Mécanique Expérimentale des Fluides: Dynamique des fluides réels, turbomachines*, Tome II, Paris, Masson & Cie, pp 85–115.
- [17]. Coles D. (1956). The law of the wake in the turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, volume 1, 191-226.
- [18]. Cloens E. (2010). *Couche limite turbulente dans les écoulements à surface libre: Etude expérimentale des effets de macro rugosités*. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier Toulouse III, France.
- [19]. Chen D. & Jirka G. H. (1995). Experimental study of plane turbulent wake in shallow water layer. *Fluid. Dyn. Res.* **16**, 11–41.
- [20]. Chu V. H. & Khayat R. E. (1983). Stability of turbulent shear flows in shallow channel. *Proc. XX Congress IARH, Moscow*, **3**, 128-133.
- [21]. Chen D. & Jirka G. H. (1997). Absolute and convective instabilities of plane turbulent wakes in a shallow water layer. *Journal of Fluid Mechanics*. 338, 157–172.

- [22]. Chen D. & Jirka G. H. (1998). Linear instability Analyses of Turbulent Mixing layer and jets in Shallow water layers. *Journal of Hydraulic Research*, 36, N°5.
- [23]. Chu V, Jirka G. H. (2002). Large Scale PIV-measurements at the surface of shallow water flows. *Flow Meas., and Instrument.* 13, 237–245.
- [24]. Chu V, Liu E, Altai W. (2004). Friction and confinement effects on shallow recirculating flow. *Journal Environ. Eng. Sci.* 3(5), 463–475.
- [25]. Dantec Dynamics. (2007). Working principles of PIV Educational Slideshow Presentation, <http://www.dantecdynamics.com/Info/Posters/Index.html> & March 2.
- [26]. Debbache M., Ghamri A., Sahnoune C., Ismail K. (2005). Effet de la rugosité sur le ressaut hydraulique dans un canal de profil en U (Partie 1). LRH souterraine et de surface, *Journal* ISSN 1112–3680, N° 04, Juin, pp 107–118.
- [27]. De Cesare G. (1997). Manuel d'utilisation, de mesure des profils de vitesses, Instrument UVP X-3-PS, LCH, EPFL Swizerland.
- [28]. De Cesare G. (1998). Alluvionnement des retenues par courants de turbidité. Thèse de Doctorat n°1820, Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH), Ecole polytechnique Fédérale EPFL, Lausanne, Swizerland.
- [29]. Dewals B. J., Kantoush S. A., Erpicum S., Pirotton M., Schleiss A. J. (2008). Analysis of flow instabilities in shallow rectangular basins. *Journal of Environmental Fluid Mechanics*, Volume 8, Number 1, pp 31–54.
- [30]. Dufresne M., Dewals B. S., Erpicum S., Archambeau P., Pirotton M. (2010). Classification of flow patterns in rectangular shallow reservoirs. *Journal of Hydraulic Research*, Volume 2, pp 197–204.
- [31]. Fujita I., Muste M., and Kruger A. (1998). Large Scale PIV for Flow analysis in Hydraulic Engineering Applications. *Journal of Hydraulic Research*, Volume 36, N° 3, pp 397–414.
- [32]. Ghidaoui M. S., Kolyshkin A. A. (1999). Linear stability analysis of lateral motions in compound channels with free surface. *Journal of Hydro. Eng., ASCE*, 125(8), 871-880.

- [33]. Ghidaoui M. S., Kolyshkin A. A., Liang J. H., Chian F. C., Xu K. (2006). Linear and non-linear analysis of shallow wakes. *Journal of Hydraulic Mech.* Volume 548, 309-340.
- [34]. Graf W. H. & Altinakar M S. (1991) *Hydrodynamique*. Edition Eyrolles, Paris. *Traité de Génie Civil, Laboratoire de Recherche Hydraulique, EPFL, Lausanne, Switzerland.*
- [35]. Graf W. H. & Altinakar, M. S. (1993). *Hydraulique fluviale, Tome 1 (Ecoulement permanent uniforme et non uniforme.)*, Volume 16, *Traité de Génie Civil, EPFL, Lausanne, Switzerland. Presses polytechniques et universitaires romandes.*
- [36]. Graf, W. H. & Altinakar M. S. (2000). *Hydraulique fluviale (écoulement et phénomènes du transport dans les canaux à géométrie simple)*. Volume 16, *Traité de Génie Civil, Presses Polytechniques et Universitaire, EPFL, Lausanne, Switzerland.*
- [37]. Guyon E., Hulin J.P., Petit L. (2001). *Hydrodynamique physique, nouvelle édition, revue, CNRES, Editions EDP Sciences, France.*
- [38]. Hauet A., Le Coz J., Dramais G., Carre C., Legras D., Pierrefeu G., Godayer C. (2009). *Méthodes innovantes pour la mesure des débits fluviaux en continu : profileur Doppler fixe horizontal (H-aDcp) et analyse d'images LSPIV*. *Houille Blanche*, N° 3. 123-131.
- [39]. Hug M. (1975). *Mécanique des fluides appliqués aux problèmes d'aménagement et énergétique*. E.N. des Ponts et Chaussées, Edition Eyrolles, pp163-198, France.
- [40]. Holland K. T., Puleo J. A., Kooney T. N. (2001). *Quantification of the swash flows using video-based Particle Image Velocimetry*. *Coastal Engineering* 44, pp 65–77.
- [41]. Jaàfar W. (2006). *Etude des champs de vitesse dans les effluents des réseaux d'assainissement : Expérimentation et simulation numérique*. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg, France.
- [42]. Jirka G. H. (2001). *Large Scale flow structures and mixing processes in shallow flows*. *Journal Hydraulic Research*, volume 39, 567–573.
- [43]. Jimenez J. (2004). *Turbulent Flows over Rough Wall*. *Annual Reviews Fluid Mechanics*, 36, pp. 173-196.

- [44]. Kantoush A. S., Bollaert E. F. R., Boillat J. L., Schleiss A. J. (2005). Suspended load transport in shallow reservoirs. Final proc. XXXI, IAHR, Congress, Korea Water Resources Association, Seoul pp 1787- 1799. South Korea.
- [45]. Kantoush S. A., Boillat J. L., Schleiss A. J., Uijttewal .W.S.J. (2006). Sedimentation processes in shallow basins with different geometries. IAHR Proc. of International Conference on Fluvial Hydraulics, Lisbon, Portugal, 1623- 1631.
- [46]. Kantoush A. S., Bollaert E. F. R., Boillat J. L., Schleiss A. J. Uijttewaal W. S. J. (2006). Experimental study suspended sediment transport and deposition in a rectangular shallow reservoir. River Flow, London. ISBN. 0-415-40815-6.
- [47]. Kantoush S. A., De Cesare G., Boillat J. L., Schleiss A. J. (2007). Flow field investigation in rectangular shallow reservoir using UVP, LSPIV and numerical modelling. Science Direct, Flow Measurement and Instrumentation, Volume 19, 139–144.
- [48]. Kantoush S. A. (2007). Symmetric or asymmetric flow patterns in shallow rectangular basins with sediment transport. In 32nd Congress of IAHR, John F. Kennedy Student competition, Venice, Italy.
- [49]. Kantoush S. A., Bollaert E. F. R., Schleiss A. J. (2008). Experimental and numerical modelling of sedimentation in a rectangular shallow basin, Science Direct, International journal of sediment Research, volume 23, N°3, 212–232.
- [50]. Kantoush S. A. (2008). Experimental study on the influence of the geometry of shallow reservoirs on flow patterns and sedimentation by suspended sediments, PhD Thesis, n°4048, LCH, EPFL, Lausanne, Swizerland.
- [51]. Kantoush S. A., Bollaert E. F. R., Boillat J. L., Schleiss A. J. (2008). Influence of shallow reservoir geometry on the flow pattern and sedimentation process by suspended Sediments. Journal Wasser, Energie, Luft, Volume 100, num.1, 13–21.
- [52]. Kantoush S. A., Dewals B., Erpicum S., Schleiss A., Piroton M. (2008). Flow in Shallow rectangular basins: experimental study and 2D numerical simulations. Proc 8th International Conference on hydro-science and Engineering (ICHE) Nagoya, Japan.

- [53]. Kantoush S. A., Schleiss A. J. (2009). Large Scale PIV surface flow measurements in shallow basins with different geometries, *J. of Visualization*, Vol. 12, Number 4, 361–373.
- [54]. Kolyshkin A. A., Ghidaoui M.S. (2003). Stability analysis of shallow wake flows. *Journal of Fluid Mechanics*. Volume 494, 355-377.
- [55]. Krogstad A., Antonia R. A. (1999). Surface roughness effects in turbulent boundary layers. *Experiments in Fluids*. Volume 27, 450–460.
- [56]. Labiod C. (2005). *Ecoulement à surface libre sur fond de rugosité inhomogène*. Thèse de Doctorat, n°2242, Institut National Polytechnique (INP) Toulouse, France.
- [57]. Lavelli A., Boillat J. L., Schleiss A. (1999). Surface roughness determination based on Velocity Profile measurements. 2nd International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Engineering, Switzerland.
- [58]. Lee S. H. & Sung H. J. (2007). Direct Numerical Simulation of the turbulent boundary layer over a rod-roughened wall. *Journal of Fluid Mech.* (2007), vol. 000, 1–22.
- [59]. Met-flow S/A. (2005). *Ultrasonic Velocity Profiler Monitor–Operation Manual, Mode UVP XW-3-PS, User’s guide*, Lausanne, Switzerland, visit <http://www.met-flow.ch>
- [60]. Meselhe E. A., Peeva T., Muste M. (2004). Large Scale Particle Image Velocimetry for Low Velocity and Shallow Water Flows. *J. of Hydraulic Engineering*, Volume 130, N°9. 937–940.
- [61]. Muste M., Kruger A., Bradley M. (1998). Large-scale particles images velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *Journal of Hydraulic Research*, Volume 36, Issue 3, 397–414.
- [62]. Muste M, Xiong Z., Bradley A., Kruger A. (2000). Large Scale Particle Image Velocimetry—a Reliable Tool for Physical Modelling, *Proceeding of ASCE 2000 Joint Conference on water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management*, Minneapolis, MN.
- [63]. Muste M., Kim W., Fulford J. M. (2008). Techniques Hydrodynamiques: Perfectionnement des instruments pour la cartographie hydrodynamique des cours d’eau. *Fluid Journal of Mechanics*, Volume 489, 325–344.

- [64]. Mihoubi M. K, Belorgey M., Levacher D., Kettab A. (2007). Application of the Ultrasonic Doppler Velocimetry to the free-surface Turbulent Flow. 2^{ème} Colloque International sur l'Eau et l'Environnement, Sidi Fredj, Algérie.
- [65]. Nikuradse J. (1933). Laws of flow in rough-pipes, Translation in National Advisory Committee for aeronautic, technical memorandum 1292, NACA, Washington 1950, p 62.
- [66]. Oehy C. (2003). Effects of obstacles and jets on reservoir sedimentation due to turbidity currents. PhD Thesis, communications LCH, N°15, Swiss Federal Institute of Technology. Lausanne, Switzerland.
- [67]. Prandtl L. (1952). Führer durch die Strömungslehre, Fr. Vieweg & Sohn, Braunschweig.
- [68]. Rolland T. (1994). Développement d'une instrumentation Doppler Ultrasonore : Application aux écoulements turbulents en hydraulique dans les canaux. PhD Thesis, N°1281, (LRH), (EPFL) Lausanne, Switzerland, 159.
- [69]. Rockwell D. (2008). Vortex formation in shallow flows. Physics Journal of Fluid, Volume 20, 031303 American Institute of Physics, AIP. Pennsylvania, U.S.A.
- [70]. Sinniger R. O., Hager W.H. (1989). Constructions Hydrauliques (Ecoulements stationnaires) Traité de Génie Civil, Volume 15, Presses Polytechniques Romandes, EPFL, Lausanne, Switzerland.
- [71]. Shipara M., Degani D. & Weills D. (1990). Stability and existence of multiple solutions for viscous flow in suddenly enlarged channels. Comput fluids 18 (3), 239-258.
- [72]. Takeda Y. (1995). Velocity Profiler Measurement by Ultrasonic Doppler Method Experimental, thermal and fluid science 10 (4), 444- 453.
- [73]. Takeda Y. (1999). Ultrasonic Doppler method for Velocity Profiler measurement in Fluid dynamics and Fluid Engineering. Experiments in Fluid. Vol. 26, (3) 177-178, Switzerland.
- [74]. Townsend A. A. (1976). The Structure of Turbulent Shear Flow. Second edition, Cambridge University Press, 44.

- [75]. Uijtewaal W. & Booij R. (2000). Effects of shallowness on the development of free-surface mixing layers. *Phys. Fluids*, 12(2), 394-402.
- [76]. Uijtewaal W. S. J. & Jirka G. H. (2003). Grid Turbulence in Shallow Flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Volume 489, 325–344.
- [77]. Vikram R., Snehamoy M., Dipankar S. (2010). Analysis of the Turbulent Fluid Flow in an asymmetric Sudden Expansion. *International Journal of Engineering Science and Technology*, Volume 2(6), 2010, 1569-1574.
- [78]. Vreugdenhil, C. B. (1994). Numerical methods for shallow water flow, 21-25. Kluwer Academic, Dordrecht.
- [79]. Weitbrecht W. S. J. Kühn V. G., Jirka G. H. (2002). Large Scale PIV measurements at the surface of shallow water flows. *Flow Measurement and Instrument*, 13, 237–245.
- [80]. Zaouali S. (2008). Structure et modélisation d'écoulement à surface libre dans des canaux de rugosité inhomogène. Thèse de doctorat, Sciences et Techniques de l'Ingénieur. Ecole Nationale d'Ingénieur de Tunis, Tunisie.