

Effet de la variation de la densité des particules sur la sédimentation dans une rivière à méandres

Anissa GHOMRASSI HADHRI^{1*}, Hatem MHIRI¹, Philippe BOURNOT², Georges LE PALEC²

1 Ecole nationale d'ingénieurs de Monastir, route de Ouardanine, 5000 Monastir, Tunisie
2 IUSTI, UMR CNRS 6595, Technopôle Château-Gombert, 5 rue Enrico Fermi, 13013 Marseille, Cedex 20, France
*ghomrassi.anissa@hotmail.com

Résumé - Dans ce présent travail, nous avons effectué une simulation numérique d'un écoulement dans une rivière afin d'étudier le transport des sédiments et le dépôt des particules. Le suivi lagrangien des particules (DPM) a été effectué. Une fois le modèle validé par des données expérimentales [1], nous avons étudié l'effet de la densité des particules sur la sédimentation pour une vitesse d'écoulement égale à 0.2 m/s. Les matériaux de particules testées sont le sable, la matière en suspension (MES) et le biphényles polychlorés (PCBs). Ensuite, nous avons exploré la concentration en utilisant le modèle de phase discrète et les temps de séjours au sein des différentes densités des particules.

Nomenclature

g	accélération de la pesanteur, $m.s^{-2}$		
k	énergie cinétique de turbulence, $m^2.s^{-2}$		
Pr_t	le nombre de Prandtl turbulent		
P	pression, Pa		
$\vec{\tau}$	tenseur de contraintes		
u_i	composantes de la vitesse, $m.s^{-1}$		
u'_i	composantes fluctuantes de la vitesse, $m.s^{-1}$		
\vec{u}_p	vecteurs vitesse d'une particule solide, $m.s^{-1}$		
		<i>Symboles grecs</i>	
		β	coefficient de dilatation thermique, K^{-1}
		ε	taux de dissipation de l'énergie cinétique de turbulence, $m^2.s^{-3}$
		ρ	masse volumique du fluide, $kg.m^{-3}$
		ρ_p	masse volumique de la particule solide, $kg.m^{-3}$
		μ	viscosité dynamique, $kg.m^{-1}.s^{-1}$
		μ_t	viscosité turbulente, $m^2.s^{-1}$
		α_q	fraction volumique d'une phase fluide

1. Introduction

Les écoulements dans les rivières sont généralement tridimensionnels, dans un état tourbillonnaire. Par conséquent, une analyse précise de l'écoulement et du transport des sédiments dans une rivière à méandres est une tâche plutôt difficile. Alors que de nombreux livres et articles ont été publiés dans ce sujet, les détails de la micromécanique de la remise en suspension des sédiments, du transport et des dépôts ne sont pas pleinement compris. Ce problème a été l'objet de plusieurs recherches expérimentales et numériques.

Les processus de suspension des particules dans l'écoulement turbulent ont été récemment étudiés par M. Soltani et G. Ahmadi (1994-1995) [2-3] parmi d'autres. Dans ce travail, les modèles de transport et de dépôt des sédiments dans les fleuves à méandres sont étudiés. K. Shiono et Y. Muto (1998) [1] ont étudié expérimentalement l'écoulement dans une rivière à méandres. Le phénomène de sédimentation des particules de différentes tailles et dans des conditions différentes dans les virages des fleuves est analysé. A. Hossain et coll. (2003) [4] ont développé un modèle numérique tridimensionnel de la dynamique des fluides (CFD) afin de prévoir la sédimentation et la suspension des particules dans les deux phases liquides et solides. Dans cette étude ils ont fait varier les tailles des particules, les densités des particules ainsi que le nombre de Reynolds. S. Ouillon (2004) [5] a utilisé le code tridimensionnel OCKE3D pour modéliser le transport de matières en suspension dans les zones côtières. C'est un code qui résout les équations tridimensionnelles d'écoulement à surface libre et les équations de transport de la salinité et des particules en suspension en régime stationnaire et instationnaire. Pour étudier la sensibilité du modèle à la taille de particule de matière en

suspension (MES). La fermeture turbulente repose sur un modèle (k, ϵ) , avec une condition spécifique à la surface libre proposée par Celik et Rodi (1984) [6].

2. Description de la rivière à méandres

La rivière étudiée a une géométrie similaire à celle de Shiono et Muto [1]. Elle a une pente longitudinale de 0.001. Elle est modélisée par des coudes connectés ayant un angle de 60° et un rayon intérieur de 35 cm connecté par des segments de 37.6 cm de longueur.

Les sections de 1 à 3 du virage de la rivière sont présentées dans la figure 1. Dans le troisième virage (section 3), le fond de la rivière est divisé en 10 zones de surfaces égales pour faire l'analyse du dépôt de particules dans chaque zone. Les détails des zones utilisées pour l'analyse de la sédimentation dans le virage de la rivière sont présentés dans la figure 1.a. La section transversale de modèle rivière de laboratoire ayant 15 cm de largeur et 5 cm de hauteur est montrée dans la figure 1.c.

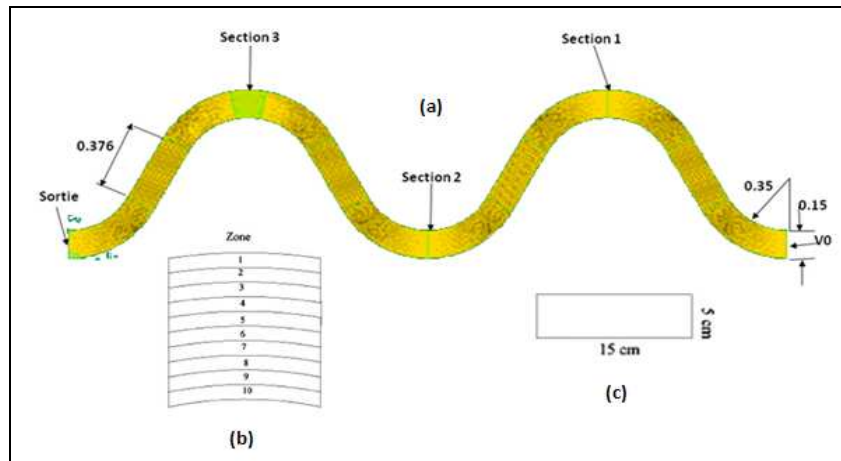


Figure 1 : (a) Schémas d'un modèle de rivière à méandres. (b) détails des zones de 1 à 10 situées dans le troisième virage. (c) Section transversale de la rivière

3. Etude numérique

3.1. Hypothèses

- La vitesse de l'admission du fluide dans la rivière est uniforme, et elle est normale au plan d'admission.
- L'effet de la compressibilité est négligé.
- Aucune interaction particule-particule n'est prise en considération (la concentration de l'alimentation en particules est faible).
- La rivière est à méandres fixes (le lit est passif).

3.2. Equations

Les équations régissant ce problème sont obtenues en utilisant la décomposition de Reynolds et elles s'écrivent sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \overline{\rho U_j} \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right) \quad (2)$$

$$\frac{d\bar{u}_p}{dt} = F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + \vec{g} \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} + \vec{F} \quad (3)$$

L'introduction de la taille des fluctuations rend ce système ouvert. Sa fermeture nécessite l'utilisation d'un modèle de turbulence qui permet d'obtenir un nombre d'équations égal au nombre de paramètres inconnus. Sur la base de ce dernier résultat, nous avons choisi ce modèle de deuxième ordre de fermeture (également appelé Reynolds Stress Model) dans ce document. Ainsi, l'équation suivante est résolue:

$$\frac{\partial}{\partial x_k} \underbrace{(\rho \tilde{u}_k \overline{u_i u_j})}_{C_{ij}} = \frac{\partial}{\partial x_k} \underbrace{\mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u_i u_j})}_{D_{ij}^L} - \underbrace{\rho \left[\overline{u_i u_k} \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_k} \right]}_{P_{ij}} + D_{ij}^T + G_{ij} + \phi_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (4)$$

C_{ij} étant le terme de convection.

D_{ij}^L , P_{ij} , D_{ij}^T , G_{ij} , ϕ_{ij} et ε_{ij} sont respectivement la diffusion moléculaire, la production du stress, la diffusion turbulente, la production de la flottabilité, la souche de pression et le taux de dissipation.

Les équations de l'énergie cinétique turbulente (k) et du taux de dissipation de l'énergie cinétique (ε) associé au modèle de deuxième ordre sont définies comme suit :

$$\frac{\partial (\rho \tilde{u}_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2} (P_{ii} + G_{ii}) - \bar{\rho} \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial (\rho \tilde{u}_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{1}{2} (P_{ii} + C_{\varepsilon 3} G_{ii}) \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \bar{\rho} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

3.3. Maillage et conditions aux limites

Les conditions aux limites associées au système d'équations différentielles décrit ci-dessus sont résumées dans le tableau 1 :

eau	<i>Entrée eau</i>	<i>Velocity inlet</i>	$U_{in} = 0.2 \text{ m/s}$ $D_h = 0.075 \text{ m}$ et $I_t = 4.8\%$
	<i>Sortie eau</i>	<i>outflow</i>	$\partial \tilde{u} / \partial n = \partial \tilde{v} / \partial n = \partial \tilde{w} / \partial n = 0$ $\partial k / \partial n = 0$ $\partial \varepsilon / \partial n = 0$
	<i>Fond de la rivière</i>	<i>wall</i>	« No slip condition »
	<i>Surface libre</i>	<i>Symmetry</i>	$\partial k / \partial y = 0$ $\partial \varepsilon / \partial y = 0$
	<i>Parois latérales de la rivière</i>	<i>wall</i>	« No slip condition »
particule	<i>Entrée particule</i>	<i>Injection: surface</i>	$u_p = 0.2 \text{ m/s}$
	<i>Sortie particule</i>	<i>Escape</i>	Les calculs de trajectoires des particules sont terminés
	<i>Zone1, Zone2, Zone3, Zone4, Zone5, Zone6, Zone7, Zone8, Zone9, Zone10</i>	<i>Trap</i>	Toutes Particules touchant le fond se déposent
	<i>*Parois latérales de la rivière</i> <i>*Fond de la rivière</i>	<i>Reflect</i>	rebond la particule sur les frontières en question avec un changement dans sa magnitude

Tableau 1 : Conditions aux limites

Plusieurs problèmes importants surgissent lors de la simulation numérique de ce phénomène. La topologie de l'écoulement nécessite un maillage très fin dans une grande

partie du domaine. Afin d'obtenir une description précise de toutes les variations, en particulier près des virages et des parois du lit, nous avons adopté un maillage non uniforme adapté près des parois. Le nombre de cellules est de 609120 cellules.

Le code numérique utilise la méthode des volumes finis. La solution des équations étant basée sur l'algorithme SIMPLER proposé par Patankar (1980) [7].

4. Résultats et Discussions

Pour étudier le taux de sédimentation dans les rivières à méandres, on a utilisé le modèle de fermeture $k-\varepsilon$ RNG utilisé par le code commercial Fluent. En effet, le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ RNG est adapté pour l'étude des géométries complexes. Ce modèle a des termes supplémentaires dans l'équation de taux de dissipation de l'énergie cinétique de turbulence ε qui améliore la précision et donc il est plus sensible aux courbures.

Nous présentons dans cette section la structure dynamique de l'écoulement du fluide (eau) et le comportement de la phase dispersée (particules) dans une rivière à méandres.

4.1. Etude de la structure dynamique de l'écoulement

La figure 2 présente les contours de vitesse à la section S_1 ainsi qu'à la surface libre. L'écoulement est de droite à gauche. Cette figure met en relief la complexité des modèles.

Il y a un pic de vitesse se produisant près de la partie intérieure du virage de la rivière. La vitesse diminue loin de ces régions. La différence majeure entre le pic et les vitesses moyennes indique que l'écoulement ne ressemble pas à la condition de l'écoulement pleinement développée.

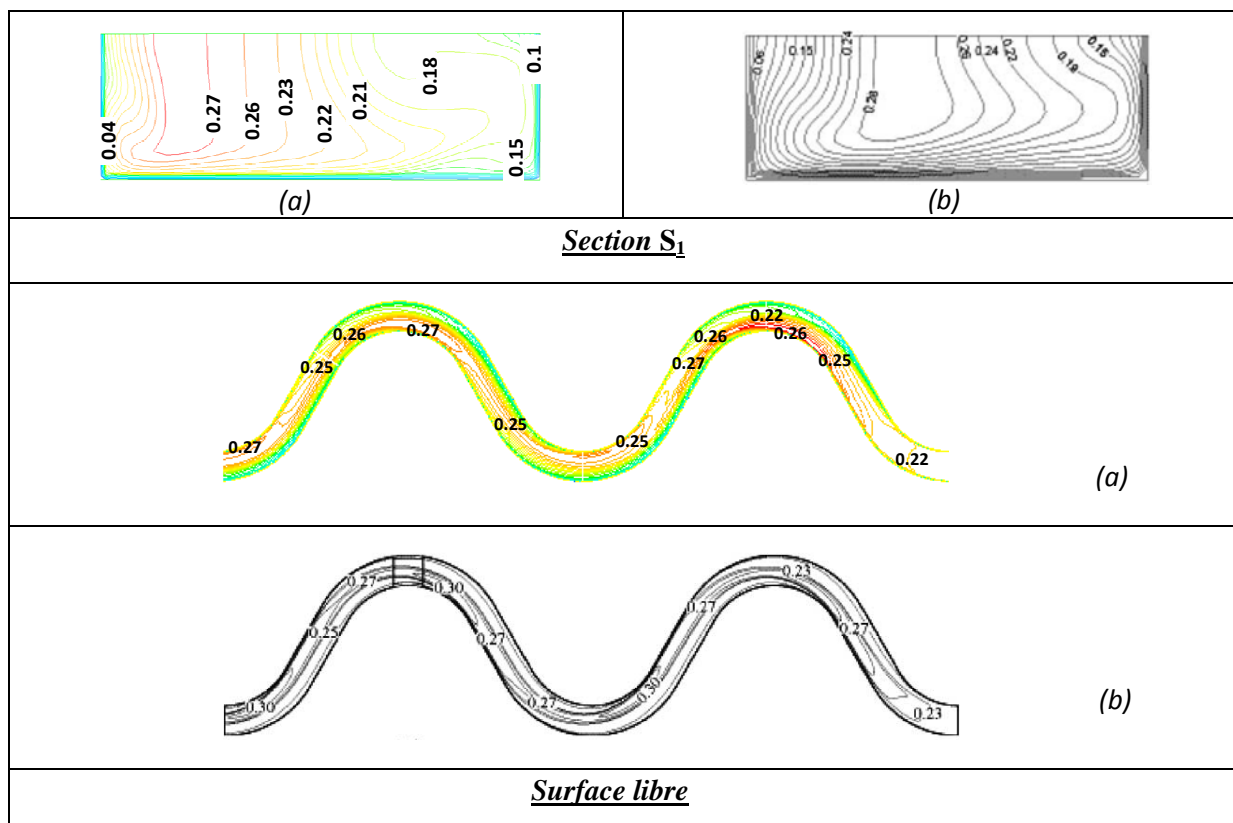


Figure 2 : Contours des vitesses sur différentes sections du modèle rivière avec une vitesse d'entrée de 0.2 m/s. (a) numérique et (b) expérimentale de Shiono et Muto [1]

4.2. Etude des trajectoires des particules (effet de la variation des densités des particules):

Pour mener à bien la simulation du taux de dépôt des sédiments pour différents types de particules ayant des densités différentes dans une rivière à méandres, les trajectoires d'un ensemble de 29600 particules avec un diamètre initialement choisi (diamètre calculé par l'équation de Rosin –Rammler ($260 \mu\text{m}$) et qui sont injectées à partir de la section S_2 sont analysées (voir figure 1).

On s'assure d'abord de la convergence des résultats numériques pour les différents types de particules : sable (masse volumique: 2660 kg/m^3), matière en suspension (masse volumique: 1500 kg/m^3) et biphényles polychlorés (PCBs) (de masse volumique 1182 kg/m^3), puis on examine le taux de dépôt des particules dans chaque zone de 1 à 10. On observe bien que les courbes gardent les mêmes allures sauf que les pics de dépôts des particules sont différents. On remarque que l'augmentation de la densité favorise le dépôt des particules. En effet, le sable ayant une masse volumique de 2660 kg/m^3 atteint un taux de dépôts de 70 %. Tandis que pour le PCBs ayant une masse volumique de 1182 kg/m^3 ce taux ne dépasse pas 10 %.

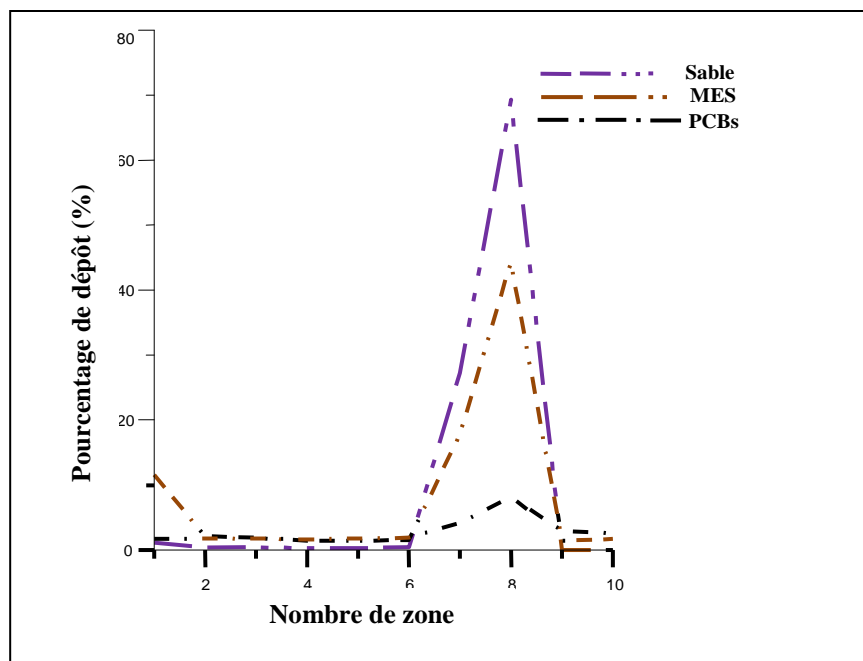


Figure 3 : Pourcentage de dépôt des particules au fond de la rivière pour une vitesse d'entrée de 0.2 m/s pour différentes densités des particules

La figure 4 présente les temps de séjour en secondes pour différentes densités des particules. On remarque que le temps de séjour d'une particule de sable ayant une masse volumique de 2660 kg/m^3 atteint 24.4 secondes contrairement à celle de la matière en suspension (ayant une masse volumique 1500 kg/m^3) ne dépasse pas 11.2 secondes et tandis ce que pour le biphényles polychlorés, le temps de séjour de la particule est seulement 6.66 secondes. Donc plus la densité des particules est élevée plus le temps de séjour est élevée. Ceci est conforme au résultat précédent relatif à la figure3.

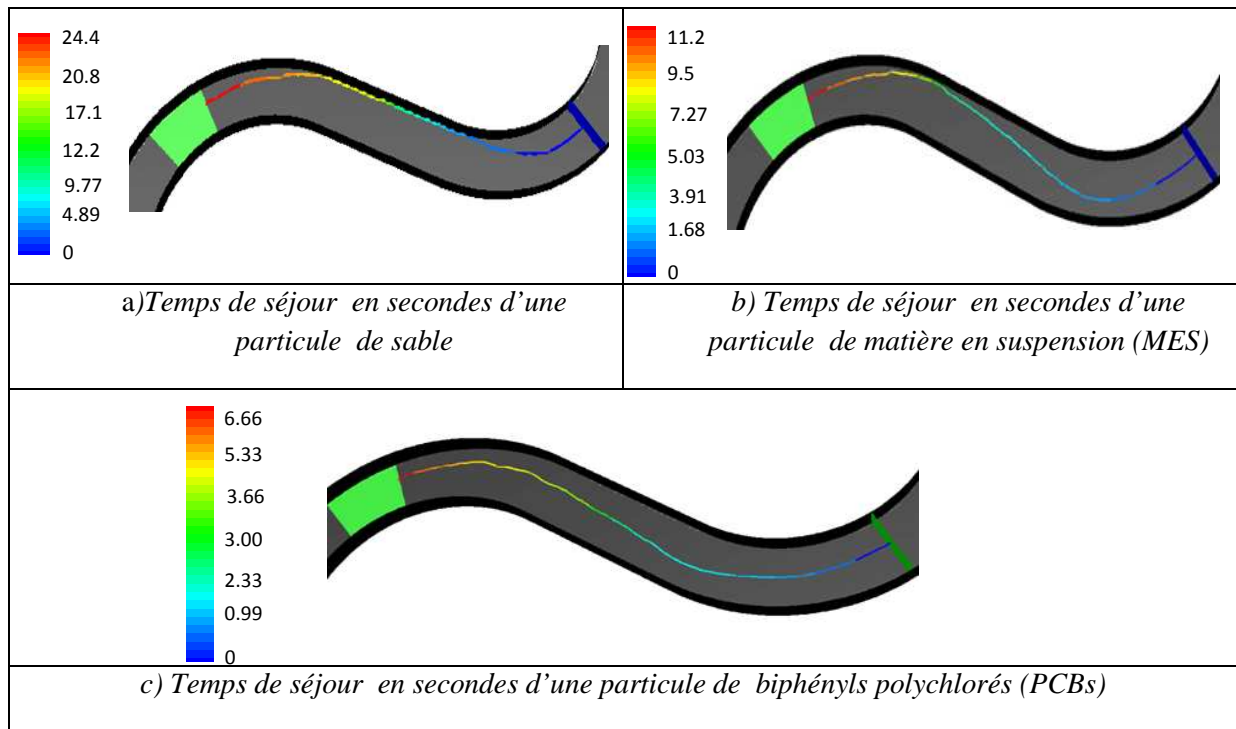


Figure 4 : Temps de séjours (secondes) des particules pour différentes densités (sable, MES, PCBs)

5. Conclusion

Dans ce travail, nous avons présenté les résultats obtenus par la modélisation d'un écoulement de fluide chargé de particules dans une rivière à méandres.

Un modèle numérique tridimensionnel basé sur un modèle de fermeture de turbulence k- ϵ RNG et un maillage non uniforme a été utilisé. Globalement, les résultats numériques et ceux mesurés expérimentalement sont en bonnes concordances.

Dans cette étude numérique, nous avons examiné l'impact de la variation de la densité des particules sur le taux de dépôt de particules. Nous avons déduit que l'augmentation des densités de particules favorise le dépôt des particules. Ce facteur doit être pris en compte lors de la décharge des effluents et des polluants dans les mers et les rivières.

Références

- [1] K. Shiono, Y. Muto, Complex flow mechanisms in compound meandering channels with overbank flow, *Journal Fluid Mechanics*, 376 (1998), 221–261
- [2] M. Soltani, G. Ahmadi, On particle adhesion and removal mechanisms in turbulent flows, *Journal Adhesion Science and Technology*, 7 (1994), 763–785.
- [3] M. Soltani, G. Ahmadi, R.G. Bayer, M.A. Gaynes, Particle detachment mechanisms from rough surfaces under substrate acceleration, *Journal Adhesion Science and Technology*, 9 (1995), 453-473.
- [4] A. Hossain, J. Naser, K. Mc Manus et G. Ryan, CFD Investigation of Particle Deposition and Distribution in a Horizontal Pipe, *Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia* (2003).
- [5] S. OUILLO, Transport de Matières En Suspension en zones côtières: Etude intégrée par mesures, télédétection et modélisation, *Ph.D.thèse*, Université du Sud, Toulon (2004).
- [6] I. Celik, W. Rodi, Simulation of free-surface effects on turbulent channel flows, *Physico-Chemical, Hydrodynamics Journal*, 5-34 (1984), 217-227.
- [7] S.V. Patankar, Numerical heat transfer and fluid flow, Series in computational methods in mechanics and thermal sciences, *Minkowycz and Sparrow Editors* (1980).