

Etude de l'évolution des paramètres de paroi le long des éléments de singularité constituant la rugosité du fond

Study of evolution of the wall parameters along the singularity elements constituting the bottom roughness

BENMEBAREK Mourad¹ & HAMANI Sofiane²

^{1,2} Laboratoire de Recherche en Hydraulique Appliquée et Environnement (LRHAE), Université de Bejaia, Targa Ouzemour 06000 Bejaia Algérie.

¹ benmebarek_hydg@yahoo.com

² hamani.sofiane@gmail.com

Résumé—Dans ce travail, nous nous intéressons à la modélisation des écoulements à surface libre et en charge pleinement développés, où la paroi de fond caractérisée par la présence d'une singularité de forme rectangulaire. Dans un premier temps, nous étudions le cas d'un seul élément de singularité, ensuite, nous abordons l'écoulement au-dessus d'une rugosité périodique. Dans le cas de l'écoulement à surface libre l'influence de la condition aux limites à la surface libre sera prise en considération, où cet écoulement est modélisé en utilisant un couplage entre la méthode VOF et le modèle $k-\varepsilon$ Standard. Le traitement de l'écoulement au voisinage de la paroi sera basé sur la résolution de l'écoulement dans la sous-couche rugueuse en utilisant les lois standards de paroi, afin de déterminer l'évolution des paramètres de parois le long des éléments constitutif la rugosité du fond.

Mots-clés—Turbulence, Modélisation, Lois de paroi, VOF, Rugosité, Surface libre, en charge

Abstract—In this work, we are interested in the modeling of fully developed free surface and charge flows, where the bottom wall is characterized by the presence of a singular rectangular shape. In a first step, we study the case of a single element of singularity. Then we approach the flow over a periodic roughness. In the case of free surface flow, the influence of the boundary condition on the free surface will be taken into consideration, where this flow is modeled using a coupling between the VOF method and the Standard $k-\varepsilon$ model. Treatment of the near-wall flow will be based on the resolution of the flow in the rough underlayer using standard wall laws, in order to determine the evolution of the wall parameters along the constituent elements of the wall roughness.

Keywords—Turbulence, Modelling, Wall laws, VOF, Roughness, Free surface, in charge

I. INTRODUCTION

Les écoulements dans les milieux naturels le long des parois se caractérisent souvent par la présence des singularités du fond. Ces dernières sont considérées comme une rugosité, qui reste toujours non résolue de façon analytique, sauf dans

des cas simplifiés. Les équations générales de la mécanique des fluides permettent de modéliser plusieurs écoulements, en s'appuyant sur certaines hypothèses simplificatrices sur l'écoulement et son comportement. Ces hypothèses sont reliées notamment à l'interaction écoulement-parois [2].

Dans la présente, nous abordons les écoulements turbulents pleinement développés au-dessus d'une paroi caractérisée par la présence des éléments de singularité. Pour résoudre les équations régissant l'écoulement turbulent, nous avons opté pour le modèle $k-\varepsilon$, ainsi le modèle multiphasique VOF (Volume Of Fluid) de suivi des interfaces eau-air [4]. Ces modèles sont incorporés dans le code de calcul ANSY-Fluent. Nous nous intéressons en particulier à la détermination des paramètres de paroi à savoir la vitesse de frottement u^* , la rugosité équivalente k_s et l'étendue de l'origine de la loi logarithmique de vitesse z_0 . Ces paramètres, qui sont déterminés le long des éléments de rugosité, sont importants pour la formulation des lois standards de paroi rugueuses qui restent à l'heure actuelle non maîtrisées [8].

II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

A. Equations de base

Il est d'usage de résoudre les équations de Reynolds obtenues par une moyenne temporelle des équations de Navier-Stokes [5]. Ces équations, qui sont généralement notées RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations*), s'écrivent sous la forme :

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

$$\frac{D(\rho \bar{U})}{Dt} = \left(\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} - \rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j) \quad (2)$$

Avec, ρ la masse volumique, $\bar{P}$ la pression moyenne, ν la viscosité cinématique, F_i le champ des forces de gravité

et $-\rho \overline{u_i u_j}$ le tenseur des contraintes de Reynolds qui est modélisé en utilisant le modèle k- ϵ Standard.

B. Modèle k- ϵ Standard

Ce modèle a été initialement développé pour les écoulements incompressibles où les fluctuations de la densité peuvent être négligées, il a ensuite été élargi aux écoulements compressibles. Il est basé sur l'hypothèse de *Boussinesq* (1877). Cette idée s'écrit [3] :

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (3)$$

La viscosité turbulente μ_t est calculée en faisant intervenir l'énergie cinétique turbulente k , et le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ϵ , qui s'écrit comme suit :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

où C_μ est un paramètre empirique spécifique au modèle de turbulence, l'énergie cinétique turbulente et son taux de dissipation sont calculés par les équations de transport suivantes [2] :

$$\frac{\partial (\bar{\rho} k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} k \vec{u}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \bar{\rho} \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \epsilon \vec{u}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + \frac{\epsilon}{k} (P_k C_{\epsilon 1} - \bar{\rho} \epsilon C_{\epsilon 2}) \quad (6)$$

Où P_k est le terme de production de turbulence due aux forces visqueuses, et les constantes utilisées sont: $\sigma_k=1$, $\sigma_\epsilon=1.3$, $C_{\epsilon 1}=1.44$ et $C_{\epsilon 2}=1.92$.

C. Méthode VOF (Volume of Fluid method)

La méthode VOF a été initialement introduite par Hirt et Nichols (1981). Cette méthode, est spécialement conçue pour les écoulements diphasiques, elle est caractérisée par un suiveur d'interface qui nécessite la résolution de l'équation de transport de la fraction de volume α_q de la phase q dans une cellule. Cette équation s'écrit comme suite :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = 0 \quad (7)$$

Dans laquelle, $\vec{v}_q$ est la vitesse de la phase q .

Dans le cas général, la méthode VOF traque le mouvement d'un certain volume de fluide à travers le domaine de calcul, sans accorder de l'importance au fait que ce volume contienne l'une des phases ou l'autre ou un mélange des deux. Les deux phases sont traitées en tant que mélange homogène, par conséquence une seule série d'équations est nécessaire [2].

L'interface peut être calculée par différentes manières, on peut distinguer (Fig.1) : le schéma SLIC (*Simple Line Interface Calculation*) et le schéma PLIC (*Piecewise Linear Interface Calculation*) [7], ce dernier schéma est le plus préférable.

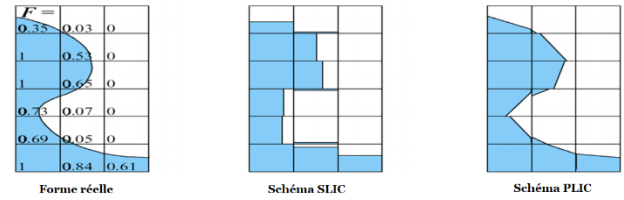


Fig. 1. Principe de la méthode VOF; (à gauche) Interface réelle ; (au-milieu) Classe des méthodes SLIC; (à-droite) Classe des méthodes PLIC [7]

La méthode VOF est restreinte par des limites d'application, qui sont les suivantes :

- Aucune cellule ne doit être vide (présence d'une ou plusieurs phases combinées);
- Une seule phase seulement qui peut être compressible;
- Les écoulements périodiques ne peuvent être simulés en utilisant les méthodes VOF.

Il arrive souvent dans la méthode VOF que les équations de continuité et de quantité de mouvement soient couplées par des algorithmes tel que l'algorithme SIMPLE ('Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations') utilisé pour introduire la pression dans l'équation de continuité [7].

D. Présentation du code de calcul ANSYS-Fluent

ANSYS-Fluent est un code de calcul généraliste de mécanique des fluides. Il est doté de processus de calcul numérique très performants pour la résolution des équations régissant les divers écoulements [5]. L'utilisation de ce code de calcul pour la résolution des écoulements complexes, pour des applications industrielles et environnementales. D'ailleurs, l'utilisation des codes de calcul de type CFD (Computational Fluid Dynamics) est devenue incontournable pour l'investigation des processus existants et le design de nouveaux processus.

Le principe de fonctionnement du solveur ANSYS-Fluent est basé sur la résolution d'une équation générale de transport à l'aide de la méthode des volumes finis. Ce solveur propose plusieurs schémas conservatifs de discrétisation qui assurent une meilleure prise en compte des types du transport par diffusion ou par convection ou les deux à la fois. Vis-à-vis de la convergence et de la stabilité des calculs, le solveur ANSYS-Fluent est doté d'un processus performant de résolution des équations discrétisées des différentes propriétés transportées[2].

Idem, il est conçu pour résoudre les écoulements laminaires et turbulents. Pour le traitement de la turbulence, le solveur propose deux approches de modélisation : l'approche statistique basée sur la fermeture en un point au premier et au second ordre, et l'approche basée sur la simulation des grandes échelles (*LES ; Large Eddy Simulation*) [5].

La formulation générale de l'équation de transport est basée sur les équations différentielles décrivant les différentes variations des propriétés de l'écoulement telles que les vitesses moyennes $\bar{U}_i$, l'énergie cinétique de turbulence k , le taux de dissipation de cette dernière ϵ ainsi que les composantes du tenseur de Reynolds $\overline{u_i u_j}$. Dans le cas d'écoulements permanents, la forme d'une équation générale de transport s'écrit sous la forme suivante [2]:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{U}_i \Phi)}_A = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i}(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x})}_B + \underbrace{S_\Phi}_C \quad (8)$$

Où le terme 'A' est un transport par convection, 'B' est un transport par diffusion, 'C' est un terme source, Φ : Propriété moyenne transportée, Γ_Φ : Coefficient de diffusion de la propriété Φ , S_Φ : Terme source de la propriété Φ .

III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Deux simulations sur un écoulement en charge et une troisième sur un écoulement à surface libre ont été réalisées. La première simulation a été réalisée en présence d'un seul élément de rugosité, la deuxième en présence d'une rugosité périodique et la troisième au-dessus d'un seul élément de rugosité. Les conditions aux limites utilisées sont présentées comme suivant : $h=1\text{m}$, $Q_{\text{moy}}=0,04 \text{ m}^3/\text{s/ml}$, $Re=39,88 \times 10^3$, $k=43 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$, $\varepsilon = 5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^3$. A la paroi, nous avons résolu l'écoulement jusqu'à la zone logarithmique, pour ce fait nous avons utilisé la loi standard de ANSYS-Fluent. Au plan de symétrie, nous avons utilisé la condition de Symétrie.

Pour l'estimation des paramètres de paroi on propose dans ce travail d'utiliser la formulation en nombre de Reynolds qui est exprimée comme suit :

$$U^+ = \frac{U}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z-z_0}{\nu} u^* \right) + C(K_s^+) \quad (9)$$

La détermination de u^* , z_0 et C le long de l'élément de rugosité, nécessite un traitement des profils de vitesse, ainsi, les données fournies par le code ANSYS-Fluent. La distribution de la contrainte de cisaillement turbulent nous permet de déterminer la vitesse de frottement graphiquement en utilisant la formulation de frottement pariétal donnée par l'expression de Cheng & Castro (2002). Nous extrapolons pour cela la partie linéaire de $(-\overline{uw})$ jusqu'aux sommets des barrettes [6]. Cette expression s'écrit comme suite :

$$u^* = \sqrt{-\overline{uw} + \nu \frac{\partial U}{\partial y}} \quad (10)$$

Et puisqu'il n'y a pas de formulations universelles de la fonction du nombre de rugosité $C(K_s^+)$ qui dépend nettement de la nature et de la géométrie des rugosités (Piquet, 1999), les valeurs de rugosité équivalente sont exportées graphiquement pour des valeurs de B_r à l'environ de 8,5 pour un régime pleinement rugueux [8].

Pour mieux visualiser les variations portées aux paramètres de paroi, il va falloir positionner des sections autour de la rugosité, et pour cela, nous avons étudié principalement dix (10) sections, positionnées autour de l'élément de rugosité. Ces sections sont montrées dans la figure (Fig. 2).

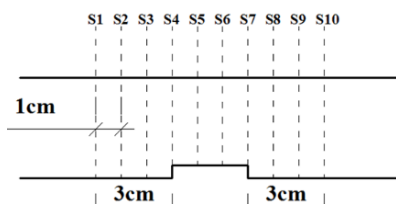


Fig. 2. Positions des sections étudiées

A. Écoulement en charge en présence d'un seul élément de rugosité

Dans ce type d'écoulement, la vitesse de frottement u^* , l'origine z_0 de la loi logarithmique et la rugosité équivalente sont estimée numériquement pour chaque section étudiée, dont les valeurs de u^* , z_0 et C sont regroupés dans la Fig.3, avec un écart maximal de B_r de l'ordre de 0,9.

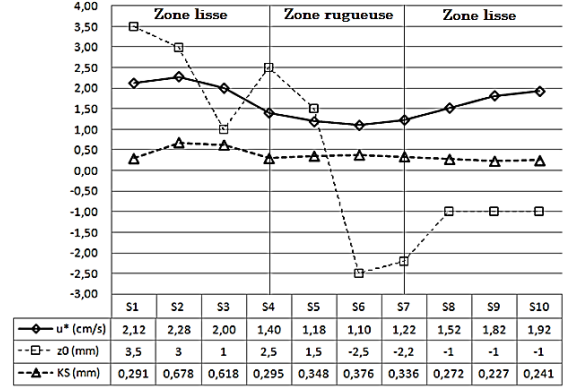


Fig. 3. Evolution des paramètres de paroi d'un écoulement en charge

La première constatation que nous pouvons remarquer sur ces profils, est résidée la forte diminution de décalage de l'origine z_0 aux niveaux des dernières sections S6 et S7 par rapport aux autres sections qui englobent l'élément de rugosité. Ainsi une diminution significative suivant la section S3, et cela est traduit par la présence d'une intensité turbulente plus importante due à la formation de la zone de recirculation en amont de l'élément de rugosité. En plus, suivant la section S10 où l'influence de rugosité devient plus en plus absente, on observe des valeurs très faibles de l'origine z_0 par rapport aux celles de la section S4. Ainsi tous les paramètres se stabilisent progressivement en éloignant de la zone rugueuse.

B. Écoulement en charge au-dessus d'une rugosité périodique

Dans ce cas, nous traitons l'évolution des paramètres de paroi pour une rugosité périodique. Nous avons utilisé l'exploration des profils de contrainte de cisaillement jusqu'au-dessus du fond réel, et cela pour déterminer la vitesse de frottement en utilisant la formule (9) citée précédemment.

Les valeurs de u^* , z_0 et C ainsi déterminées suivant chaque section S_i , sont regroupés dans la Fig. 4.

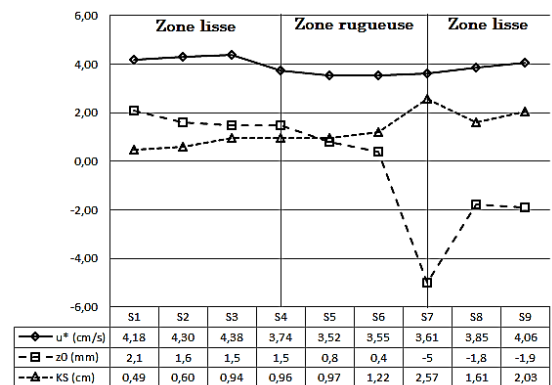


Fig. 4. Evolution des paramètres de paroi d'une rugosité périodique

Ces paramètres présentent des évolutions assez comparables avec un écart faible, en parlant de la constante Br, dont la valeur optimale est 8,5 pour des écoulements sur paroi rugueuse.

Cette figure montre bien que la valeur maximale de z_0 est localisée à la verticale de section S3, où cette verticale est caractérisée par la présence de zone de découlement amont de l'élément de rugosité, ainsi, la valeur minimale de la rugosité équivalente k_s^+ est localisée à la section S1, et cela due à la présence de la zone morte située entre deux éléments de rugosité successifs. Tandis que les valeurs de u^* présentent une distribution quasiment stable au-dessus de toute la zone rugueuse avec un écart maximal de l'ordre 0,86 cm/s.

C. Écoulement à surface libre en présence d'un seul élément de rugosité

Dans cette section, nous avons traité le cas d'un écoulement à surface libre. Les valeurs de u^* , z_0 et C, ainsi déterminées suivant chaque verticale sont regroupés dans la Fig. 5. Les valeurs obtenues de Br suivant les sections étudiées, vérifient la condition des régimes rugueux, dont l'écart est de l'ordre 0,88 au maximum.

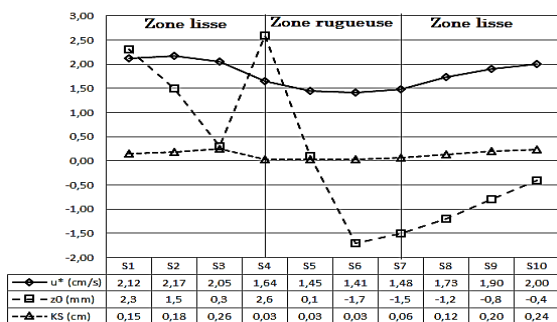


Fig. 5. Evolution des paramètres de paroi d'un écoulement à surface libre

Dans ce cas où l'écoulement est à surface libre, la distribution de décalage de l'origine z_0 présente une forte augmentation entre les deux sections S3 et S4 (zone de découlement à l'extrémité amont de l'élément de rugosité) et atteint sa valeur maximale 2.6 mm, puis une rechute aux les sections (S4, S5 et S6) au-dessus de la zone rugueuse jusqu'à une valeur négative de l'ordre -1.7mm (zone de recirculation aval), et quand on s'éloignant de la zone rugueuse, le décalage de l'origine z_0 augmente progressivement. La rugosité équivalente k_s^+ et la vitesse de frottement u^* se caractérisent par une distribution homogène sur toute la zone située au-dessus de la rugosité avec des écarts maximal de l'ordre 0.23 mm et 0.76 cm/s successivement pour k_s^+ et u^* .

IV. CONCLUSION

Nous avons procédé dans la présente investigation à l'application du modèle $k-\varepsilon$ et la méthode VOF, disponibles dans le code de calcul ASYS-Fluent, d'une part le modèle $k-\varepsilon$ dans sa version standard aux écoulements en charge, et d'autre part, dans son couplage avec la méthode VOF adaptée aux écoulements à surface libre. Nous avons pu établir quelques constatations sur les écoulements traités et leurs comportements.

L'écoulement dans la zone proche paroi et au-dessus de la zone rugueuse, est caractérisé par une forte production de la turbulence et de l'énergie cinétique turbulente, et cela est du à l'interaction fluide paroi et la présence des éléments de singularité dans ces zones qui favorise davantage la production de turbulence. Ainsi, l'influence de l'élément de rugosité sur le comportement longitudinal de l'écoulement dans la partie située en amont de la zone rugueuse, est plus étendue en écoulement à surface libre plutôt qu'un écoulement en charge. Nous avons constaté aussi qu'une succession périodique des éléments de rugosité favorise la formation d'une zone quasiment morte, caractérisée par des vitesses très basses et accompagnée à la formation d'une zone de recirculation en aval et une zone de découlement en amont de chaque élément constitutif de la rugosité du fond. Cette zone est diminuée progressivement en rapprochant du milieu de la cavité formée par les éléments de rugosités.

Ce qui concerne l'évolution longitudinale des paramètres de paroi, une forte variation de ces paramètres au-dessus de la rugosité, est celle liée au décalage de l'origine de la loi logarithmique z_0 . Ces paramètres marquent leur plus forte perturbation dans le cas d'un écoulement à surface libre. Néanmoins, quand il s'agit d'un écoulement en charge en présence d'une rugosité périodique, la forte diminution de décalage de l'origine z_0 est marquée suivant la section S7 (extrémité aval de chacun des éléments constitutifs de la rugosité périodique). Les deux autres paramètres, la vitesse de frottement u^* et la rugosité équivalente k_s s'évaluent d'une manière comparable le long de la zone rugueuse avec des écarts faibles par rapport à la valeur moyenne de chacun des paramètres.

REFERENCES

- [1] Ansys.Inc Users's Guide. Fluent Incorporated. Guide to the Fluent Documentation, Licence de LRHAE Bejaia, 2016
- [2] Benmebarek Mourad. Modélisation et simulation des écoulements à surface libre en présence de singularités du fond. thèse de magister, Département d'hydraulique, Université Abderrahmane MIRA. - Bejaia Algerie , 2015, pp
- [3] Benmebarek Mourad & Berreksi Ali . Numerical simulation of 2D torrential flow above a channel with a high bottom slope, 3rd International Conference On African Large River Basin Hydrology (ICALRBH), 2018.
- [4] Debnath, K., A. K. Bhattacharya, B. Mahato & A. Chakrabarti. Volume of Fluid Model for Numerical Simulation of Vegetated Flows. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 14, 72-87.
- [5] Hamani S. (2014) "Modélisation des écoulements turbulents à surface libre".Thesis, Département d'Hydraulique. Option : Hydraulique Générale, Université A.MIRA-Béjaia, 2014, pp 40-75.
- [6] Labiod Choaib. Ecoulement à surface libre sur fond de rugosité inhomogène".Thesis, Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace. Spécialité : Sciences de la Terre et de l'Environnement, INP.Toulouse, 2005. pp 6-37.
- [7] VORONETSKA Kateryna 'Simulation numérique directe des écoulements à phases dispersées' Thèse de doctorat, l'université bordeaux i ; école doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur, 2012, pp 15, 16 et 20.
- [8] Zaouali Sahbi. Structure et modélisation d'écoulements a surface libre dans des canaux de rugosité inhomogène .Thesis, École doctorale : Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace. Spécialité : Sciences de la Terre et des Planètes Solides, INP.Toulouse, 2008. pp 5-39.