

**SIMULATION NUMERIQUE DES ECOULEMENTS A SURFACE
LIBRE DANS LES COURSIERS LISSES ET A MARCHES
D'ESCALIER
NUMERICAL SIMULATION OF FREE SURFACE FLOWS IN
SMOOTH AND STEPPED SPILLWAY**

Fatiha. LEBDIRI, *Laboratoire de Recherche en Hydraulique Appliquée et Environnement, Faculté de Technologie, Univ. Bejaia, Algérie.*
lebdiri.fatiha@gmail.com,

Sofiane HAMANI, *Laboratoire de Recherche en Hydraulique Appliquée et Environnement, Faculté de Technologie, Univ. Bejaia, Algérie.*
hamani.sofiane@gmail.com

Abdelghani SEGHIR, *Laboratoire de Recherche en Hydraulique Appliquée et Environnement, Faculté de Technologie, Univ. Bejaia, Algérie.* seghir.a@gmail.com,

RESUME : Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes intéressés à la simulation numérique d'un écoulement turbulent dans les coursiers à marches d'escalier. Pour cela, nous avons élaboré des modèles numériques en utilisant le code de calcul Ansys-Fluent basé sur la méthode des volumes finis. Les équations résolues sont les équations de Navier-Stokes pour un fluide incompressible et les équations de k- ϵ pour modéliser la turbulence. Le traitement de la surface libre a été réalisé par le modèle VOF couplé avec Level-Set. L'effet des marches d'escalier sur les caractéristiques de l'écoulement a été évalué en examinant les profils longitudinaux des vitesses et de la dissipation de l'énergie cinétique de l'écoulement.

Mots clés : Ecoulement turbulent, Coursier à marches d'escalier, VOF, Level-Set.

ABSTRACT: In this work, we deal with numerical simulation of turbulent flow in stepped spillway. For this purpose, we have developed numerical models using the Ansys-Fluent software which is based on the finite volume method. The solved equations are the Navier-Stokes equations for an incompressible fluid and the equations of k- ϵ model for turbulence. The free surface is treated using the VOF model coupled with Level-Set. The effect of steps on the flow characteristics was evaluated by examining the longitudinal profiles of the velocity field and the dissipation of the kinetic energy of the flow.

Keywords: Turbulent flow, stepped spillway, VOF, Level-Set.

INTRODUCTION

Avec la construction des barrages, le problème d'évacuation des forts débits générés par les crues est apparu. Cela a nécessité la construction d'ouvrages particuliers appelés évacuateurs de crues. Le long de ces ouvrages, l'eau s'écoule à grande vitesse, ce qui peut conduire à d'importants dommages dus à l'érosion du lit à l'aval du barrage. Afin de dissiper la majeure partie de l'énergie cinétique de l'écoulement, le recours à l'utilisation des ouvrages de dissipation est indispensable. On en cite les sauts de ski, les bassins de dissipation ou la construction des marches sur le coursier de l'évacuateur de crues. Vue l'importance de la dissipation de l'énergie dans les coursiers à marches d'escalier, plusieurs modèles physiques, comme celui de Ghamani et Rajaratnam (1999), ont été construits pour analyser l'écoulement de l'eau dans ces structures. Ces modèles physiques sont très coûteux et prennent beaucoup de temps pour leur réalisation. Avec le développement technologique et l'apparition des ordinateurs de hautes performances, plusieurs études se sont penchées sur la modélisation numérique pour simuler les problèmes de l'écoulement de l'eau dans ce type d'ouvrages de dissipation. On en cite comme exemple celles de Kositgittiwong (2012), Nikseresht (2013), Daneshfaraz (2014) qui sont basées sur la comparaison entre les divers modèles de turbulence et les modèles diphasiques. Kherbache et al (2013) ont étudié l'influence de la charge sur la distribution des pressions et d'énergie cinétique turbulente dans un coursier à marches d'escalier. Rassaei et Rahbar (2014) ont évalué l'effet des différents paramètres (nombre, longueur, hauteur des marches, et la charge unitaire) sur la dissipation d'énergie dans un coursier à marches d'escalier.

Dans ce présent travail, nous avons simulé un écoulement bidimensionnel dans deux types de coursiers (coursiers lisses et coursiers à marches d'escalier) en utilisant le code de calcul Fluent Software basée sur la méthode des volumes finis.

EQUATIONS DE BASE

Les équations qui gouvernent l'écoulement sont l'équation de continuité, et l'équation de Navier-Stokes ou l'équation de quantité de mouvement pour un fluide Newtonien incompressible. Par prise de la moyenne d'ensemble en respectant les règles de Reynolds ces équations s'écrivent comme suit :

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

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + g_{x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

Avec ;

\bar{u}_i les composantes de la vitesse moyenne et u'_i sa composante fluctuante

ρ : la masse volumique,

\bar{P} : la pression moyenne,

ν : la viscosité cinématique,

g : les forces de gravité et $-\overline{u'_i u'_j}$ sont les composantes du tenseur de Reynolds.

Cette équation fait apparaître les contraintes de Reynolds comme inconnues supplémentaires ce qui confère au système un caractère ouvert.

Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé le modèle k- ε basé sur le concept de la viscosité turbulente pour la fermeture de système d'équations à résoudre, ses équations sont données comme suit :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}'_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \nu_t \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{\partial \bar{u}'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}'_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

Avec,

$$\nu_t = C_u \frac{k^3}{\varepsilon}, C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92, \sigma_\varepsilon = 1.3, \sigma_k = 1.0, C_u = 0.09$$

La surface libre est capturée en utilisant le modèle VOF (Volum Of Fluid) couplé avec le modèle Level-Set. Le modèle VOF est utilisé pour localiser les deux fluides, par contre le modèle Level-Set est utilisé pour capturer l'interface séparant les deux fluides. Le modèle VOF utilise la notion de la fraction volumique pour distinguer les deux fluides, pour ce fait une équation de la fraction volumique est résolue dans le domaine. Cette fraction volumique est advectée par l'équation de transport suivante :

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha_q \bar{U}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

Où, α_q est le champ de la fraction volumique de la phase q.

Dans le cas de deux fluides, l'équation (5) est résolue uniquement pour une seule phase afin de repérer chacun des deux fluides dans tout l'espace. La valeur de α_q est comprise entre 0 et l'unité. Si $\alpha_q=1$ la cellule est complètement occupée d'un fluide et si $\alpha_q=0$ c'est l'autre fluide qui occupe cette cellule. Par contre si $0<\alpha_q<1$ la cellule est en présence à la fois des deux fluides séparés d'une interface. Cette interface, dans le cas de la présence de l'eau est de l'air, présente la surface libre. Pour prendre en considération des deux fluides dans le domaine de calcul, la masse volumique et la viscosité cinématique présentes dans les équations du mouvement sont données en fonction de la fraction volumique comme suit :

$$\rho = \alpha_q \rho_e + (1 - \alpha_q) \rho_a \quad (6)$$

$$\nu = \alpha_q \nu_e + (1 - \alpha_q) \nu_a \quad (7)$$

Où, les indices e et a désignent l'eau et l'air respectivement.

Pour capturer l'interface la méthode Level-Set utilise une fonction F constituant une infinité de courbes de niveau de part et d'autre de l'interface. Alors cette dernière représente la courbe de niveau zéro. Cette méthode utilise une équation de transport équivalente à l'équation de la fraction volumique pour prédire la fonction F , elle est donnée par :

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{U}_i F)}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

PRESENTATIONS DES MODELES

Les caractéristiques des géométries utilisées sont représentées dans le tableau ci-après.

Caractéristiques des géométries

Cas	Type du coursier	Longueur du Coursier (m)	Pente	Nombre de marches	Hauteur des marches (m)	Longueur des marches (m)
1	Coursier	1.202	45°	-	-	-
2	lisse	1.202	22.5°	-	-	-
3	Coursier à marches	1.202	45°	9	0.085	0.085
4	d'escalier	1.202	22.5°	9	0.046	0.111

Les géométries ont été discrétisées en utilisant des éléments quadratiques avec une taille maximale des éléments de 0.002m. Pour les conditions aux limites nous avons utilisé :

A l'entrée : Nous avons imposé « Velocity inlet » qui permet d'imposer la vitesse moyenne de l'écoulement pour l'eau et l'air, leurs intensités de turbulence et l'échelle de longueur. Ces conditions sont fixées comme suit : $u_{\text{eau}}=0.82\text{m/s}$, $v_{\text{eau}}=0\text{m/s}$, $I_{t,\text{eau}}=3\%$, $l_{l,\text{eau}}=0.069\text{m}$, $u_{\text{air}}=0.82\text{m/s}$, $v_{\text{air}}=0\text{m/s}$, $I_{t,\text{air}}=3\%$, $l_{l,\text{air}}=0.069\text{m}$. Où : I_t est l'intensité de la turbulence et l_l est l'échelle de longueur.

A la sortie et à la surface libre : Nous avons imposé la condition « **Pressur outlet** » qui permet d'imposer la pression atmosphérique.

A la paroi : nous avons choisi la condition « **scalable wall function** » (voire le guide de Ansys-Fluent).

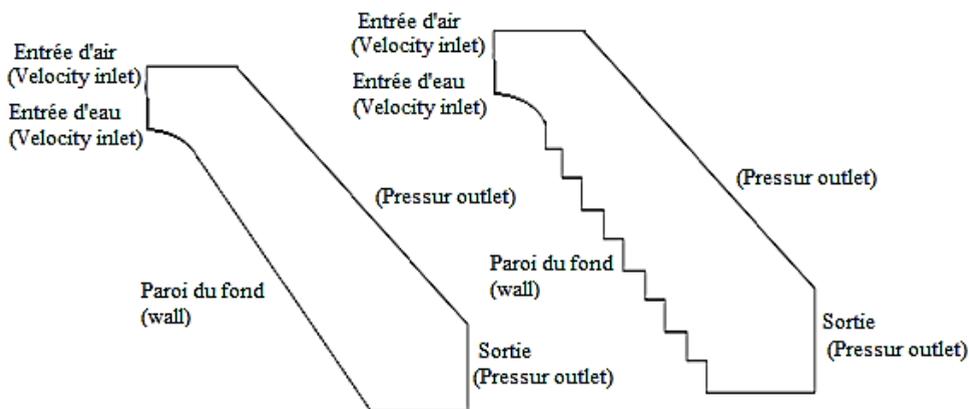


Fig. 1. Géométries et conditions aux limites utilisées

RESULTATS ET DISCUSSION

Effet des marches d'escalier sur la surface libre

Pour déterminer l'effet des marches d'escaliers sur la variation de la surface libre, nous allons comparer le profil de cette surface obtenu pour un coursier lisse avec celui à marches d'escalier. Les figures ci-dessous représentent les résultats obtenus en termes de positions de la surface libre dans les deux cas de pente de coursiers.

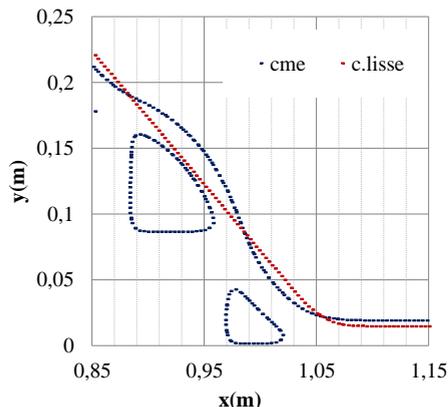


Fig.2. Détail au pied du coursier
(pente 22.5°)

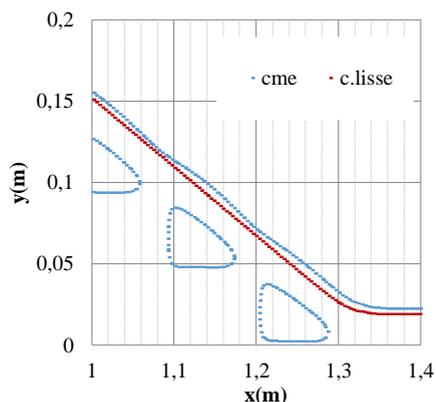


Fig.3. Détail au pied du coursier
(pente 22.5°)

La comparaison des profils de la surface libre obtenus dans les différents cas montrent que la hauteur de la surface libre dans les coursiers à marches d'escalier (CME) est plus grande que celle des coursiers lisses. Cette différence de hauteur diminue avec la diminution de la pente. Dans le cas des coursiers lisses, la surface libre est rectiligne par contre dans les CME cette surface est caractérisée par des ondulations qui sont plus importantes dans le cas de coursier avec une pente forte (45°). Ces ondulations sont dues à la présence des rouleaux de recirculations provoqués par les marches d'escalier. Ce qui signifie que les marches d'escalier jouent le rôle des macro-rugosités.

Effet des marches d'escalier sur la vitesse et l'énergie cinétique d'écoulement

La figure 4 regroupe les profils longitudinaux de la vitesse moyenne d'écoulement U et de l'énergie cinétique de l'écoulement E . D'après ces figures, nous remarquons une très grande différence entre les profils obtenus pour le cas d'évacuateurs lisses et les cas à marches d'escalier. La vitesse moyenne d'écoulement est plus importante dans le cas du coursier lisse. Ce constat implique que les marches d'escalier provoquent un retardement de l'écoulement, donc une dissipation remarquable de l'énergie cinétique de l'eau.

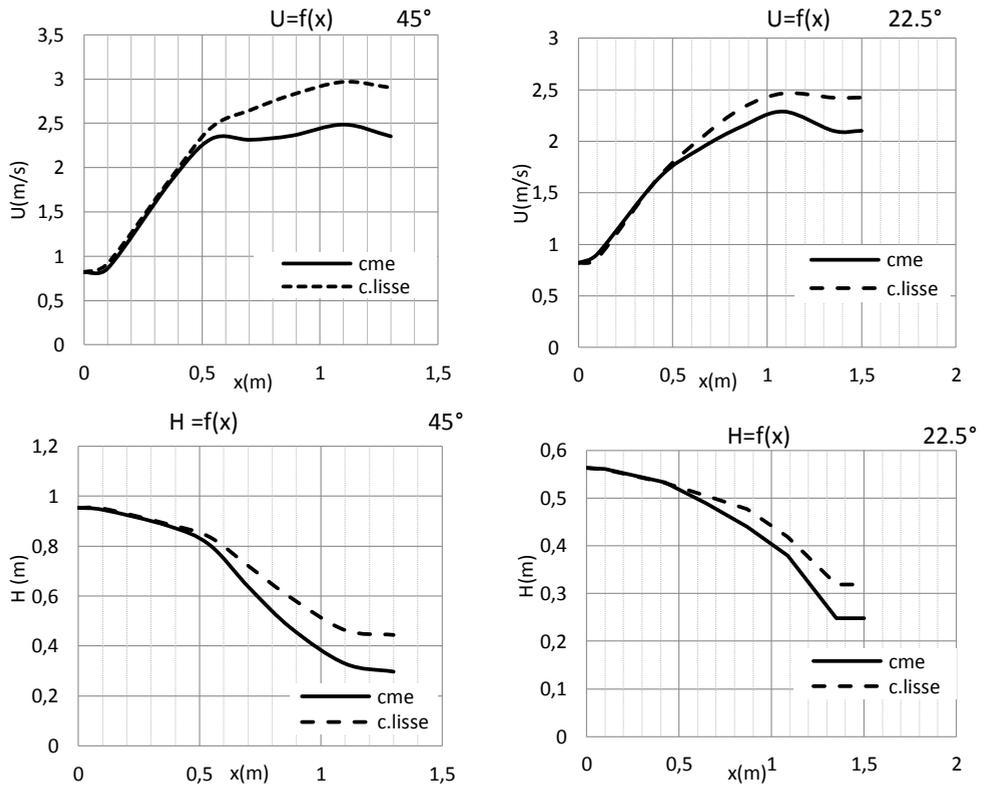


Fig.4. Variation longitudinale de vitesse moyenne d'écoulement et de la charge le long des coursiers

En ce qui concerne l'effet des de la pente, la dissipation de l'énergie est plus importante dans le cas du coursier de pente 45° que celui de 22.5° . L'apport des marches d'escalier en termes de dissipation est estimé à 30% dans le cas de la pente 45° et 21,8% dans le cas de 22.5° .

CONCLUSION

Dans ce travail nous avons fait une comparaison des résultats de simulation des écoulements dans les coursiers lisses et dans les coursiers à marches d'escalier. Ces simulations ont été réalisées avec le code de calcul Ansys-Fluent en utilisant le modèle VOF couplé avec le modèle Level-Set pour capturer la surface libre. Nous avons montré que les marches d'escalier jouent le rôle des macro-rugosités. Ces marches provoquent d'une part une perturbation remarquable de la surface libre, et d'autre part, un retardement de l'écoulement. Par conséquent, ceci engendre une dissipation importante de l'énergie cinétique de l'écoulement. Nous avons montré aussi que la

dissipation de l'énergie cinétique de l'écoulement en présence des marches d'escalier augmente avec l'augmentation de la pente du coursier.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Chamani M. R, N.& Rajaratnam.N. (1999). *Characteristics of skimming flow over stepped spillways*. Journal of hydraulic engineering. pp361-368.
- Daneshfaraz.R, Sadeghfam.S. & Kashani.H.M. (2014). *Numerical simulation of flow over stepped spillways*. Research in Civil and Environmental Engineering. pp 190-198.
- Ansys-Fluent Inc. (2016), Ansys-Fluent 17.2 user guid, USA.
- Kherbache.K, Chesneau.X, Abide.S. & Benmamar. S.(2013). *Modeling of a Water Flow Over Stepped Spillways*. Machine Dynamics Research. 37.1, pp 47 - 64.
- Kositgittiwong.D.D, Chinnarasri.C. & Julien.P.Y. (2012). *Two phase flow over stepped and smooth spillways*. Civil Engineering. pp 147-154.
- Nikseresht .A.H, Talebbeydokhti.N & Rezaei. M.J. (2013). *Numerical simulation of two-phase flow on step-pool spillways*. Scientia Iranica. pp 222-230.
- Rassaei.R. & Rahbar.S.(2014). *Numerical flow model stepped spillways in order to maximize energy dissipation using FLUENT software*.IOSR Journal of Engineering. pp17-25.

&&&&&