

## **ETUDE DE L'EFFET DE LA FORME DU RADIER DE L'ALVEOLE AVAL SUR LA PERFORMANCE DU DEVERSOIR EN TOUCHES DE PIANO**

**ADIL LAIADI, AHMED OUAMANE**

Laboratoire Aménagements Hydrauliques et Environnement-- Université de Biskra (Algérie)

layadhi.adel@gmail.com, a.ouamane@univ-biskra.dz

### **RESUME**

Une nouvelle forme de déversoir non rectiligne baptisée Piano Key Weir (PK-Weir) a été développée en l'année 2003 par Hydrocoop-France et le Laboratoire Aménagements Hydrauliques et Environnement de l'Université de Biskra (ALGERIE). Cette innovation, a été primée par le trophée de la COP 21, lors de la conférence de Paris sur le climat (2015). Elle représente une alternative fiable et économique pour contrer les risques néfastes des crues. Ce type de déversoir se caractérise par une géométrie particulière définie par des murs verticaux formant des éléments rectangulaires en plan, avec une partie en porte-à-faux ce qui favorise la conception d'un radier incliné.

Le radier des alvéoles du PK-Weir peut prendre plusieurs configurations selon l'emplacement du PK-Weir et l'objectif prévu.

Le présent travail s'intéresse à l'étude de la forme du radier des alvéoles aval du PK-Weir type A1 sous différentes configurations. Pour ce faire, plusieurs formes de radiers ont fait l'objet d'études expérimentales sur modèles physiques avec des conditions d'écoulement libre et sans contraction latérale. Selon les résultats obtenus, il a été conclu que le PK-Weir de type A1 représente une configuration géométrique qui permet de concevoir le radier des alvéoles aval sous plusieurs formes en fonction de l'objectif défini sans pour autant affecter la performance hydraulique.

**MOTS CLES:** Déversoir, évacuateur de crues, PK-Weir, alvéoles, radier, écoulement libre.

### **ABSTRACT**

A new form of non-straight weir named Piano Key Weir (PK-Weir) was developed in 2003 by Hydrocoop-France and the Hydraulic development and Environmental Laboratory of the University of Biskra (ALGERIA). This innovation was awarded with the COP 21 trophy at the Paris Climate Conference (2015). It represents a reliable and economical alternative to counter the harmful risks of floods. This type of spillway is characterized by a particular geometry defined by vertical walls forming rectangular elements in plan, with an overhangs which favors the design of an inclined apron. The apron of the PK-Weir alveoli, can take several configurations depending on the location of the PK-Weir and the intended purpose.

The present work is concerned with the study of the shape of the basement of the downstream cells of PK-Weir type A1 under different configurations. To do this, several forms of riffles have been the subject of experimental studies on physical models with conditions of free flow and without lateral contraction. According to the results obtained, it was concluded that the PK-Weir type A1 represents a geometrical configuration which makes it possible to design the apron of the downstream cells in several forms according to the defined objective without affecting the hydraulic performance.

**KEYWORDS:** Weir, spillway, PK-Weir, alveolus, apron, free flow.

## 1 INTRODUCTION

Le déversoir est un organe intégré à un aménagement hydraulique pour faire passer les crues exceptionnelles en toute sécurité, il est utilisé aussi pour la mesure ou le contrôle de débit et de la profondeur d'eau. Etant donné que la capacité d'évacuation de déversoir est directement proportionnelle à la longueur de la crête, plusieurs types de déversoirs ont été développés dans le but d'augmenter la longueur du seuil déversant pour une largeur donnée.



Figure 01: Déversoir en labyrinthe du barrage de Song Mong (Vietnam) et le déversoir en touches de piano du barrage Malarce(France)

Le déversoir en labyrinthe, se caractérisent par des murs verticaux construits en disposition trapézoïdale ou triangulaire en plan sur un radier horizontal. Le plus souvent, la longueur totale des murs est de quatre fois ou plus la largeur du déversoir, la profondeur maximale de la lame déversante est d'environ la moitié de la hauteur des murs et le débit est de deux ou trois fois le débit d'un déversoir Creager. La recherche d'une forme optimale de déversoir en labyrinthe qui possède un rendement élevé et un coût relativement faible, a conduit à la conception du Déversoir en Touches de Piano (PK-Weir).

Ce dernier représente une alternative efficace pour la plupart des nouveaux barrages et peut augmenter à faible coût la capacité d'évacuation et/ou le stockage de plusieurs barrages existants. Cette nouvelle forme de déversoir non rectiligne qui a été développée par François Lempérière et Ahmed Ouamane a fait l'objet d'une investigation détaillée sur modèles réduits physiques par plusieurs laboratoires à travers le monde (Université de Biskra, Université de Liège, Utah State University, RoorkeUniversity, EPFL Lausanne, EPL Lisbonne, etc...).

L'utilisation de PK-Weir comme une solution pour la réhabilitation des barrages a commencé en France, pour les barrages gérés par EDF (Leite Ribeiro et al, 2013). Plus d'une dizaine de PK-Weir ont été construits sur des barrages, tels que : Goulours, St-Marc, Gloriettes, Etroit, Gage II, Raviège et le barrage Malarce et autres. En outre, les PK-Weirs supplémentaires ont été testés sur modèle physique et réalisés avec de nouvelles techniques de

Une alternative aux déversoirs libres standards, qui a connu un développement important ces dernières décennies, correspond aux déversoirs non rectilignes. Le but principal de la configuration non rectiligne est d'augmenter la longueur de déversement tout en limitant l'emprise de l'ouvrage. Les deux principaux déversoirs non rectiligne sont la configuration labyrinthe et le déversoir en touches de piano, souvent appelés PK-Weir (Piano Key Weir)(Fig.01).

construction. Dans les projets d'EDF, le débit maximal sur le PK-Weir est  $Q = 525 \text{ m}^3/\text{s}$  est celui du barrage Malarce, ce qui correspond à un débit spécifique  $q = Q / W = 12,3 \text{ m}^2/\text{s}$ . Plus récemment, plusieurs PK-Weir ont été construit ou planifiés dans d'autres pays, comme le Vietnam, l'Algérie, le Burkina Faso, l'Inde, la Suisse, l'Afrique de Sud, le Royaume Uni etc... Pour certains cas, le débit dépasse  $Q = 1\,000 \text{ m}^3 / \text{s}$  et peut atteindre  $8700 \text{ m}^3 / \text{s}$  pour le barrage Van Phong.

## 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE SUR LE PK-WEIR

La principale caractéristique hydraulique du déversoir en touches de piano correspond au débit qui peut être évalué par le biais des paramètres suivants: La largeur total du déversoir ( $W_t$ ), les hauteurs amont et aval du déversoir ( $P_o$  et  $P_i$ ), les largeurs des alvéoles amont et aval ( $W_i$  et  $W_o$ ), la largeur de cycle ( $W_u$ ), la longueur des porte-à-faux amont et aval ( $B_i$  et  $B_o$ ), la longueur de la base ( $B_b$ ), la longueur de la paroi latérale ( $B = B_i + B_o + B_b$ ), les Pentes des alvéoles amont et aval ( $S_i$  et  $S_o$ ), l'épaisseur de la crête ( $t$ ), le nombre de cycle ( $n$ ), la longueur totale du PK-Weir ( $L = nB + n(W_i + W_o)$

(Fig.02) et de la charge sur le seuil ( $H$ ). Tous ces paramètres dérivent directement de la géométrie du PK-Weir et de la charge d'exploitation.

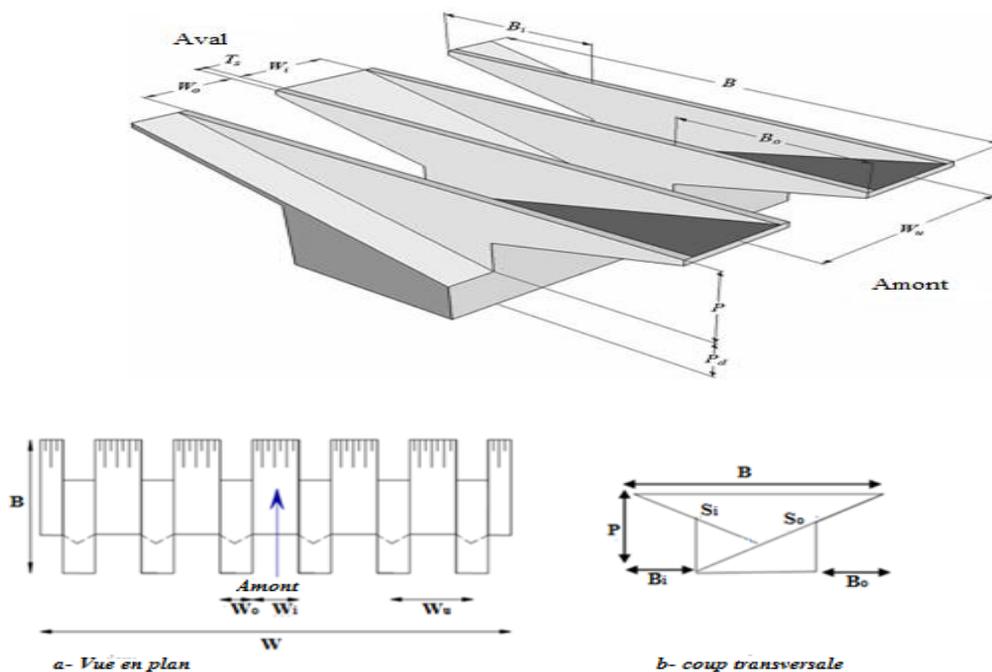


Figure 02: Schéma et représentation 3D du déversoir PK-Weir type A

La première étude détaillée sur l'effet des différents paramètres adimensionnelle ( $L/W_t$ ,  $W_u/P$ ,  $W_i/W_o$ ,  $B_o/B_i$ ,  $H/P$ ) sur la capacité d'évacuation de PK-Weir a été réalisée par Ouamane et al (2003, 2006), qui ont montré que le rendement ou le coefficient de débit de PK-Weir est en fonction de la charge hydraulique  $H$  et des paramètres géométriques normalisés.

$$C_w = f\left(\frac{L}{W_t}, \frac{W_u}{P}, \frac{W_i}{W_o}, \frac{B_o}{B_i}, \frac{H}{P}\right)$$

Les études paramétriques qui ont été réalisées pour caractériser l'influence des paramètres géométriques principales, ont montré que l'augmentation de largeur d'alvéole amont et la réduction de largeur d'alvéole aval  $W_i/W_o > 1$  fait augmenter la capacité d'évacuation (Ouamane et al 2006, Le Doucen et al. 2009, Machiels et al. 2010, Anderson 2011). La conception du PK-Weir avec des porte-à-faux plus long en amont  $B_o/B_i > 1$  donne un rendement supérieur par rapport au PK-Weir avec des porte-à-faux plus long en aval  $B_o/B_i < 1$  (Ouamane et al 2006, Anderson 2011) et l'augmentation de longueur et la hauteur de PK-Weir augmente la capacité d'évacuation de manière significative (Ouamane et al 2006, Le Doucen et al. 2009, Machiels et al. 2011).

Le rendement du PK-Weir peut être aussi affecté par les paramètres d'importance secondaire et les conditions d'approche comme la forme d'entrée, la pente du radier, la longueur des parois latérales, la configuration géométrique de la sortie en aval et la forme géométrique de la partie

supérieure des alvéoles. L'influence de la forme du radier sur le rendement du PK-Weir n'a fait l'objet que de quelques études. Ainsi, le présent travail se propose d'étudier l'influence de la forme du radier des alvéoles aval sur la performance du PK-Weir dans des conditions d'écoulement libre et sans contraction latérale. Ainsi, le radier aval peut être horizontal ou incliné, ou partiellement incliné ou en marche d'escaliers.

### 3 PROGRAMME EXPÉRIMENTALE

L'écoulement sur le PK-Weir est très sensible à la forme du radier des alvéoles amont et aval, souvent le radier de ce type de déversoir est incliné le long des alvéoles, cependant, quelques modifications de la forme du radier des alvéoles aval peuvent avoir un effet sur la performance du PK-Weir. Le moyen le plus direct pour vérifier ceci est de procéder à une investigation expérimentale sur des modèles réduits. Ainsi, six modèles ont été testés dont un modèle de base de PK-Weir de type A1, considéré comme modèle de référence.

Depuis son innovation en 2003, quelques formes de PK-Weir ont été développées par A. Ouamane et F. Lempérière (2010), parmi lesquelles le PK-Weir de type A1 qui a été considéré dans ce travail comme le modèle de référence. Ce dernier, se caractérise par des parois frontales inclinées du sommet jusqu'à la base formant ainsi une structure en porte-à-faux. Cette configuration peut être considérée comme une forme améliorée du déversoir en labyrinthe (Bensaid et al. 2018).

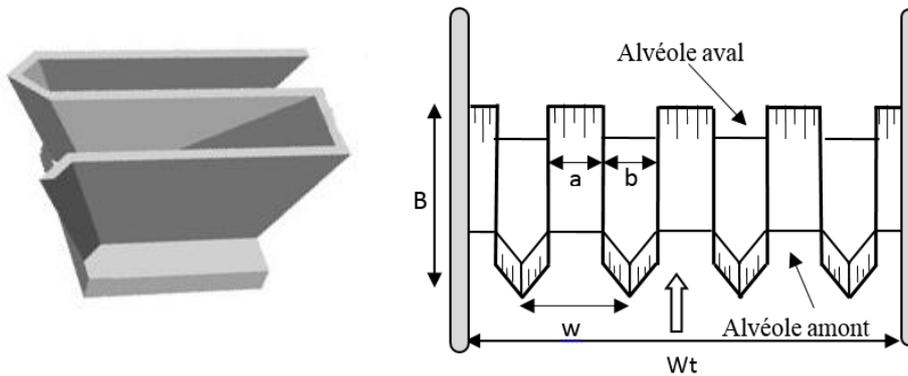


Figure 03: Déversoir en Touches de Piano de type A1 (Forme améliorée du déversoir en labyrinthe) (Bensaid et Ouamane, 2018)

Les caractéristiques géométriques de ces modèles sont mentionnées dans le tableau suivant.

Tableau 01: Caractéristiques géométriques des modèles

Modèle	Wi/Wo	Bo/Bi	Wu/P	L/Wt	Modèles testés
A <sub>1</sub>	1.2	1	1.1	4	Modèle de référence, avec radier aval incliné
A <sub>1,2</sub>	1.2	1	1.1	4	Modèle avec radier aval horizontal
A <sub>1,3</sub>	1.2	1	1.1	4	Modèle avec radier des alvéoles aval incliné en deux pentes différentes
A <sub>1,4</sub>	1.2	1	1.1	4	Modèle avec radier en partie incliné et en partie horizontal
A <sub>1,5</sub>	1.2	1	1.1	4	Modèle avec radier incliné et marche d'escalier
A <sub>1,6</sub>	1.2	1	1.1	4	Modèle avec marche d'escalier de la base jusqu'au sommet des alvéoles aval

Les essais expérimentaux ont été réalisés dans un canal de largeur constante égale à la largeur de l'emprise des modèles testés, c'est à dire dans des conditions sans contraction latérale. Ce canal de 1 m de largeur, 13m de longueur et 0.75m de hauteur est équipé par des parois latérales en verre dans la partie correspondante à l'insertion des modèles, ce qui permet la visualisation de l'écoulement qui transite sur le modèle. Le modèle expérimental est alimenté par deux pompes qui débitent 170 l/s. Les débits sont mesurés par deux débitmètres l'un à ultrason et l'autre électromagnétique, les profondeurs d'eau sont mesurées par une série d'indicateur de niveau à radar. Le système fonctionne en circuit fermé.(Fig.3).



Figure 04: Vue de canal d'expérimentation

#### 4 RÉSULTAT ET DISCUSSIONS

L'analyse et l'interprétation des résultats obtenus sur les différents modèles expérimentés nécessitent l'utilisation de quelques relations mathématiques qui régissent l'écoulement sur le PK-Weir.

Les deux paramètres de l'écoulement qui reflètent la débitance d'un déversoir sont le débit de transit (Q) et la charge totale sur le seuil (H), cette dernière correspond à la somme de la charge piézométrique et la charge cinétique. Le débit et la charge piézométrique sont déterminés par mesure directe à l'aide de l'appareillage de mesure disponible et la charge cinétique peut être déduite du débit et de la section de l'écoulement en amont.

$$\frac{v^2}{2g} = \frac{Q^2}{2gb^2(P + H)^2} \tag{1}$$

La charge totale sera donc :

$$H = h + \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

Avec :

V : Vitesse moyenne de l'écoulement à la section de mesure (m<sup>2</sup>/s)

Q : Débit mesuré (m<sup>3</sup>/s)

P : Hauteur du déversoir (m)

b: Largeur du canal au niveau de la section d'essai (m)

h : Charge piézométrique mesurée à partir du seuil (m);

H : Charge totale sur le seuil du déversoir (m) ;

g : Accélération de la pesanteur m/s-2

La débitance peut être exprimée par le coefficient de débit qui est extrait de la relation de (Poleni)

$$Q = C_w W_t H \sqrt{2gH} \quad (3)$$

$$C_w = \frac{Q}{W_t \sqrt{2gH^{\frac{3}{2}}}} \quad (4)$$

Ou :

- C<sub>w</sub> : Coefficient de débit du déversoir testé ;

- W<sub>t</sub> : Largeur totale du déversoir (m) ;

Le rendement du PK-Weir peut être aussi exprimé par la performance hydraulique qui est définie par le rapport entre les coefficients de débit du PK-Weir et celui du déversoir standard.

$$q^* = \frac{C_w}{\mu} \quad (5)$$

- q\* : Performance hydraulique

- μ : Coefficient de débit d'un déversoir standard

#### 4.1 Performance Hydraulique du PK-Weir de Type A1 (Modèle de référence)

La performance hydraulique était souvent l'un des critères

d'évaluation du rendement d'un déversoir par rapport au déversoir standard. Elle exprime la grandeur de l'accroissement de débit par rapport à celui du déversoir standard.

Le PK-Weir de type A1 représente une forme en plan favorable pour l'accroissement de débit d'une manière significative pour des charges sur le déversoir relativement modérées. Les essais effectués sur le modèle de référence (A1) ont montré que la performance hydraulique atteint des valeurs de l'ordre de quatre (q\*≈4) pour les faibles charges relatives et des valeurs autour de trois (q\* ≈ 3) pour les charges modérées. Autrement dit, le débit évacué par le modèle de PK-Weir type A1 est de quatre fois le débit d'un déversoir standard pour les faibles charges et d'environ trois fois pour les charges modérées. Pour les grandes charges, il est de l'ordre de 2,5 fois le débit d'un déversoir standard (Fig.05).

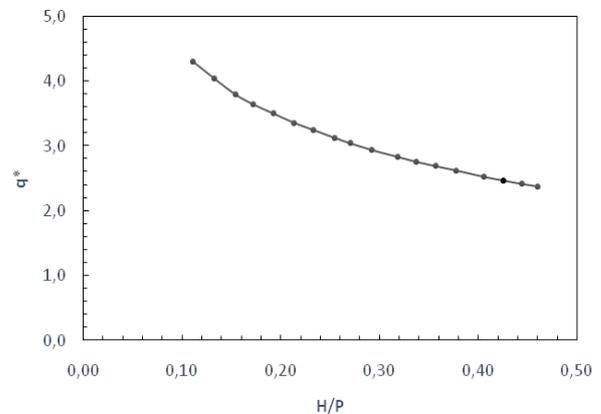


Figure 05: Courbe de la performance du modèle de référence du PK-Weir type A1

Ceci montre l'intérêt de la forme du PK-Weir de type A1 qui est au fait une configuration améliorée du déversoir en labyrinthe et qui peut être considérée comme une forme intermédiaire entre le déversoir en labyrinthe et le PK-Weir. La différence principale entre le déversoir en labyrinthe et le PK-Weir se rapporte aux porte-à-faux et à la forme du radier des alvéoles qui est horizontal pour le labyrinthe et incliné pour le PK-Weir.

La forme du PK-Weir de type A1 a l'avantage de permettre la réalisation du radier des alvéoles aval sous plusieurs formes (horizontal, incliné, partiellement en marche d'escalier ou en marche d'escalier sur toute la longueur de l'alvéole aval).

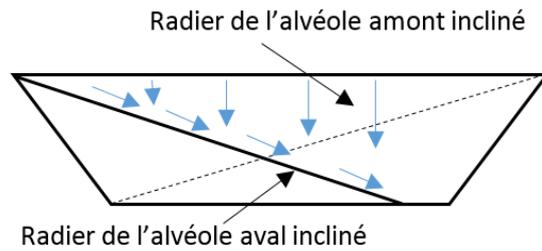


Figure 06: Modèle de référence (A1) et coupe transversale d'alvéole avec radier des alvéoles aval incliné de la base jusqu'au sommet

#### 4.2 Effet de la forme du radier des alvéoles aval sur la performance

Alvéoles aval avec radier horizontal : L'une des formes que peut prendre le radier des alvéoles aval du PK-Weir de type A1 est la forme horizontale. Cette forme de radier permet d'avoir une hauteur de chute uniforme le long de l'alvéole aval. Toutefois, l'écoulement le long de l'alvéole aval se caractérise par une perturbation qui engendre de faibles vitesses d'écoulement et par conséquent un écoulement retardé vers l'aval.

Effectivement, les essais réalisés sur un modèle avec radier des alvéoles horizontal (A1.2), (Fig. 07) ont fait constaté

que l'écoulement dans l'alvéole aval se distingue par une lame d'eau qui tombe librement le long des parois latérales jusqu'au fond de l'alvéole aval ou un écoulement perturbé est généré retardant ainsi l'écoulement vers l'aval du déversoir. Cependant, les essais réalisés sur le modèle de référence (A1) avec radier des alvéoles aval incliné ont fait remarqué que l'eau s'écoule librement avec une vitesse importante le long du radier incliné de l'alvéole aval, formant ainsi une lame d'eau parallèle au radier incliné de l'alvéole, ceci est remarqué essentiellement pour les faibles et moyennes charges. Quand la charge sur le déversoir augmente, le volume d'eau dans l'alvéole aval augmente aussi créant ainsi une faible perturbation à la sortie de l'alvéole

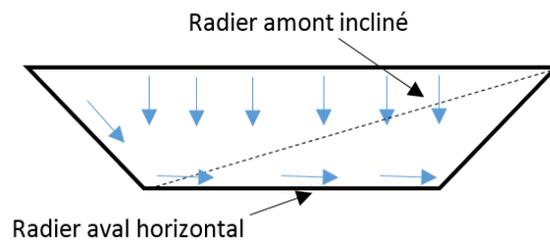


Figure -07: Modèle de PK-Weir(A1.2) et coupe transversale d'alvéole avec radier horizontal des alvéoles aval

La représentation graphique des résultats obtenus sur les modèles A1 et A1.2(Fig. 08 et 09) montre l'effet de forme de radier aval sur le coefficient de débit et par conséquent sur la performance du PK-Weir de type A1. Ainsi, les courbes obtenues font remarquer que le modèle avec radier des alvéoles aval incliné (modèle de référence) se caractérise par un rendement plus grand que le modèle avec radier des alvéoles aval horizontal. La différence est de l'ordre de 5 %. Ceci indique que la disposition inclinée du radier des alvéoles aval est plus justifiée.

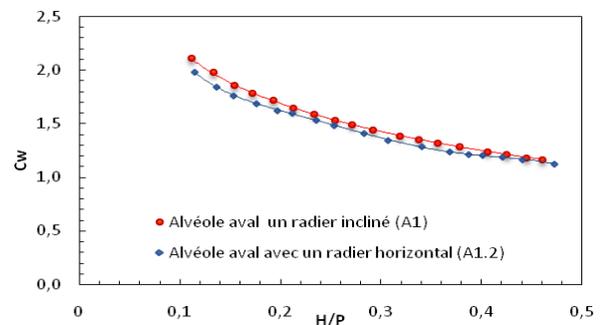


Figure 08: Coefficient de débit en fonction de l'inclinaison du radier aval

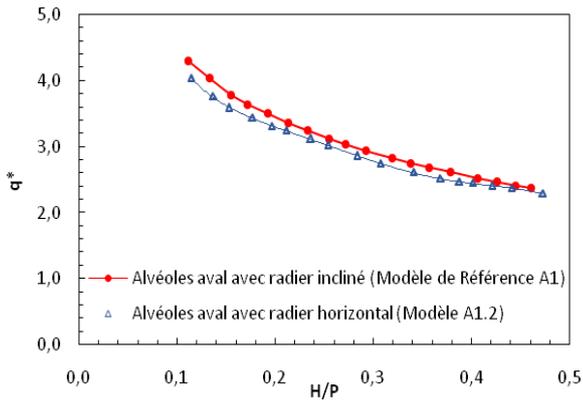


Figure 09: Performance Hydraulique en fonction de l'inclinaison du radier aval

Alvéoles aval avec radier constitué de deux pentes : Etant donné que l'inclinaison du radier des alvéoles aval a été jugée être plus efficace que la forme horizontale, il est intéressant de vérifier d'autres alternatives de radier incliné. A cet effet, un deuxième type d'essai a été réalisé sur deux modèles avec une configuration de radier des alvéoles aval inclinée. Le premier (A1.3) avec un radier des alvéoles aval caractérisé par deux pentes différentes (la première pente  $So_1 = 0,5$ , la deuxième pente  $So_2 = 0,6$ ) (figure -10). Le second modèle (A1.4) avec un radier scindé en deux parties, en amont, le radier est incliné ( $So_1 = 0,5$ ) et pour la partie aval de l'alvéole, le radier est horizontale (Fig. 11).



Figure 10: Modèle de PK-Weir (A1,3) et coupe transversale de l'alvéole aval avec radier incliné en deux pente différentes



Figure 11: Modèle de PK-Weir (A1.4) et coupe transversale de l'alvéole aval avec radier incliné dans la partie amont et horizontal à l'aval

L'observation de l'écoulement pendant l'expérimentation des deux modèles (A1.3 et A1.4) a fait apparaître que la vitesse d'écoulement est plus exprimée par rapport à celle du modèle de référence. Ceci peut être le résultat du phénomène de cavitation au niveau de la partie aval de l'alvéole qui est générée par le changement de pente. Ce changement de pente implique un décollement de la nappe inférieure, provoquant ainsi une formation d'une poche d'air instable ce qui favorise l'accroissement du débit évacué. Cependant, l'instabilité de l'écoulement peut créer des vibrations de la structure qui peut être détériorée. Ceci peut être vérifié par des travaux complémentaires.

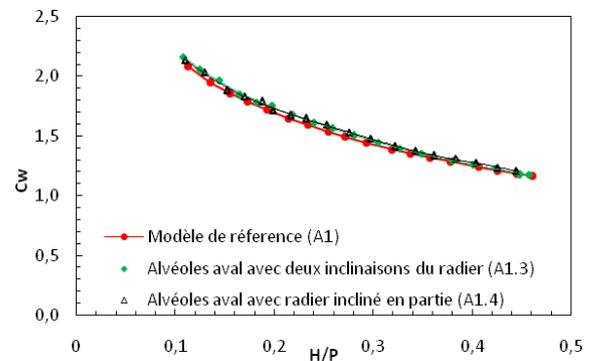


Figure 12: Coefficient du débit en fonction de la forme d'inclinaison du radier des alvéoles aval

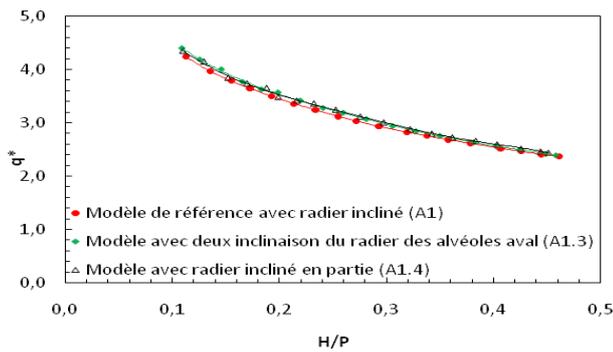


Figure 13: Performance hydraulique en fonction de la forme d'inclinaison de radier des alvéoles aval

Les résultats expérimentaux montrent que les deux modèles avec deux pentes différentes (Modèle A1.3 et A1.4) donnent des valeurs de coefficient de débit et de la performance supérieures à ceux du modèle de référence d'environ 2,5%. Ce faible accroissement de la performance peut être

expliqué par le fait de cavitation comme a été expliqué précédemment.

Alvéoles aval avec radier en marches d'escalier : La tendance actuelle de conception des évacuateurs de crues s'oriente vers la réalisation du parement aval du déversoir ou le coursier en marches d'escalier. Ceci favorise la dissipation d'énergie et par conséquent réduit le coût des ouvrages de dissipation. Il est possible de concevoir le PK-Weir de type A1 avec un radier des alvéoles aval en marches d'escalier ce qui contribue à la dissipation d'une partie de l'énergie. Pour vérifier la faisabilité de cette conception, deux modèles de PK-Weir de type A1 ont été conçus avec un radier aval en marches d'escalier. Le premier (A1.5) avec la partie amont de l'alvéole aval inclinée ( $S_o = 0.5$ ) et la partie aval en marches d'escalier (Fig.14). Le second modèle (A1.6) avec un radier en marches d'escalier sur toute la longueur de l'alvéole aval (Fig.15).

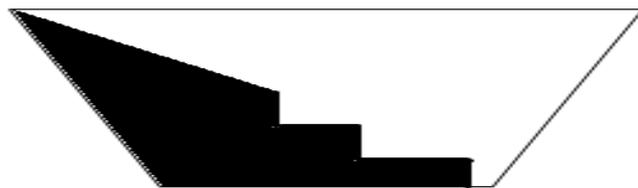


Figure 14: Modèle de PK-Weir (A1.5) et coupe transversale de l'alvéole aval avec radier partiellement incliné et en marches d'escalier



Figure 15: Modèle de PK-Weir A1.6 et coupe transversale de l'alvéole aval avec radier en marches d'escalier

Pendant les essais sur ces deux modèles, il a été remarqué que l'écoulement le long de la partie centrale de l'alvéole aval est semblable à celui d'une série de cascades, tandis que sur les côtés l'écoulement est perturbé. Ceci est remarqué pour les faibles débits. Quand le débit devient significatif, toute la section de l'écoulement devient perturbé et peut engendrer ainsi des pertes de charge significatives. Des essais complémentaires sont recommandés pour quantifier le taux de dissipation d'énergie.

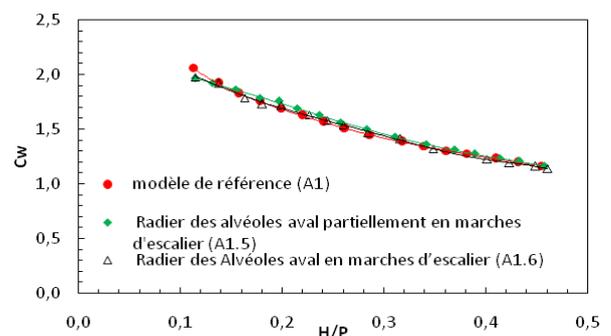


Figure 16: Coefficient du débit en fonction de la forme d'inclinaison avec marche d'escalier

Les figures (16) et (17) qui représentent respectivement le coefficient de débit et la performance en fonction de la charge relative montre une comparaison entre les deux modèles avec marches d'escalier (A1.5, A1.6) et le modèle de référence A1. Cette comparaison fait apparaître que les deux modèles avec marches d'escalier donne presque la même performance pour toute la gamme de la charge relative  $H^*/P$ . Par contre, la comparaison avec le modèle de référence montre que la conception du radier en marches d'escalier réduit la performance d'environ 3%. Cette différence peut être considéré comme négligeable et la conception du radier aval en marches d'escaliers peut être une solution adéquate pour les PK-Weir construit au fil de l'eau.

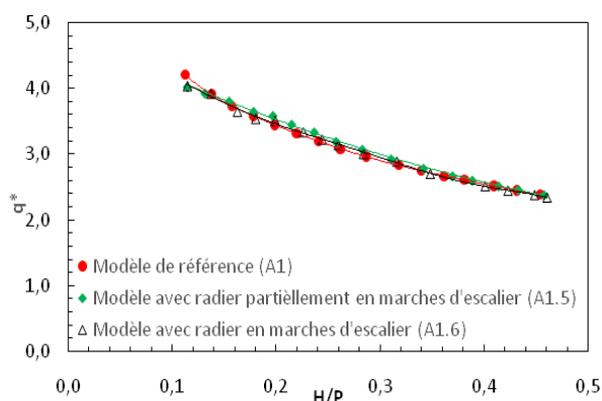


Figure 17: Performance hydraulique en fonction de la forme d'inclinaison avec marche d'escalier

## 5 CONCLUSION

Bien que le déversoir en touches de piano (PK-Weir) a fait l'objet d'un grand nombre d'études essentiellement expérimentales, quelques points d'ombre restent à éclaircir tels que la forme du radier des alvéoles de sortie, la forme d'entrée en amont du déversoir la forme de la crête etc...

La configuration géométrique de base du PK-Weir est définie par un radier aval incliné, ce qui favorise un écoulement rapide et stable le long de l'alvéole aval. Cette forme inclinée du radier aval est dictée par la présence de porte-à-faux en amont et en aval.

La géométrie du PK-Weir de type A1 qui est considéré comme une forme améliorée du déversoir en labyrinthe permet la conception du radier aval sous plusieurs formes. Le choix de la forme dépend donc de l'objectif défini ou des conditions locales du site.

Le présent travail s'est intéressé à l'étude de l'impact de la forme du radier des alvéoles aval du PK-Weir type A1 sur la performance hydraulique. La forme du radier du PK-Weir de type A1 (radier incliné) a été considérée comme modèle de référence, ainsi, les résultats obtenus, ont fait remarquer que la conception du radier des alvéoles aval incliné permet d'avoir un rendement plus grand que celui d'un PK-Weir avec un radier aval horizontal. Ceci peut être expliqué par le type d'écoulement généré pour les deux types de radier,

stable pour le premier et perturbé pour le second.

Le radier des alvéoles aval peut avoir une inclinaison unique ou composé de plusieurs parties avec des inclinaisons différentes. Lors de cette étude, trois cas de pente ont été considérés, les résultats obtenus ont fait constaté que les modèles avec des pentes variables possède une performance hydraulique légèrement supérieure à celle du modèle de référence avec radier en pente unique. Cependant cette faible amélioration de la performance peut être le résultat d'une cavitation à cause de décollement de la nappe inférieure à partir du point de changement de la pente.

La conception du radier des alvéoles aval en marche d'escalier peut être une solution qui permet la dissipation d'une fraction de l'énergie générée par la chute d'eau du sommet du déversoir. Dans ce sens, deux conceptions de marches d'escalier ont été étudiés. La comparaison des résultats obtenus sur ces deux modèles avec le modèle de référence montre que le radier en marches d'escalier réduit la performance d'environ 3%. Cette différence peut être considéré comme négligeable et la conception du radier aval en marches d'escaliers peut être une solution adéquate pour les PK-Weir construit au fil de l'eau.

Suite à ces résultats, il est plus avantageux de concevoir le radier des alvéoles aval incliné et de choisir le radier en marches d'escalier pour le cas d'une faible chute.

## REFERENCES

- [1] Anderson, R.M. & Tullis, B. (2011). "Influence of Piano Key Weir geometry on discharge", Intl Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs PKW 2011, CRC Press London, 75-80.
- [2] Erpicum, S., Machiels, O., Archambeau, P., Dewals, B. & Piroton M. 2011, "Energy dissipation on a stepped spillway downstream of a Piano Key Weir", Intl Workshop on Labyrinth and piano key weirs-PKW 2011, London: CRC Press, 105-111.
- [3] Lempérière, F. & Ouamane, A. 2003. "The Piano Keys Weir: a new cost-effective solution for spillways", The International Journal on Hydropower & Dams, Issue Four.
- [4] Lempérière, F., Vigny, J. P. & Ouamane, A. 2011. "General comments on Labyrinths and Piano Key Weirs: The past and present", Intl Workshop on Labyrinth and piano key weirs- PKW 2011, CRC press, London, 17-24.
- [5] Leite Ribeiro, M., Bieri, M., Boillat, J. L., Schleiss, A.J., Singhal, G. & Sharma, N. (2012). "Discharge capacity of Piano Key Weirs", J. Hydraulic Eng. 138(2), 199-203
- [6] Machiels, O., Piroton, M., Archambeau, P., Dewals, B. & Erpicum, S. 2013. "Experimental parametric study and design of Piano Key weirs", Journal of Hydraulic Research.
- [7] Le Doucen, O., Leite Ribeiro, M., Boillat, J.L., Schleiss, A.J. & Laugier, F. (2009). "Etude paramétrique de la capacité des PK-Weirs", Modèles

- physiques hydrauliques – outils indispensables du XXI<sup>e</sup> siècle. SHF, Lyon F.
- [8] Ouamane, A. & Lempérière, F., 2006. “Design of a new economic shape of weir”, International Symposium on Dams in the Societies of the XXI Century. Barcelona
- [9] Ouamane, A. 2011. “Nine years of study of the Piano Key Weir in the university laboratory of Biskra “lessons and reflections”, Intl Workshop on Labyrinth and piano key weirs PKW 2011, CRC press, London, 51-58.
- [10] Ouamane, A. 2013. “Improvement of labyrinth weirs Shape”, Intl Workshop on Labyrinth and piano key weirs -PKW 2013, CRC press, London, 15-22.
- [11] Ouamane, A. & Lempérière, F., 2010. “Study of various alternatives of shape of piano keys weir” Hydro 2010 Conference, Lisboa, Portugal.