

Effet de la rugosité du fond d'un réservoir rectangulaire à faible profondeur sur le champ d'écoulement

Latifa CHOUIFI¹, Ahmed KETTAB², Anton J. SCHLEISS³

¹ Université Constantine 1, Faculté des Sciences de la Technologie, Département de Génie-Civil, Campus Ahmed Hamani, route d'Ain El Bey, Constantine 25000, Laboratoire de Recherche des sciences de l'eau, Ecole Nationale Polytechnique Alger, Algérie

E-mail: latifa.choufi@epfl.ch, lchoufi@yahoo.fr

² Laboratoire de Recherche des Sciences de l'Eau, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 10 Avenue Hassani Badi El Harrach, Alger, Algérie

E-mail: kettab@yahoo.fr

³ Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL-ENAC-LCH, Station 18, CH-1015 Lausanne, Suisse

E-mail: anton.schleiss@epfl.ch

RÉSUMÉ. – La sédimentation de la charge en suspension dans les réservoirs est un phénomène assez complexe à gérer. Des solutions existent pour maîtriser ou réduire l'alluvionnement mais elles ne sont généralement pas faciles à expliquer, surtout dans les retenues traversées par l'écoulement. Dans ce contexte, une étude expérimentale a été réalisée dans le but d'examiner l'effet de la rugosité du fond du réservoir peu profond sur le mode d'écoulement. Les essais ont été effectués dans un bassin de largeur $B = 4$ m, de longueur $L = 6$ m et de profondeur $h = 0.2$ m. Les profils des vitesses longitudinales ont été mesurés par des capteurs UVP (Ultrasonic Velocity Profiler). Une mesure par Large Scale Particle Image Velocimetry LSPIV a été également utilisée pour définir les champs de vitesses en surface par interprétation d'images vidéo zénithales. Sur fond lisse, les écoulements dans le réservoir se développent de manière asymétrique en dépit des conditions géométriques initialement symétriques. Avec l'ajout d'une rugosité au fond du bassin, les conditions d'écoulement se stabilisent et présentent un champ de vitesses symétrique. Les résultats obtenus ont montré que le régime d'écoulement est très sensible aux conditions de bords qui influencent significativement le champ des vitesses de surface dans un réservoir peu profond. L'augmentation de la rugosité du lit accroît le frottement et l'épaisseur de la couche limite, avec pour conséquence de rétablir la symétrie d'écoulement.

Mots-clés : réservoir peu profond, rugosité du fond, UVP, LSPIV, champ d'écoulement.

Bed roughness effect on flow field in rectangular shallow reservoir

ABSTRACT. – The sedimentation by suspended sediments in the reservoir is a complex phenomenon operates. Actually, some solutions exist to control or to reduce reservoir sedimentation but, generally, they are not very easy to implement especially in reservoir crossed by the flow. In this context, an experimental study was studied in order to examine the bottom roughness effect in a shallow reservoir. The tests were carried out in rectangular reservoir of width $B = 4$ m, length $L = 6$ m and depth $h = 0.2$ m. The velocity profiles were measured by UVP (Ultrasonic Velocity Profiler). LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) was also used to define the field velocity on the surface by interpreting of zenith video images. On the smooth bottom, asymmetrical flow is developed in the reservoir in spite of boundary conditions and geometrical perfectly symmetrical. With the addition a roughness surface at the bottom of reservoir; conditions flow are stabilized and presented a symmetrical recirculating. Experiment has showed the flow is very sensitive to geometrical conditions which significantly influence the velocity field in the basin.

The increase in bottom roughness, the friction forces and turbulent thickness of boundary conditions layer with for consequence restoring in the symmetric flow.

Key-words: shallow flow, roughness of the bottom, UVP, LSPIV, flow field.

I. INTRODUCTION

Les écoulements bidimensionnels naturels ou artificiels dépendent fortement 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 de la rugosité du lit. Ces écoulements sont sujets à des perturbations continues qui peuvent être fréquemment rencontré dans la nature dont les fleuves, les estuaires, les zones côtières et les retenues se rangent dans cette catégorie. Par ailleurs, de nombreuses contributions expérimentales et numériques relatives aux écoulements

peu profonds ont été mentionnées dans la littérature où très peu de thèmes se sont intéressés au détail de la zone de sillage [Chen et Jirka, 1995]. Dans ce sens, la stabilité non linéaire de l'écoulement bidimensionnel du sillage montre que l'évolution de l'instabilité est régie de la formulation de l'équation de Ginzburg-Landau [Kolyshkin et Ghidaoui, 2003]. Cependant, dans un récent article, d'autres travaux ont été réalisés par Chen et Jirka, [1997] afin d'analyser le domaine de la stabilité et pour pouvoir déterminer l'effet de l'instabilité d'un écoulement latéralement cisailé par la résolution de l'équation d'Orr-Sommerfeld moyennée toute la

profondeur d'eau. Essentiellement, pour décrire l'évolution spatiale et temporelle des perturbations, ils ont montré que la stabilité linéaire présente les effets de la viscosité de l'eau et du frottement du fond Chen et Jirka, [1998], Shipara *et al.*, [1990]. Cependant, par expérimentation et modélisation numérique Mizushima et Shiotani, [1996-2001] ont examiné l'effet de l'allongement du bassin sur la stabilité linéaire des écoulements dans les canaux avec élargissement brusque. La littérature a fait référence à différents résultats d'analyse des travaux réalisés, particulièrement, par Chu et Khayat [1983], Chen & Jirka [1997, 1998, 2002], Ghidaoui et Kolyshkin [1999] ou Uijtewaal et Jirka [2003].

L'effet de la géométrie variable du réservoir peu profond sur le champ des écoulements bi-phasique et le processus d'alluvionnement par les sédiments en suspensions a été étudié au laboratoire LCH, EPFL par Kantoush, [2008]. Il a montré qu'en dépit des conditions expérimentales géométriques identifiées initialement symétriques, des écoulements asymétriques ont été observées [Kolyshkin et Ghidaoui, 2003]. Les résultats antérieurs disponibles ont fait l'objet de prolongations de plusieurs travaux de recherche théorique, modélisation numérique et essais expérimentaux afin d'analyser le domaine de la stabilité linéaire des écoulements dans les eaux peu profondes. Par ailleurs, la modélisation numérique de Dewals *et al.*, [2008] décrit la croissance des perturbations transversales dans un écoulement asymétrique résultant des conditions initiales et aux limites qui se développe dans une géométrie symétrique. Ainsi, cela a été présenté par une autre étude expérimentale menée à l'université de Liège (Belgique) par Dufresne *et al.* [2010] où il a introduit un critère beaucoup plus général impliquant à la fois la longueur et l'élargissement du réservoir ainsi que la largeur du canal d'entrée. Cet effet a prédit, par l'analyse adimensionnelle, la classification de la transition des écoulements asymétriques et symétriques dans les réservoirs rectangulaires à faible profondeur. Par ailleurs, la validité de ce critère a été, ainsi, confirmée par les travaux expérimentaux de Camnasio *et al.*, [2011] menés au LCH sur le même modèle pour analyser la position asymétrique des canaux d'entrée et de sortie sur le champ des vitesses superficielles et le volume des sédiments emprisonné dans le réservoir [Vikram *et al.*, 2010]. L'apport de ces sédiments en suspensions a permis de mettre en évidence dans la partie latérale, principalement au milieu du bassin, la formation d'une zone de recirculation pour des géométries identifiées asymétriques.

Dans cet axe, une étude a été présentée dans le cadre du prolongement des essais réalisés dans le même modèle expérimental pour un domaine de recherche plus élargi. Ce travail de laboratoire évalue la transition de l'écoulement asymétrique et symétrique au dessus d'un fond rugueux initialement lisse par des combinaisons géométriques. Après une récapitulation des résultats antérieurs et en conservant les conditions symétriques de la géométrie d'entrée et de sortie des canaux, d'autres expériences ont été menées pour analyser la stabilité linéaire des écoulements permanents et uniformes dans les réservoirs peu profonds à géométrie variable. L'effet de la friction du fond sur le mode d'écoulement superficiel a été examiné dans un réservoir de référence ($L \times B = 6m \times 4m$). Par la suite, la longueur et la largeur du bassin ont été diminuées systématiquement pour un débit maintenu constant, montrant qu'en dépit d'une configuration géométrique symétrique, des champs d'écoulement asymétriques ont été développés. Sur fond lisse, les résultats obtenus révèlent la présence d'un écoulement asymétrique par rapport à l'axe central du bassin où le jet

principal est dévié sur le côté en présence d'un grand vortex bien positionné au milieu. Il est accompagné de deux autres petits tourbillons situés dans la zone morte, au coin amont du bassin. Tandis que sur le fond rugueux, l'écoulement devient rectiligne le long de l'axe central et bascule vers une configuration symétrique beaucoup plus stable avec la formation de deux paires de tourbillons sur chaque côté du bassin.

En conclusion, l'étude menée sur fond rugueux et lisse montre que des écoulements asymétriques peuvent se développer dans une géométrie symétrique sous certaines conditions géométriques et hydrauliques. Les observations présentées par les différents auteurs sont similaires, montrant un parfait accord entre les configurations d'écoulement observées en eau peu profonde [Camnasio *et al.*, 2011, Dewals *et al.*, 2008, Dufresne *et al.*, 2010 ou Kantoush et Schleiss, 2009].

II. MODÉLISATION PHYSIQUE

Le dispositif expérimental est fabriqué en PVC, de forme rectangulaire de dimensions intérieures de $L = 6$ m de longueur, une largeur de $B = 4$ m et une profondeur de $h = 0.2$ m (Figure 1). Le réservoir à fond horizontal $I \approx 0$ est relié à des canaux d'entrée et de sortie symétriques de largeur $b = 0.25$ m et de longueur $l = 1$ m. Une vanne de dérivation montée sur la conduite d'alimentation permet de maintenir l'écoulement permanent ou l'approvisionnement en eau est assuré, en circuit fermé, par un débitmètre électromagnétique. Un déversoir réglable de forme rectangulaire est installé en amont de la chute d'eau qui permettra de mesurer par limnimétrie le niveau d'eau amont et aval du bassin de manière à satisfaire la relation « niveau-débit ». Dans tous les cas, le débit $Q = 7$ l/s est maintenu constant, excepté pour les essais n° 3 et 4. Pour favoriser le développement d'un écoulement uniforme et pouvoir éliminer toutes les perturbations engendrées par les longues vagues, deux grilles en nid d'abeilles ont été installées sur toute la largeur b du convergent. Un bassin de restitution permettra la récupération du traceur pour une autre réutilisation.

Dans le canal d'entrée, le modèle est exploité en similitude de Froude ($Fr < 1$) où le régime d'écoulement est du type turbulent-fluvial, déterminé systématiquement par la relation $Fr = u/\sqrt{gh}$. Tandis que, le choix de la distance entre l'entrée étroite du canal et l'élargissement du bassin est pris de telle façon que le nombre de Reynolds $Re = uh/\nu$ soit suffisamment élevé ($Re \leq 28000$) afin d'assurer une turbulence parfaitement développée (u désigne la vitesse d'écoulement et ν la viscosité cinématique de l'eau).

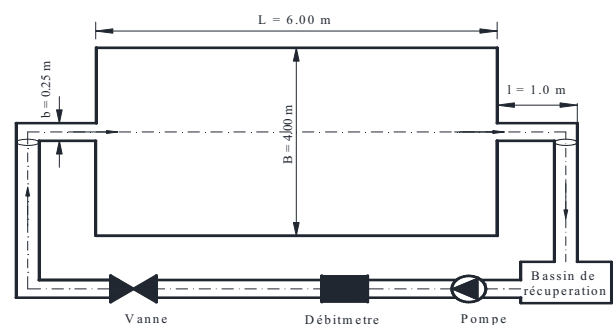


Figure 1 : Plan du modèle physique de référence $L = 6$ m, $B = 4$ m avec schéma du circuit hydraulique fermé.

Ce paramètre adimensionnel permet au facteur d’allongement AR d’être utilisé comme variable dans le phénomène de la rupture de la symétrie. Des parois (murs) mobiles fabriquées en *PVC* peuvent être déplacées afin de modifier les différentes sections de l’installation expérimentale, permettant d’analyser sur fond rugueux initialement lisse, l’effet de différentes combinaisons géométriques sur la transition du champ des vitesses superficielles. Cela permet de définir les deux facteurs géométriques adimensionnels d’allongement $AR = L/B = 0.5–12$ qui caractérise la géométrie du bassin. Tandis que le facteur d’élargissement $ER = B/b = 2–16$ caractérise l’agrandissement brusque entre la largeur du canal b et celle du bassin B afin de prédire la transition asymétrique et symétrique (Tableau 3). Par ailleurs, il convient de rappeler que la largeur du canal est maintenue constante durant toute l’étude expérimentale pour définir le paramètre ER . Les résultats des essais préliminaires des surfaces rugueuses étudiées ont permis de déterminer le choix de la rugosité équivalente du fond après avoir calculé l’écart type et la moyenne.

Par ailleurs, une seule surface rugueuse synthétique (type gazon de jardin) d’épaisseur $e=6.2mm$ a été retenue pour l’étude de cet article. Cependant, la rugosité a été, soigneu-

sement, collée dans le sens longitudinal de l’écoulement et uniformément répartie le long du réservoir rectangulaire (Figure 2a) où un fond homogène a été réalisé.

Deux techniques de mesure ont été utilisées dans cette étude, incluant la méthode *UVP* (Ultrasonic Velocity Profiler) pour la mesure des vitesses d’écoulement tandis que *LSPIV* (Large Scale Particle Image Velocimetry) permet de mesurer le champ *2D* des vitesses en surface.

Des sondes *US* fonctionnant par échographie à effet Doppler pulsée [Met flow, 2007] permettent de déterminer les profils de vitesses instantanées dans un écoulement unidimensionnel moyennée toute la profondeur d’eau, De Cesare, [1997]. Les cinq sondes *US* ont été ajustées de façon uniforme et maintenues inclinées d’un angle de projection Doppler $\alpha = 30^\circ$ par rapport à l’axe vertical Z (Tableau 1). Elles sont immergées de sorte que les capteurs affleurent la surface libre d’environ 5 mm sans qu’ils n’entraînent des perturbations ni de sillage au sein de l’écoulement [Chen et Jirka, 1997].

Il faut rappeler que le profil des vitesses instantanées $u(z)$ du 5ème transducteur a été mesuré à l’aval du réservoir à proximité du déversoir latéral. Toute l’instrumentation utilisée durant les essais a été illustrée dans (Tableau 2).

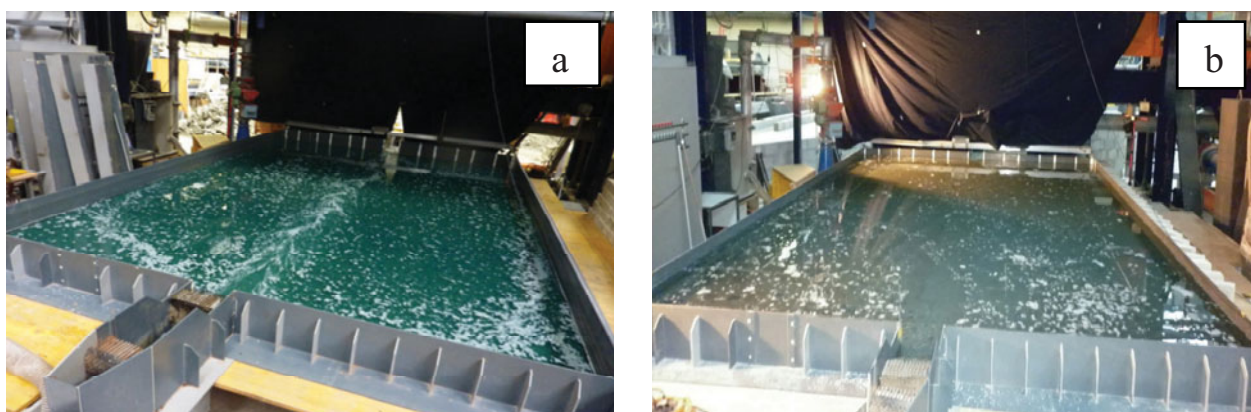


Figure 2 : Bassin expérimental avec particules blanches flottantes à la surface libre lors des mesures LSPIV. a) Fond rugueux $k_s = 2.8\text{ mm}$, b) Fond lisse $k_s = 0.1\text{ mm}$.

Tableau 1 : Caractéristiques des transducteurs UVP.

Référence	Nombre de transducteurs	Fréquence	Diamètre	Longueur	Angle
TX4-5-8	5	4MHz	5mm	40mm	30°

Tableau 2 : Instrumentation et moyens de mesure.

Paramètres mesurés	Instruments
Débit	Débitmètre électromagnétique
Niveau d’eau amont et aval	Limnimétrie, Echelle
Epaisseur de la rugosité	Pied à coulisse
La pente du fond du bassin	Théodolite
Vitesses d’écoulement	UVP
Altitude verticale	Sondes
Vitesses de surface	LSPIV

III. MESURE LSPIV

La technique *LSPIV* a été appliquée, avec succès, par de nombreux chercheurs [Adrian, 1991]. Cette méthode de visualisation par imagerie a été adoptée dans la mesure des écoulements uniformes d'eau et de glace, en laboratoire ou in situ [Chen et Jirka, 2002, Chu et Jirka, 2002, Fujita *et al.*, 1998, Kantoush et Schleiss, 2009, Meselhe *et al.*, 2004 ou Weitbrecht *et al.*, 2002]. Elle a été mise en place pour afficher le champ des vitesses extérieures [Weitbrecht *et al.*, 2002, Fujita *et al.*, 1998 ou Chu et Jirka 2002]. Remarquable par sa rapidité de mesure et sa fiabilité d'installation, l'appareil photo numérique SMX 155 a été placé perpendiculairement au-dessus de la surface du réservoir à une hauteur d'environ 3m pour mesurer les vitesses de surface. La position adaptée mène à un plan de mesure approximativement de (5m × 4m) couvrant presque la totalité de la section du bassin. La valeur de l'extrémité amont et aval de la longueur ($AL = 0.5$ m) a été disparue à cause de l'indisponibilité de l'espace en laboratoire. La camera a été connectée à un ordinateur muni d'un logiciel d'enregistrement [Fujita *et al.*, 1998 et Kantoush et Schleiss, 2008] et utilisé pour l'acquisition des données qui seront stockées dans un dossier spécifique pour l'analyse postérieur (Figure 3). Par ailleurs, l'appareil photo peut enregistrer jusqu'à 1079 images pour une séquence de 03 minutes, soit 06 images par seconde. Les couples d'images successivement capturées sur une surface géométriquement bien déterminées seront enregistrées et traitées par l'algorithme de corrélation Flow Manage développé par Dantec Dynamics A/S., [2007]. Par ailleurs, ces paires de photo sont reliées entre elles pour produire un champ de vitesses moyennées les écoulements superficiels.

IV. CONFIGURATIONS D'ÉCOULEMENT

Dans la théorie des fluides incompressibles, la répartition des vitesses ainsi que la forme des lignes de courant sont déterminées par la géométrie des parois du réservoir limitant le champ d'écoulement. Par ailleurs, pour suivre les trajectoires des lignes de courant, des petites billes blanches en plastiques de polypropylène (*pp*) de diamètre $d = 3.4$ pixel

et de masse volumique $\rho = 0.960$ kg/m³ ont été choisies comme traceur. Ces particules flottantes sont distribuées sur toute la surface libre visible à l'œil nu par contraste avec le fond foncé du réservoir. Elles permettent d'indiquer le sens des vitesses de surface U et la direction des zones de recirculation (Figure 2a, b). Dès lors, l'écoulement à forte résolution a été obtenu par l'ensemencement uniforme du traceur et l'éclairage artificiel pulsé. En outre, le déplacement du traceur Δx entre un couple d'images séquentielles photographié, prise dans un intervalle de temps connu Δt génère de nombreuses composantes de vitesses extérieures $U(x, y, t)$ en fonction de sa position (x) et du temps (t) [Uijtewaal et Jirka, 2003] où U et Δx sont des vecteurs.

$$U = \frac{\Delta x}{\Delta t} \text{ où } U(x, y, t) = \frac{\Delta x(x, y, t)}{\Delta t} \quad (1)$$

Après le traitement et le filtrage spatiotemporel, des milliers d'images brutes ayant les mêmes coordonnées d'orientation et séparées dans le temps, elles sont transformées en champ de vitesses extérieures. Si un des vecteurs vitesses diffère de plus de 30 % de la moyenne locale, il est jugé incorrect et sera éliminé et remplacé par la moyenne pondérée, ceux substitués, donnent un champ d'écoulement prêt à l'interprétation. Les conditions expérimentales sont récapitulées dans (Tableau 3) montrant que les essais menés sur fond rugueux sont désignés en chiffres impairs (N°1,3, 5, 7, 9,11), tandis que les chiffres pairs montrent les essais effectués sur le fond lisse (N° 2, 4, 6, 8 10, 12).

V. RÉSULTATS

Les résultats obtenus sont systématiquement analysés et interprétés via les mesures expérimentales effectuées en écoulement plan d'où l'existence d'une faible zone interne. Sur la base des essais expérimentaux, l'effet de la rugosité du fond sur la configuration de l'écoulement symétrique et asymétrique est décrit par la direction du jet principal où cet effet a été évalué par les deux facteurs géométriques adimensionnels d'allongement $AR = L/B$ et d'élargissement $ER = B/b$.

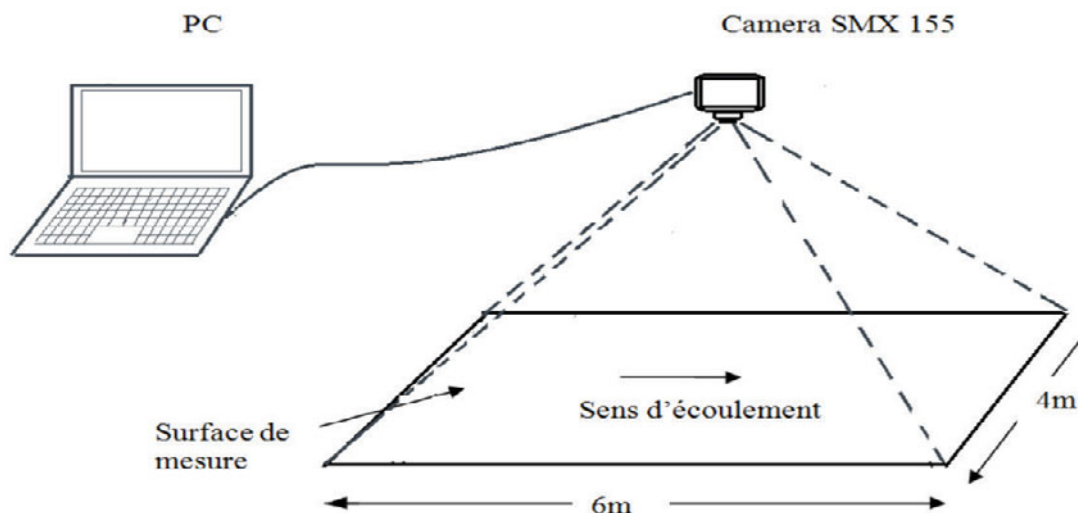


Figure 3 : Installation *LSPIV* pour la mesure d'un écoulement à surface libre.

Tableau 3 : Récapitulatif des essais effectués sur fond rugueux et lisse pour les différentes géométries.

Essais	L[m]	B[m]	h[m]	Q [l/s]	AR = L/B [-]	ER = B/b [-]	Fr [-]	Re [-]
1-2	6.0	4.0	0.20	7.0	1.5	16	0.10	28000
3-4	6.0	4.0	0.20	3.5	1.5	16	0.05	14000
5-6	5.0	4.0	0.20	7.0	1.25	16	0.10	28000
7-8	4.0	4.0	0.20	7.0	1.0	16	0.10	28000
9-10	6.0	1.0	0.20	7.0	6.0	4	0.10	28000
11-12	6.0	3.0	0.20	7.0	2.0	12	0.10	28000

V.1. Écoulement dans la couche limite et rugosité 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 l’introduction du nombre de Reynolds et la viscosité du liquide [Akinlade, 2005] et [Krogstad et Antonia, 1999]. En écoulement bidimensionnel, la répartition des vitesses est conditionnée par une valeur maximale souvent située à la surface libre ($u = u_{max}$) qui correspond pratiquement à 80 % de la profondeur d’eau ($\delta \equiv h$). Par la suite, elle commence à diminuer pour atteindre une valeur approximativement nulle ($u \approx 0$) lorsqu’elle s’approche du fond affecté par les frictions [Labiad, 2005] et [Chu *et al.*, 2004]. Tandis que, la vitesse verticale a été vérifiée pour demeurer négligeable comparée aux composantes dans le plan horizontal, par conséquent l’écoulement est considéré comme peu profond, principalement, bidimensionnel 2D [Camnasio *et al.*, 2011, Dewals *et al.*, 2008, Dufresne *et al.*, 2010 ou Kantoush et Schleiss, 2009]. Par ailleurs, la tridimensionnalité à proximité des parois devient importante, montrant que l’effet en trois dimensions n’était pas évident dans le champ d’écoulement, bien qu’il soit nominale à deux dimensions à travers 90 % de la largeur du canal.

Selon la loi de la paroi, l’ajustement de la distribution logarithmique des profils des vitesses mesurées $u(z)$ dans la zone interne à faible épaisseur ($z/h \leq 0.2$) permet la détermination de la vitesse de cisaillement U^* [Akinlade, 2005, De Cesare, 1997 ou Lee et Sung, 2007]. Le concept est dû en grande partie à la théorie de Prandtl, [1952] formulée par la relation :

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left[\frac{Z}{k_s} \right] + B' \tag{2}$$

La méthode de régression linéaire des moindres carrés pour un domaine de validité $60 \leq \frac{u^* k_s}{\nu} \leq 500$, permet de calculer la rugosité équivalente k_s par les deux relations simplifiées de [Nikuradsé, 1933]

$$\text{Fond rugueux } Re^* = \frac{u^* k_s}{\nu} > 70 \rightarrow k_s = \frac{70\nu}{u^*} \tag{3}$$

$$\text{Fond lisse } Re^* = \frac{u^* k_s}{\nu} < 5 \rightarrow k_s = \frac{5\nu}{u^*} \tag{4}$$

(u indique la vitesse moyenne d’écoulement, $\kappa = 0.4$ la constante universelle de Von Kármán, B' la constante d’intégration prise pour un fond rugueux $B' = 8.5$ et $B' = 3.5$ pour un fond lisse, Z est la distance verticale, k_s la rugosité

équivalente et la viscosité cinématique de l’eau $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2$ à la température $t^\circ = 18^\circ\text{C}$).

Les résultats obtenus mettent bien en évidence la bonne concordance des profils de vitesses longitudinales dont l’ensemble des courbes calculées par régression linéaire possède des coefficients de corrélation $R^2 \leq 0.99$. Ce ci montre quand l’effet visqueux supprime toute évolution vers la condition de la turbulence, l’allure de la parabole ressemble à un régime laminaire quasiment homogène. Toutefois, les fluctuations deviennent significatives dans la partie logarithmique des profils des vitesses, impliquant les fortes variations des paramètres qui entraînent la dispersion dans le calcul de la rugosité équivalente moyenne. Par ailleurs, l’analyse se base sur la bi-dimensionnalité dans laquelle le frottement du fond est représenté par la loi de cisaillement et les tensions totales qui peuvent s’écrire sous la formule de la loi de la paroi connue sous le nom de [Clauser, 1954].

En conclusion, la méthode UVP a permis de relever des vitesses, avec un système acoustique, à l’intérieur de l’écoulement. Dans les écoulements turbulents, les profils verticaux des vitesses et les vitesses longitudinales mesurées par la méthode ultrasonores Doppler sont déterminés sans l’introduction de la fonction de sillage. Les résultats d’essais montrent que la rugosité diminue le niveau d’anisotropie et la vitesse d’écoulement par rapport au fond lisse où sa répartition présente 99 % de la valeur totale du jet libre.

V.2. Champs des vitesses superficielles par LSPIV

L’écoulement de surface à deux dimensions 2D a été évalué sur un fond rugueux que lisse par la visualisation du déplacement des particules blanches flottantes (la densité du traceur est proche du 1) pour restituer les zones de recirculation asymétriques et symétriques pour des conditions hydrauliques et géométriques initialement symétriques (Figure 2a, b). Par ailleurs, les effets de la rugosité du fond du réservoir rectangulaire peu profond et géométrie variable sur le mode d’écoulement ont été analysés par la méthode LSPIV en fonction des deux facteurs d’allongement $AR = L/B$ et d’élargissement $ER = B/b$.

V.2.1. Effet de la rugosité

Sachant que la rugosité est à la base de la création des forces de frottement et la résistance au déplacement du liquide dont son influence sur le mode d’écoulement devrait être significative. Pour mettre cet effet en évidence, une série d’essais a été étudiée au laboratoire pour montrer le rôle de la rugosité du fond sur le champ d’écoulement dans un réservoir de référence ($L = 6 \text{ m}$, $B = 4 \text{ m}$). Les résultats montrent que l’écoulement turbulent est contracté à l’entrée du canal avant de s’élargir brusquement sur la totalité de la

largeur du bassin $B = b + 2\Delta B$, suivant l'axe des canaux d'entrée et de sortie symétriques. Conçu à l'aval du bassin, l'écoulement rotationnel se développe de manière symétrique et horizontale avant de remonter vers l'amont pour décrire deux grandes zones tourbillonnaires plus stables sur chaque cotés du jet (Figure 4a). La recirculation occupant la majorité de la surface libre est accompagnée de deux autres petits vortex de forme triangulaire, stagnants dans la zone morte à l'amont du bassin. Ils tournent plus lentement dans le sens opposé des deux grandes en changeant alternativement de forme et de taille. Une fois amorcé, l'écoulement a tendance de se maintenir et continue à fournir au fur et à mesure d'autres tourbillons qui tendent à se dissiper.

La deuxième série d'essais réalisée sur fond lisse montre l'instabilité de la surface libre qui se caractérise par un jet principal dévié latéralement sur le côté. Il tend à se canaliser contre la paroi du mur pour favoriser le développement d'une grande recirculation située au centre du bassin [Figure 4b]. Cependant, la zone devient plus intense et plus active sur le côté de la déviation, induisant une transition asymétrique sans aucun point de rattachement, malgré la symétrie géométrique et la stabilité des conditions aux limites. Cette asymétrie peut être expliquée par des légères perturbations, poussant le jet vers le côté, lorsque l'amplitude de la vitesse à proximité de la paroi est augmentée [Kantoush, 2008]. Toutefois, lorsqu'un décollement se manifeste dans l'écoulement décéléré la zone interne disparaît [Graf et Altinakar, 2000]. Quand, l'amplitude de la vitesse est augmentée à proximité de la paroi du canal, la formation des écoulements asymétriques peut être expliquée par l'effet Coanda, résultant de la perturbation de l'écoulement peu profond qui pousse le jet vers le côté [Kantoush et Schleiss, 2009]. Simultanément, cette augmentation de la vitesse du jet, fondamentalement, dévié conduit à l'accroissement des forces centrifuges qui tendent à rétablir la symétrie où un équilibre est atteint entre ces deux effets [Dufresne *et al.*, 2010]. Néanmoins, la stabilité des écoulements peut être établie facilement en touchant légèrement à l'état initial qui mène à une augmentation de la vitesse du côté du jet. Ce type d'écoulement est omniprésent dans la nature où les fleuves, les zones côtières et les réservoirs de stockage et les retenues peu profondes se rangent dans cette catégorie.

Les résultats montrent un comportement similaires évoquées par Kantoush [2008] et confirmés par les simulations numériques de Dewals *et al.*, [2008].

En conclusion, deux écoulements différents ont été observés dans les réservoirs du même rapport d'allongement $L/B = 1.5$ mais de rugosité différente. Par ailleurs, les vitesses moyennes sont influencées par les effets du frottement à la zone interne du réservoir et par les vitesses maximales à la surface libre. Sur un fond rugueux l'écoulement symétrique reste parfaitement stable en revanche, sur un fond lisse, le jet présente une asymétrie instable où un tel choix préférentiel de l'orientation du jet est aléatoire Dewals *et al.*, [2008].

V.2.2. Effet de la turbulence, nombre de Reynolds Re

Lorsque la turbulence devient suffisamment développée, les particules flottantes ensemencées à la surface libre suivent les trajectoires du fluide le long du réservoir occasionnant un échange de quantité de mouvement. Les résultats affichés, essentiellement, pour un débit d'alimentation réduit à la moitié ($Q = 3.5$ l/s) par rapport aux essais précédents (n°1 et 2), présente une certaine stabilité pour un nombre de Reynolds parfaitement élevé. Ce paramètre adimensionnel suffisamment grand passe de ($Re = 28000$ à $Re = 14000$) pour une profondeur maintenue constante $h = 0.2$ m où un écoulement superficiel semble être similaire [Chen et Jirka, 1997 et Uijtewaal et Jirka, 2003]. Pour décrire la stabilité hydrodynamique des écoulements peu profonds, une approche a été suggérée par Ghidaoui et Kolyshkin [1999] montrant que l'effet du nombre de Reynolds particulièrement modéré ($Re > 10^3$) est très faible. Par modélisation expérimentale et simulation numérique, Mizushima et Shiotani, [1996, 2001] ont observé, dans les canaux avec élargissement brusque, l'effet de l'allongement du bassin sur la stabilité linéaire de l'écoulement. Plus tard, dans un élargissement progressif, les perturbations des écoulements asymétriques ont été analysées pour un nombre de Reynolds ($50 < Re < 300$) afin de montrer l'évolution de la stabilité linéaire [Uijtewaal et Jirka, 2003]. Tandis que sur un fond rugueux, le jet principal se caractérise par deux paires de configurations symétriques sur chaque coté du bassin, séparées par l'axe central du bassin (Figure 5a). Un tel modèle de configuration se

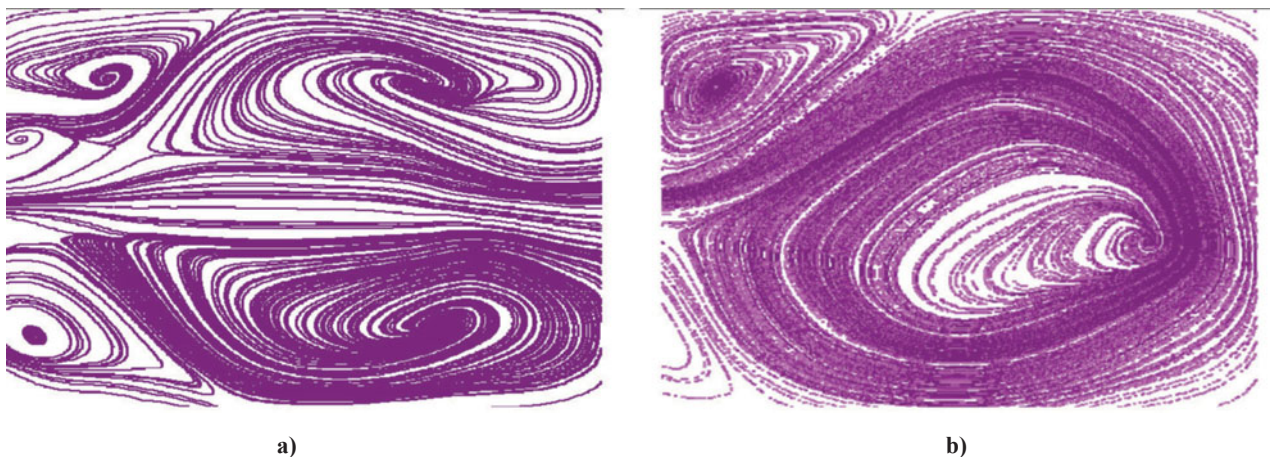


Figure 4 : Champ d'écoulement dans un réservoir à entrée et sortie symétrique. Pour la configuration de référence $L = 6$ m, $B = 4$ m, $L/B = 1.5$. Conditions d'essais : $Q = 7$ l/s, $h = 0.2$ m, $Fr = 0.1$, $Re = 28000$. a) Fond rugueux $k_s = 2.8$ mm, b) Fond lisse $k_s = 0.1$ mm.

développe au centre du bassin et domine l'ensemble de l'écoulement. Tandis que sur le fond lisse (Figure 5b) l'écoulement se maintient régulier et demeure efficacement symétrique, s'accompagnant de deux petits tourbillons de forme triangulaire situés aux coins amonts du bassin. Dans les deux cas, les vortex sur fond lisse sont plus développés et plus dense que le fond rugueux (Figure 5a, b). Pour le même facteur d'allongement $L/B = 1.5$, la comparaison utilise à la fois les lignes de courant présentées par les deux fonds où l'effet du frottement sur une turbulence bidimensionnelle associée à des structures à trois dimensions est très faible. D'autre part, ces structures turbulentes tridimensionnelles à large échelle deviennent annulées et commencent à perdre leur cohérence en raison de l'influence accrue de la friction du fond et les dimensions turbulentes associées.

En conclusion, malgré les efforts qui lui sont consentis, la dynamique de la couche limite continue à être un vaste domaine de recherche très important dans la communauté de la turbulence. Les résultats d'analyse montrent principalement les différents travaux présentés et confirment que pour un Reynolds développé, une symétrie peut être observée sous l'effet des perturbations périodiques.

V.2.3. Effet de la longueur

Plusieurs géométries ont été examinées pour différentes longueurs lors du passage du jet uniformément mouvementé dans le bassin d'entrée sous l'effet de la rugosité du lit. Par la diminution de la longueur $L = 5$ m du réservoir peu profond, l'écoulement superficiel brusquement élargi à l'entrée du bassin est soudainement contracté à la sortie où les vitesses résultant sont plus élevées en ligne droite. Sur un fond rugueux, la symétrie d'un écoulement rectiligne se maintient le long de la bissectrice avec un jet régulier donnant naissance à deux paires de recirculations identiques et homogènes (Figure 6a) suivant l'axe central du bassin pour un facteur d'allongement réduit à $L/B = 1.25$. Cela a été évoqué par l'analyse des réservoirs étudiés en Belgique par Dufresne *et al.*, [2010]. En revanche, sur le fond lisse, l'écoulement reste parfaitement stable (Figure 6b) où nous dénombrons la formation de quatre zones de recirculation au-dessous de la bissectrice des coins amonts occupant les deux petits vortex comparables à ceux qu'occupent le centre de la section géométrique. Elles deviennent activées par la

surface libre et l'homogénéité et l'isotropie du fond du bassin [Labiod, 2005]. Au voisinage de la surface libre, la zone transporte de l'énergie et une quantité de mouvement de la paroi vers le centre du réservoir, alors qu'elles sont transportées du coin (de la zone de haute production de l'énergie) vers le milieu du réservoir par les petits tourbillons du coin au voisinage du fond. Néanmoins, pour une entrée et sortie symétrique, les deux grands vortex du centre maintiennent bien leur symétrie au-dessous de la bissectrice du bassin suivant la position des tourbillons observés à la surface libre. Cependant, pour les mêmes conditions d'essais, le jet devient plus élargi sur fond rugueux que lisse (Figure 6a, b). Pour une longueur plus courte ($L = B = 4$ m) les deux grandes zones symétriques de recirculation ont été conservées et maintenues constantes (Figure 7a, b). Alors que les zones secondaires précédemment observées dans les deux coins amont ont complètement disparu sous l'effet du facteur d'allongement unitaire $L/B = 1$. Ces résultats d'analyse sont en parfait accord avec ceux évoqués par Kantoush, [2008], Dewals *et al.*, [2008], Dufresne *et al.*, [2010] ou Camnasio *et al.*, [2011]. En effet, ils montrent que la zone de transition est très sensible aux perturbations extérieures induisant des configurations asymétriques et symétriques

En conclusion, la configuration géométrique d'entrée et de sortie du canal exerce un effet sur le mode d'écoulement qui se développe dans le bassin rectangulaire peu profond. Néanmoins, l'apparition d'un modèle symétrique dépend du facteur d'allongement L/B qui se produit pour une longueur plus petite entraînant une importante influence sur le maintien des petites cellules des coins.

V.2.4. Effet de la largeur

Tout changement dans la section d'écoulement provoque, sans cesse, une diminution dans la perte d'énergie depuis l'élargissement brusque jusqu'à la section élargie où les particules liquides tendent à conserver leurs vitesses qui heurtent celles qui les précèdent. L'observation des lignes de courant à travers un élargissement brusque sont analysées avec les résultats obtenus qui sont déterminées par la forme du réservoir.

Une nouvelle série d'essais a été menée avec une largeur plus courte ($B = 1$ m) dans le but d'examiner l'effet du fond rugueux par rapport au fond lisse sur le champ des

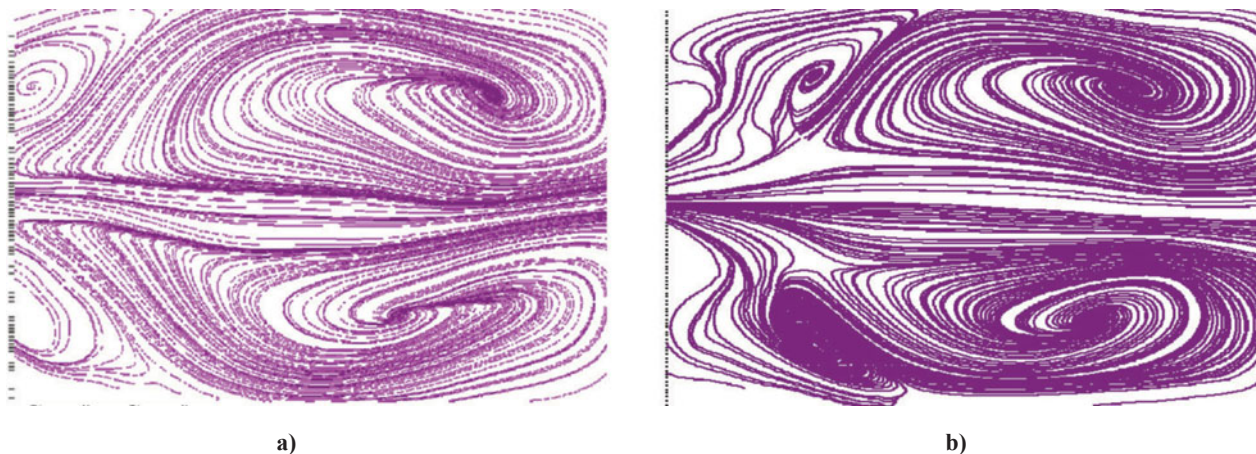


Figure 5 : Champ d'écoulement dans un réservoir à entrée et sortie symétrique. Conditions d'essais $L = 6$ m, $B = 4$ m, $h = 0.2$ m, $Q = 3.5$ l/s, $L/B = 1.5$, $Fr = 0.05$, $Re = 14000$. a) Fond rugueux $k_s = 2.8$ mm, b) Fond lisse $k_s = 0.1$ mm.

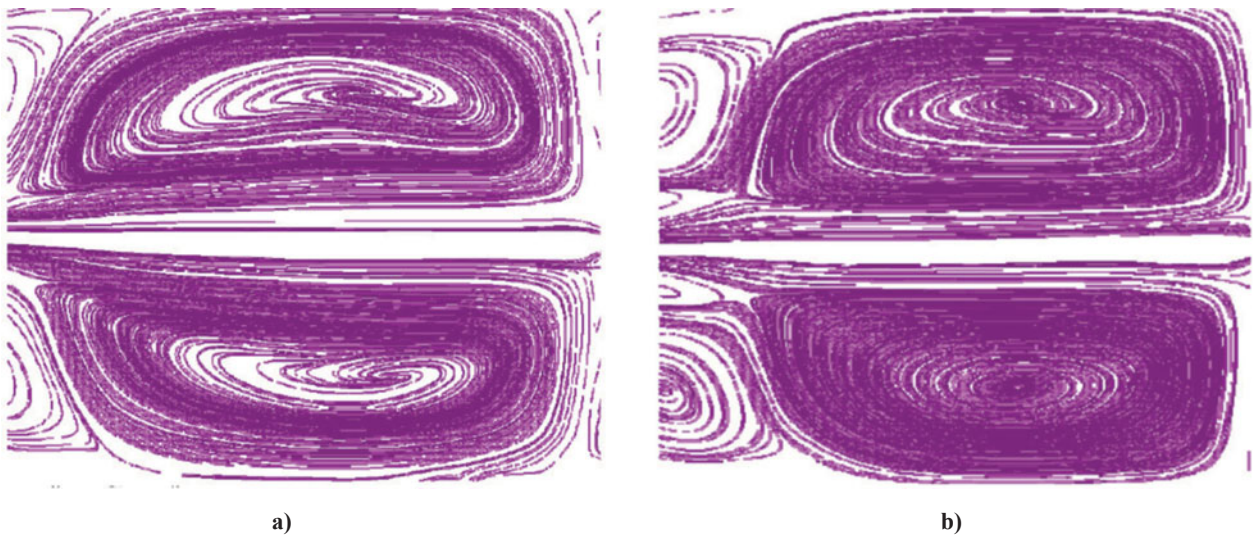


Figure 6 : Champ d'écoulement dans un réservoir à entrée et sortie symétrique.
 Conditions d'essais $B = 4 \text{ m}$, $L = 5 \text{ m}$, $h = 0.2 \text{ m}$, $Q = 7 \text{ l/s}$, $L/B = 1,25$, $Fr = 0.1$, $Re = 28000$.
 a) Fond rugueux $k_s = 2.8 \text{ mm}$, b) Fond lisse $k_s = 0.1 \text{ mm}$.

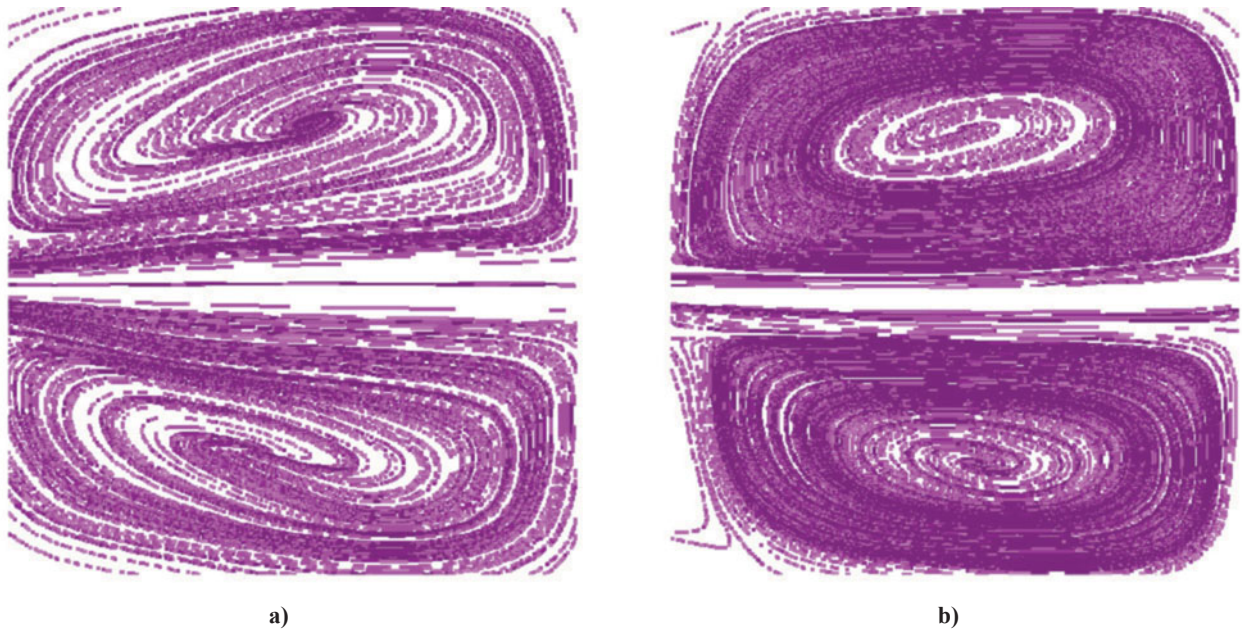


Figure 7 : Champ d'écoulement dans un réservoir à entrée et sortie symétrique.
 Conditions d'essais $L = 4 \text{ m}$, $B = 4 \text{ m}$, $h = 0.2 \text{ m}$, $Q = 7 \text{ l/s}$, $L/B = 1$, $Fr = 0.1$, $Re = 28000$.
 a) Fond rugueux $k_s = 2.8 \text{ mm}$, b) Fond lisse $k_s = 0.1 \text{ mm}$.

vitesses superficielles où l'écoulement est en plein développement mais de tendance asymétrique (figure 8a). Par ailleurs, le début de la formation du tourbillon est moins lisible dans les deux coins amont alors que la recirculation de surface est bien tracée. A une certaine distance de la sortie du convergent, le courant se détache sur le côté pour décrire une recirculation asymétrique légèrement persistante pour un rapport de $L/B = 6$. Par contre, sur fond lisse, le jet jaillissant du canal étroit tend à entrer continuellement d'une manière assez courbée jusqu'à sa stagnation sur l'un des côtés du bassin. Cependant, avec une déviation latérale l'écoulement commence à devenir plus lisible et plus

marqué dans la majeure partie du bassin. Le choix préférentiel de cette déviation du jet est aléatoire dépendant de légères perturbations existantes en conditions initiales et aux limites [Dewals *et al.*, 2008 et Kantoush et Schleiss, 2009]. L'apparition d'une formation asymétrique montre l'instabilité de la grande recirculation qui domine l'ensemble de l'écoulement (Figure 8b). Il peut être expliqué par le rapprochement des parois latérales du canal ($B \approx b = 0.25 \text{ m}$) et justifié par l'augmentation de vitesses qui conduisent à une diminution de la pression [Dewals *et al.*, 2008]. Cette pression locale réduite tend à amplifier alternativement l'écoulement, menant à des forces centrifuges accrues.

L'augmentation de la largeur du bassin $B=3m$ montre que le jet devient principalement plus marqué que précédemment, favorisant le développement d'un écoulement asymétrique au centre du canal à large échelle [Figure 9]. Sur un fond lisse, le jet principal commande l'ensemble de l'écoulement non symétrique en dépit des conditions géométriques initialement données symétriques (Figure 9b). Cette configuration asymétrique résulte de la croissance de la perturbation de l'écoulement en conditions expérimentales qui pousse le jet vers une déviation où il n'y a aucun effet systématique comme il a été décrit par Kantoush, [2008]. Néanmoins, si l'amplitude de la vitesse, à proximité de la paroi du réservoir est augmentée, cela conduit à une diminution de la pression locale pour renforcer l'asymétrie [Dufresne *et al.*, 2010]. Par contre, sur un fond rugueux, la déviation latérale du courant donne naissance à une grande zone de recirculation caractérisée par un modèle noté asymétrique (Figure 9a). Ce modèle sera accompagné de deux autres petits tourbillons de plus en plus lisibles, avec une forme triangulaire, situées dans les deux coins amont, tournant plus lentement, en changeant alternativement de taille et de forme. Par simulations numériques, les travaux antérieurs ont montré que, l'asymétrie ne peut être expliquée que par la grande sensibilité de l'écoulement en conditions initiales et aux limites.

En conclusion, la symétrie disparaît complètement avec la diminution de la largeur B qui exerce une influence significative sur la modification de l'écoulement superficiel. La taille et la position des zones de recirculation sont montrées clairement par les lignes de courants mentionnées dans les figures.

VI. CONCLUSION

L'objectif principal de ce travail de recherche est d'examiner l'effet de la rugosité du fond d'un bassin rectangulaire peu profond et géométrie variable, dotée d'une entrée et sortie symétrique sur le champ d'écoulement. Néanmoins, les essais de différentes géométries étudiées permettent de conclure qu'en dépit des conditions géométriques expérimentales parfaitement identifiées symétriques, des écoulements asymétriques peuvent se développer en fonction de certaines conditions de bords, résultant de la croissance de petites perturbations en conditions initiales et aux limites. Les résultats obtenus sont d'ores et déjà encourageants voire nécessaires pour la validation des codes numériques.

Ainsi il pourrait être intéressant de considérer une rugosité hétérogène sur une pente du fond inclinée pour l'analyse et la comparaison de la stabilité des écoulements bidimensionnels, ceci nous impose l'étude de l'effet d'une pente variable avec une entrée et sortie asymétrique. Dans la littérature, nous ne pouvons pas trouver des valeurs précises des écoulements turbulents sur fond rugueux pour déduire que ce processus reste toujours beaucoup moins méconnu et plus complexe que le fond lisse. Cependant, il semble que la compréhension complète du processus de la turbulence sur fond rugueux est un objectif très important pour les recherches futures.

VII. REMERCIEMENTS

Le travail expérimental a été réalisé, pendant un séjour scientifique, au Laboratoire de Constructions Hydrauliques



Figure 8 : Champ d'écoulement dans un réservoir à entrée et sortie symétrique. Conditions d'essais $L = 6\text{ m}$, $B = 1\text{ m}$, $h = 0.2\text{ m}$, $Q = 7\text{ l/s}$, $L/B = 6$, $Fr = 0.1$, $Re = 28000$. a) Fond rugueux $k_s = 2.8\text{ mm}$, b) Fond lisse $k_s = 0.1\text{ mm}$.

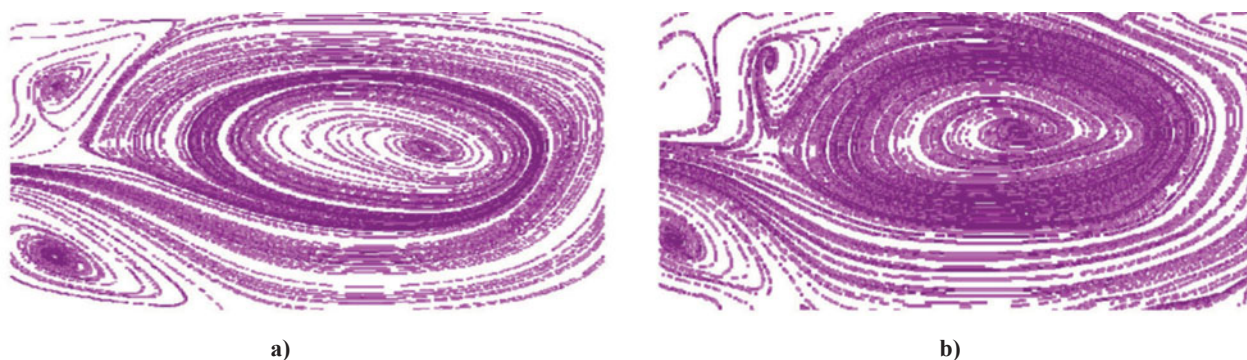


Figure 9 : Champ d'écoulement dans un réservoir à entrée et sortie symétrique. Conditions d'essais $L = 6\text{ m}$, $B = 3\text{ m}$, $h = 0.2\text{ m}$, $Q = 7\text{ l/s}$, $L/B = 2$, $Fr = 0.1$, $Re = 28000$. a) Fond rugueux $k_s = 2.8\text{ mm}$, b) Fond lisse $k_s = 0.1\text{ mm}$.

de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse (LCH, EPFL) dans le cadre de la finalisation de la thèse de doctorat financée par le gouvernement Algérien. Les auteurs remercient toutes les personnes impliquées dans cette recherche.

VII. RÉFÉRENCES

- ADRIAN R. J. (1991) — Particle-Imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Annual Review of Fluid. Mechanics.* **23** : 261-304
- 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*
- CAMNASIO E., ORSI E. & SCHLEISS A. J. (2011) — Experimental study of velocity fields in shallow rectangular reservoirs. *Journal of Hydraulic Research.* **49** : 352-358
- CHEN D. & JIRKA G H. (1995) — Experimental study of plane turbulent wake in shallow water layer. *Fluid. Dyn. Res.* **16** : 11-41
- 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
- CHEN D. & JIRKA G H. (1998) — Linear Instability Analyses of Turbulent Mixing and layer and jets in shallow. *Journal of Hydraulic Research.* **36** : 815-830
- CHEN D. & JIRKA, G H. (2002) — Large Scale PIV-measurements at the surface of shallow water flows. *Flow Measurements and Instrument.* **13** : 237-245
- CLAUSER F H. (1954) — Turbulent Boundary Layers in Adverse Pressure Gradient. *Journal Aeronaut. Sci.* **21** : 91-108
- CHU V. & KHAYAT R. E. (1983) — Stability of turbulent shear flows in shallow channel. *Proc XX Congress IARH, Moscow.* **3** : 128-133
- CHU V. & JIRKA G. H. (2002) — Large Scale PIV-measurements at the surface of shallow water flows. *Flow Measurements and Instrument.* **13** : 237-245
- CHU V., LIU E. & ALTAI W. (2004) — Friction and confinement effects on shallow recirculating flow. *Journal Environ. Engineering. Sci.* **3(5)** : 463-475
- DANTEC DYNAMICS A/S (2008) — Working principles of PIV Educational Slideshow. *Presentation, <http://www.dantecdynamics.com>.*
- DE CESARE G. (1997) — Manuel de mesure des profils de vitesses. *Instrument UVP X3.PS, LCH, Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne, Switzerland*
- DEWALS B., KANTOUSH S. A., ERPICUM S., PIROTTON M. & SCHLEISS A. J. (2008) — Experimental and numerical analysis of flow instabilities in rectangular shallow basins. *Environ. Fluid. Mechanics.* **8** : 31-54
- DUFRESNE M., DEWALS B., ERPICUM S., ARCHAMBEAU P. & PIROTTON M. (2010) — Classification of flow patterns in rectangular shallow reservoirs. *Journal of Hydraulic Research.* **48** : 197-204
- FUJITA I., MUSTE M. & KRUGER A. (1998) — Large Scale Particle Image Velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *Journal of Hydraulic Research.* **36** : 397-414
- GRAF W. & ALTINAKAR M. (2000) — Ecoulement et phénomènes du transport dans les canaux à géométrie simple. *Hydraulique fluviale. Presses polytechniques et universitaires romandes.* **16**
- GHIDAOUI M. S. & KOLYSHKIN A. A. (1999) — Linear stability analysis of lateral motions in compound open channels. *Journal of Hydraulic Engineering.* **125** : 871-880
- 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. EPFL, Lausanne, Switzerland*
- KANTOUSH S. A. & SCHLEISS A. J. (2009) — Large-Scale PIV Surface Flow Measurement of Shallow Basins with Different Geometries. *Journal of Visualization.* **12** : 361-373
- KROGSTAD A. & ANTONIA R. A. (1999) — Surface roughness effects in turbulent boundary layers. *Experiments in Fluids.* **27** : 450-460
- KOLYSHKIN A. & GHIDAOUI M. S. (2003) — Stability analysis of shallow wake flows. *Journal of Fluid Mechanics.* **494** : 355-377
- LABIOD C. (2005) — Ecoulement à surface libre sur fond de rugosité inhomogène. *Thèse de doctorat N°2242, INP Toulouse, France*
- LEE S. H., & SUNG H. J. (2007) — Direct Numerical Simulation of the turbulent boundary layer over a rod roughened wall. *Journal of Fluid Mechanics.* **000** : 1-22
- MET-FLOW S/A. (2002) — Ultrasonic Velocity Profiler UVP monitors. *Operation Manuel, Mode UVP X W -3-PS, User guide, Lausanne, Switzerland. Visit <http://www.met-flow.ch>.*
- MIZUSHIMA J. & SHIOTANI Y. (1996) — 2001 Flow in a symmetric channel with an expanded section. *Fluid Dynamics Research.* **33** : 5-6
- MESELHE E. A., PEEVA T., & MUSTE M. (2004) — Large Scale Particle Image Velocimetry for low velocity and shallow water flows. *Journal of Hydraulic Engineering.* **130** : 937-940
- NIKURADSE J. (1933) — Laws of flow in rough pipes. *Translation in National Advisory Committee for aeronautic technical memorandum 1292, NACA, 1950 Washington.* 62
- PRANDTL L. (1952) — *Führer durch die Strömungslehre, Fr. Vieweg & Sohn, Braunschweig*
- SHIPARA M., DEGANI D. & WELLS D. (1990) — Stability and existence of multiple solutions for viscous flow in suddenly enlarges channels. *Comput. Fluids.* **18(3)** : 239-258
- UIJTTEWAAL W. S. J. & JIRKA G. H. (2003) — Grid turbulence in shallow water flows. *Journal of Fluid Mechanics.* **489** : 325-344
- 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.* **2-6** : 1569-1574
- WEITBRECHT V., KÜHN G. & JIRKA G. H. (2002) — Large Scale PIV-measurements at the surface of shallow water flows. *Flow Measurements and Instrument.* **13** : 237-245