

**EFFET DE LA NOYADE PAR AVAL SUR LA PERFORMANCE DU
DEVERSOIR EN TOUCHE DE PIANO (PK-WEIR)
EFFECT OF SUBMERGED BY THE DOWNSTREAM LEVEL ON THE
PERFORMANCE OF PIANO KEY WEIR (PK-WEIR)**

Bassem ATHMANI, Laboratoire Aménagements Hydrauliques et Environnement, Univ. Biskra sibassem.at@gmail.com
Faris BELAABED, Laboratoire Aménagements Hydrauliques et Environnement, Univ. Biskra faris.belaabed@yahoo.fr
Ahmed OUAMANE, Laboratoire Aménagements Hydrauliques et Environnement, Univ. Biskra aouamane@yahoo.fr
Adil LAYADI, Laboratoire Aménagements Hydrauliques et Environnement, Univ. Biskra layadhi.adel@gmail.com

RESUME: Ces dernières années, le déversoir en touches de piano (PK-Weir) a fait l'objet d'application pour un grand nombre de barrages à travers le monde. On peut citer à titre indicatif, les barrages Goulours, Saint Marc, Chamine, Malarce et Gloriette en France, les barrages Van Phong and Dakmi 2 au Vietnam et le barrage Ouljet Mellegue en Algérie. Les conditions d'écoulement sur le PK-Weir sont considérées comme noyé lorsque le niveau d'eau aval influe sur celui de l'amont par l'accroissement de la charge amont qui est exigée pour faire passer un débit égal au débit évacué dans des conditions d'écoulement libre sous une charge inférieure. Le PK-Weir est appelé à fonctionner dans des conditions noyées lorsque un niveau aval élevé est exigé, tel que dans le cas de régulation des cours d'eau pour la navigation ou la production de l'énergie électrique au fil de l'eau. Ainsi, ce papier présente une étude de l'effet de la noyade sur l'écoulement amont du PK-Weir. Cette étude a été réalisée par deux voies, la première expérimentale sur modèle réduit physique et la seconde numérique par le biais du code Flow-3D. Une confrontation des résultats obtenue par les deux modèles a été effectuée.

Mots-Clés: Ecoulement noyé, Ecoulement dénoyé, Modèles physiques, Modélisation numérique, Flow-3D.

ABSTRACT: In recent years, the piano keys weir (PK-Weir) was been applied in a large number of dams all over the world. We can cite, the Goulours, St. Mark Chamine, Malarce and Gazebo dams in France, the Van Phong and Dakmi 2 dams in Vietnam and Ouljet Mellegue dam in Algeria.

The flow conditions on the PK-Weir are considered submerged when the downstream water level influences the upstream by increasing the upstream water level which is required for passing a flow rate equal to the flow rate discharged in free flow conditions under less head. The PK-Weir has to function in submerged condition when a downstream high level is required, as in the case of stream control for navigation or hydropower plants in a river. Thus, this paper presents a study of the effect of submerged on the upstream flow of PK-Weir. This study was accomplished in two steps, the experimental first one on physical models and the second numerical by means of Flow-3D Software. A confrontation of results by both models was performed.

Keywords: Free flow, Submerged flow, Physical models, Numerical modelling, Flow-3D.

INTRODUCTION

Le XXème siècle a été marqué par un taux très élevé de construction de barrages à travers le monde, le total a atteint environ 50000 grands ouvrages. Actuellement plus de 50% de ces barrages dépassent largement les 50 ans de service, ce qui a permis un enrichissement de l'état des connaissances sur le comportement et la grandeur des crues, par conséquent, une réévaluation des critères de sécurité des barrages s'est avérée nécessaire (Ho Ta Khanh, 2012).

Les études contemporaines ont démontré une augmentation de l'intensité des débits des crues maximales par rapport aux crues initiales, donc la sécurité de ces ouvrages reste une question primordiale pour les gestionnaires, la réévaluation des débits des crues maximales conduit à la réhabilitation d'un nombre très important d'évacuateurs de crues des barrages existants, ainsi la recherche de nouvelles solutions pour augmenter la capacité de ces évacuateurs de crues a montré que le déversoir en touches de piano (PK-Weir) offre une solution efficace (Ouamane A et al, 2006, 2007, 2010).

Cette solution est également avantageusement utilisée dans des ouvrages de déversement ou de protection pour les canaux et usines hydroélectriques au fil de l'eau. Les conditions d'écoulement sur le PK-Weir sont considérées comme noyé lorsque le niveau d'eau aval influe sur le niveau d'eau amont par l'accroissement de la charge amont qui est exigée pour faire passer un débit égal au débit évacué dans des conditions d'écoulement libre sous une charge inférieure (Dabling MR et al 2012, Belaabed F et al 2011,2013).

Les différents travaux de recherche réalisés sur le PK-Weir, se sont intéressés à la recherche de la forme optimale du PK-Weir, aux différentes phases d'écoulement et à la performance hydraulique dans des conditions d'écoulement dénoyé.

L'écoulement noyé peut se présenter dans le cas d'une faible pente en aval du déversoir, tel que l'écoulement dans les cours d'eau de navigation et les canaux des usines hydroélectriques au fil de l'eau (Tullis BP 2006, Lopes R et al. 2009). Ainsi, ce travail présente une étude de l'effet de la noyade sur l'écoulement amont du PK-Weir. Pour se faire, cette étude a été réalisée par voies, expérimentale sur modèle réduit physique et numérique par le biais du code Flow-3D.

ETUDE EXPERIMENTALE

Dans le but de déterminer l'influence de l'effet de la noyade sur l'écoulement à l'amont du PK-Weir, des essais sur des modèles réduits ont été réalisés au Laboratoire d'Aménagements Hydrauliques et Environnement de l'Université de Biskra. Ces essais ont été réalisés dans une station expérimentale qui représente un dispositif de simulation de retenue constitué d'un ensemble de canaux à ciel ouvert permettant de simuler les écoulements dans les cours d'eau en amont et en aval des ouvrages hydrauliques. La station d'expérimentation est équipée d'une station de pompage regroupant deux pompes qui débitent 180 l/s, d'un bassin de simulation de retenue ayant une forme rectangulaire 5x4 m et de hauteur 1.5 m. Ce bassin est équipé d'un réseau de prise de pression permettant de déterminer les profondeurs d'eau aux différents endroits du bassin. Le débit qui transite par le dispositif expérimental est mesuré par un débitmètre à ultrason.

Le modèle sujet des essais correspond à un modèle de PK-Weir de type « A », dont les caractéristiques géométriques sont mentionnées dans le tableau 1.

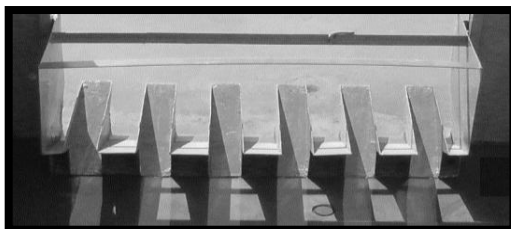
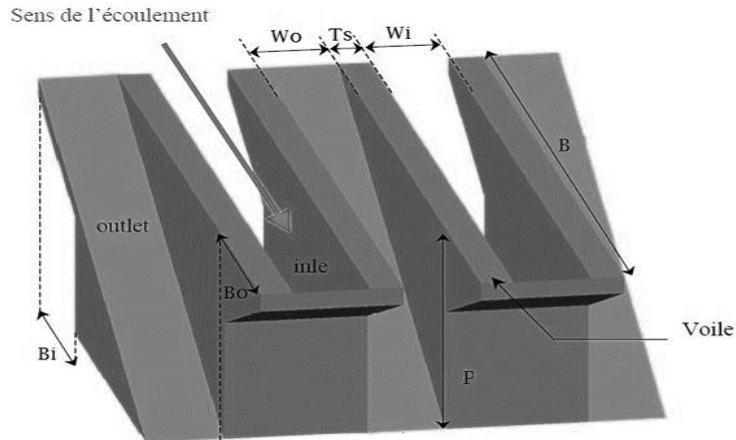


Fig. 1. Modèle de déversoir en PK-Weir de type A

Tableau 1. Caractéristiques géométriques de modèle réduit (cm)

Modèle de déversoir	W_t	W_0	W_i	B	B_0	B_i	P
PK-Weir (A)	266	18	15	47	12	12	20

**Fig.2.** Principaux paramètres de PK-Weir (Schleiss AJ, 2011)

Procédure expérimentale

Après avoir fixé le débit qui transite par les canaux, on mesure le niveau d'eau amont dans les conditions d'écoulement libre. Tout en maintenant le débit constant, on fait augmenter le niveau d'eau à l'aval du PK-Weir par l'installation d'un seuil qui se situe à l'extrémité aval du canal de réception. Après stabilisation de l'écoulement on prend les mesures des profondeurs d'eau en amont et à l'aval du modèle expérimenté. Une fois cet opération est réalisée on fait augmenté une autre fois la hauteur du seuil pour faire augmenter le niveau aval et on opère de la même manière que précédemment.

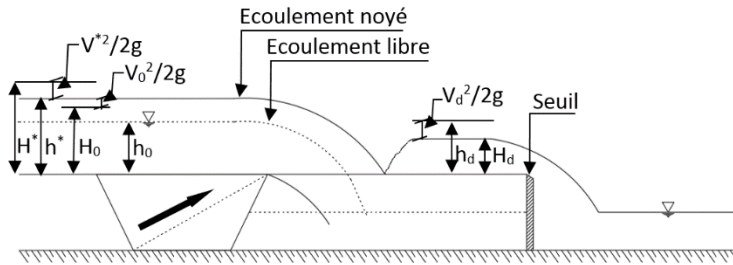


Fig. 3. Définition des paramètres du déversoir à écoulement libre et noyé (Cicero GM et al, 2013)

Écoulement noyé

- H^* : Charge totale amont;
piézométrique amont;
- H_d : Charge totale aval;
piézométrique aval.

- h^* : Charge
- h_d : Charge

Écoulement dénoyé

- H_0 : Charge totale amont;
piézométrique amont.

- h_0 : Charge

Résultats expérimentaux

L'expérimentation sur modèle réduits a concerné trois débits fixes (faible, moyen et grand débit) pour des charges d'eau variables. Pour mieux comprendre l'effet de la noyade, les résultats obtenus ont été exprimé par la charge relative amont en fonction de la charge relative aval $H^*/H_0 = f(H_d/H_0)$ comme le montre la figure 4.

La figure 4 montre que pour les différents débits choisis, les trois courbes adimensionnelles obtenus et qui représentent la charge relative amont en fonction de la charge relative aval sont identiques et représentent une seule courbe unique, ainsi on peut dire que la variation de la charge relative aval par rapport à la charge relative amont est indépendante du débit qui transite sur le PK-Weir. Ceci indique que l'effet de la noyade est plus lié à la charge d'eau que le débit.

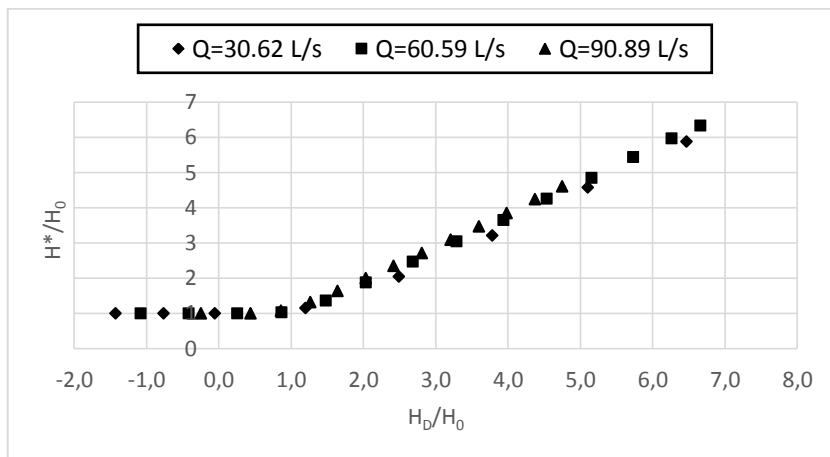


Fig. 4. Courbes de la charge relative amont en fonction de la charge relative aval

ETUDE NUMERIQUE

Les essais expérimentaux ont permis de mieux appréhender le phénomène mis en jeu. Dans un but de mieux comprendre le phénomène de la noyade, il était essentiel de développer un modèle numérique permettant d'étudier l'écoulement noyé sur le PK-Weir.

Les études de la modélisation numérique ont été réalisées dans leur majorité par l'utilisation des différents codes de calcul pour la simulation et l'optimisation du processus de l'écoulement. Parmi ces codes, le logiciel Flow-3D qui représente un outil permettant des études numériques de grande qualité de la plupart des phénomènes physiques possibles en mécanique des fluides, dans les différents domaines industriels et de recherche.

Le présent travail s'est intéressé à la simulation de l'écoulement dénoyé et noyé sur le PK-Weir. Pour se faire, un modèle numérique a été élaboré. Cette première opération a été réalisée par le biais du logiciel FLOW-3D. Dans un second temps, une confrontation de validation entre les résultats du modèle physique et ceux du modèle numérique ont été réalisés.

Modélisation

Géométrie et maillage

La première étape consiste à construire un modèle tridimensionnel. Dans le logiciel Flow-3D les formes peuvent être créées en trois dimensions si le modèle est simple. Dans le cas d'une géométrie complexe comme pour le PK-Weir, il est nécessaire de faire intervenir un autre logiciel pour créer

cette géométrie. Le logiciel AutoCAD permet de produire la géométrie complexe sous forme solide en 3D. Par la suite, le solide est importé dans le logiciel Flow-3D dans un fichier avec l'extension "STL".

La deuxième étape de la modélisation numérique consiste à construire le maillage. Cette étape est la plus délicate pour avoir une bonne précision de la solution numérique. Flow-3D utilise un maillage structuré et rectangulaire, ce dernier subdivise le domaine de l'écoulement en éléments rectangulaires, parfois appelé éléments en briques. Les critères considérés pour avoir une bonne qualité, une bonne résolution et pour la fiabilité des simulations sont :

- Le choix du maillage est la bonne représentation de la géométrie.
- La convergence du maillage "le maillage est raffiné successivement jusqu'à obtenir une solution stable".
- Le choix du maillage est le temps de calcul de la simulation.

Une étude de la sensibilité au maillage doit être conduite par une modélisation CFD, afin que la solution satisfasse aux critères mentionnés précédemment.

Dans le cadre de cette étude de l'écoulement sur le PK-Weir, les résultats du débit calculé sont liés au nombre d'éléments de maillage. Donc le raffinement du maillage joue un rôle fondamental dans la convergence des résultats.

De cette façon, des tests de raffinement du maillage ont été effectués pour le PK-Weir type « A ». Le maillage considéré comporte trois configurations. Pour chacune, le maillage a été raffiné de 25% de la petite épaisseur de la géométrie (la taille de cellule est égale à la plus petite dimension de la géométrie). Le tableau 2 présente les trois configurations du maillage.

Tableau 2. Grilles utilisées pour l'étude de sensibilité du PK-Weir

Raffinement du maillage	Maillage (1) Grossier	Maillage (2) Moyenne	Maillage (3) Fin
Type de maillage	Structuré		
Nombre de cellule	$1 \cdot 10^6$	$3.3 \cdot 10^6$	$8.5 \cdot 10^6$

Les résultats des simulations, l'écart relatif pour chaque maillage et le temps de calcul sont représentés dans le tableau 3.

Tableau 3. Résultats des simulations pour l'étude de sensibilité du maillage

Raffinement du maillage	Nombre de cellule	Temps de calcul	Débit (Flow-3D) (m ³ /s)	Ecart relatif (Q= 98.55 m ³ /s) (%)
Maillage (1) Grossier (100%)	1 10 ⁶	4 h 55	124.38	26.2
Maillage (2) Moyenne (75%)	3.3 10 ⁶	12 h 28	100.76	2.2
Maillage (3) Fin (50%)	8.4 10 ⁶	74 h 34	99.67	1.1

Le maillage retenu est celui qui donne des solutions numériques acceptables et satisfait aux critères.

D'après l'analyse des résultats de simulation présentés ci-dessus, nous concluons que le maillage 1 n'offre pas une bonne représentation géométrique à cause de nombre réduit des cellules (Fig.5), c'est la raison pour laquelle, le débit des simulations est très éloigné de la valeur du débit mesuré. Le maillage 3 offre une très bonne précision sur les résultats, mais dans un temps de calcul supérieur à 6 fois celui du maillage 2. Le maillage 2 nous fournit une bonne représentation géométrie et avoir des résultats dans un temps raisonnable, et d'avoir une bonne précision.

A cet effet, le maillage 2 est considéré le plus optimale, il donne un bon compromis entre le temps de calcul et le nombre de mailles raisonnables pour prédire avec une bonne exactitude les mesures de débit (Fig.6).

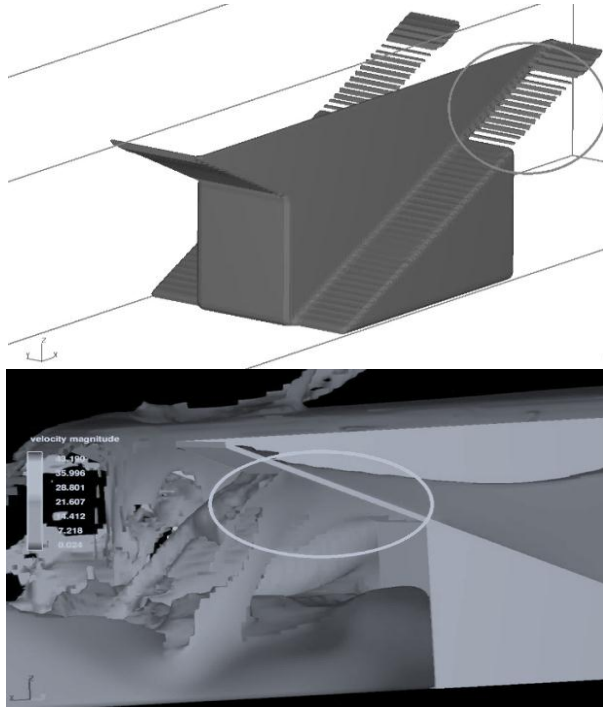


Fig.5. Erreurs dues au nombre réduit de cellule

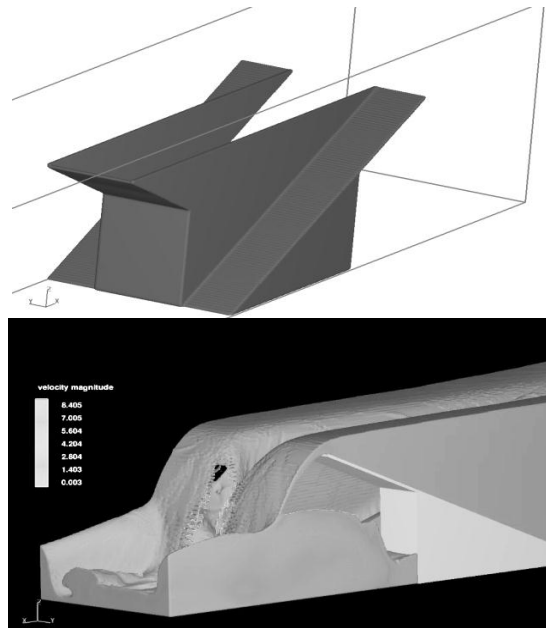


Fig.6. Résultats des simulations (Maillage 2)

Conditions aux limites

En entrée : Volume flow rate

En sortie : outflow

Et sur les frontières du domaine (Ymin/Max) : Symmetry

Validation

La validation du modèle numérique est une phase essentielle qui permet de vérifier le modèle numérique. Dans cette phase le modèle doit être validé avec les résultats expérimentaux obtenus.

Ainsi, une comparaison a été faite entre les niveaux d'eau amont et aval mesuré expérimentalement et calculé avec le code Flow-3D, en prenant en compte les différentes phases de l'écoulement (dénoyé, de transition et noyé).

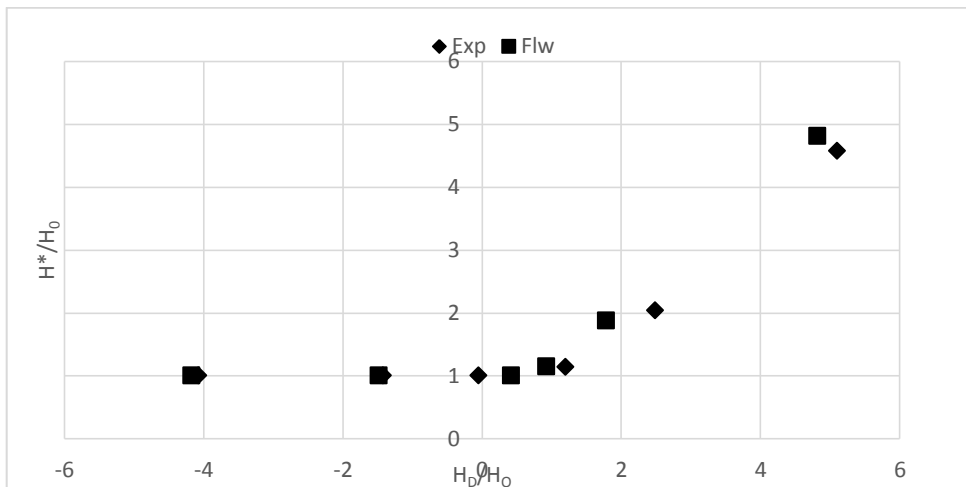
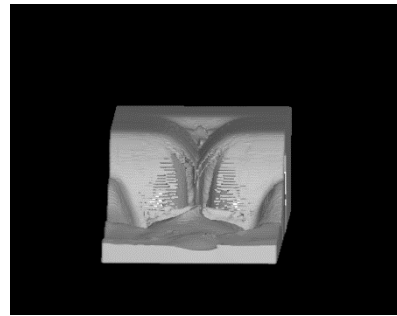


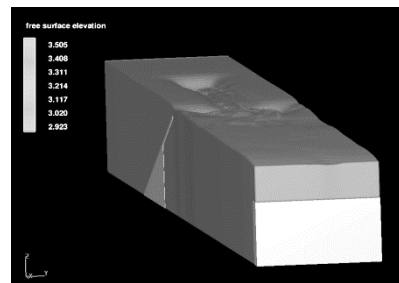
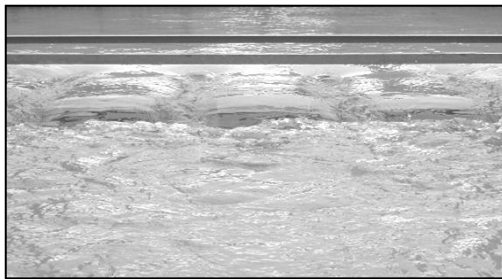
Fig. 7. Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques

La figure 7 illustre une comparaison entre les charges relatives (amont et aval) calculé par Flow-3D et les charges obtenus sur modèle réduit physique. Les résultats obtenus montrent que le modèle numérique utilisé est fiable puisque la comparaison des résultats numériques et expérimentaux montre une bonne concordance : inférieur à 4% d'erreur moyenne sur l'ensemble du domaine d'étude suivant la configuration étudiée.

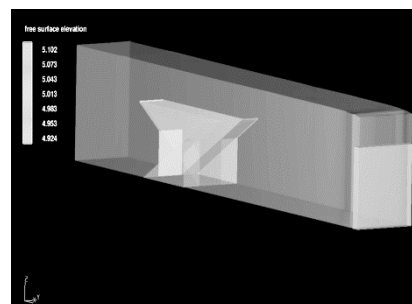
La surface libre obtenue par Flow-3D est similaire à celle qui est observée sur le modèle réduit expérimenté. La figure 8 montre la forme de la surface libre sur le PK-Weir (expérimental et numérique) dans les trois phases d'écoulement.



I- Phase d'écoulement libre (Dénouyé)



II- Phase de transition (le niveau d'eau aval = le niveau de la crête)



III- Phase d'écoulement noyé

Fig.8. Différentes phases de l'écoulement sur le PK-Weir

CONCLUSION

Ce travail constitue une contribution à l'étude de l'écoulement sur le PK-Weir par voies expérimentale et de modélisation numérique qui a été réalisée essentiellement par le biais du code Flow-3D.

Les résultats des essais sur le modèle physique ont montré que le PK-Weir peut être une solution plus efficace dans les conditions d'écoulement libre et noyé, les conditions aval peuvent influencer l'écoulement à l'amont du PK-Weir et par conséquent affecter la performance de ce type de déversoir.

La simulation effectuée en 3D a permis d'avoir une vision globale sur le phénomène d'écoulement sur le PK-Weir avec une meilleure compréhension du problème de l'écoulement noyé. Cette étude s'est axée sur l'optimisation du maillage. En effet, un très bon compromis a été mis en évidence entre le temps de calcul et l'efficacité. Les tests de validation du modèle numérique est justifié grâce à la bonne concordance trouvée entre les résultats de la modélisation numérique et ceux expérimentaux.

Dans les travaux qui sont en phase de réalisation, des études détaillées de l'écoulement complexe sous ses différents aspects sont envisagées, afin de rendre la modélisation d'écoulement sur le PK-Weir plus proche encore de la réalité.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Belaabed F, Ouamane A. (2011) *Contribution to the study of the Piano Key Weirs submerged by the downstream level*. Labyrinth and Piano Key Weirs. pp. 89-95. ©2011 Taylor & Francis.
- Belaabed F, Ouamane A. (2013) *Submerged flow regimes of Piano Key wei*. Labyrinth and Piano Key Weirs II. pp. 85-92. ©2013 Taylor & Francis.
- Cicero GM, Delisle JR. (2013) *Discharge characteristics of Piano Key weirs under submerged flow*. Labyrinth and Piano Key Weirs II. pp. 101-108. ©2013 Taylor & Francis.
- Cicero GZ et al. (2013) *Experimental and numerical study of the hydraulic performance of a trapezoidal Piano Key Weir*. Labyrinth and Piano Key Weirs-PKW II 2013, 265-272. London: CRC Presse. 2013.
- Dabling MR, Tullis BP. (2012) *Piano Key Weir Submergence in Channel Applications*. International Workshop on Piano Key Weir for In-Stream Storage and Dam Safety (PKWISD-2012), New Delhi, India.

- Ho Ta Khanh (2012) *Utilization of Piano Key Weirs for low barrages*. Hydro 2012 Bilbao, Spain.
- Laugier F et al.(2010) *Utilisation industrielle de la modélisation hydrodynamique 3D pour l'évaluation de la débitance d'un évacuateur*. La Houille Blanche, N° 2, 2010, pp. 36-46.
- Lopes R et al. (2009) *Discharge capacity for free flow and submerged labyrinth weirs*. Proc. 33rd IAHR congress, Vancouver, Canada.
- Ouamane A, Lempérière F. (2006) *Nouvelle conception de déversoir pour l'accroissement de la capacité des retenues des barrages*. Journal Eau et Environnement, 2006, (8) 68-74
- Ouamane A, Lempérière F. (2010) *Study of various alternatives of shape of piano key weirs*. HYDRO 2010 - Meeting Demands in a Changing World, Congress Centre, Lisbon, Portugal.
- Ouamane A, Lempérière F.(2007) *Increase of the safety of existing dams - Rehabilitation of weir*. Symposium: Dam Safety Management. Role of State, Private Companies and Public in Designing, Constructing and Operating of Large Dams» ICOLD 75th Annual Meeting Saint Petersburg, Russia. 2007.
- Ouamane A. (2006) *Hydraulic and Costs data for various Labyrinth Weirs*. 22th Congress on Large Dams, ICOLD, Q84, Barcelona. 2006.
- Schleiss AJ. (2011) *From Labyrinth to Piano Key Weirs – A historical review*. Labyrinth and Piano Key Weirs-PKW2011, 3-15.London: CRC Press. 2011.
- Tullis BP. (2006) *Predicting submergence effects for labyrinth weirs*. International Symposium on Dams in the Societies of the XXI Century. Barcelona, Spain.

&&&&&