

Nouvelles solutions économiques permettant l'accroissement de la capacité des retenues et la sécurité des barrages existants

Ahmed OUAMANE ¹ & François LEMPERIERE ²

(1) Laboratoire Aménagements Hydrauliques et Environnement / Université Mohamed Khider (Biskra)

(2) Hydrocoop-France

Email : ouamane@yahoo.fr

Hydrocoop.fr@free.fr

Résumé :

Les barrages réservoirs sont conçus pour stocker un volume d'eau limité tout en assurant le passage des crues extrêmes prévues. Cependant, l'expérience acquise dans le domaine de la gestion des barrages a montré d'une part que la plupart des barrages ont été affectés par un envasement précoce de leurs retenues et d'autre part que la capacité des évacuateurs de crues d'un grand nombre de barrages est insuffisante. Ces deux problèmes engendrent simultanément une réduction de la capacité de stockage et affecte la sécurité du barrage.

Il est possible de trouver des alternatives qui permettent de compenser la capacité de stockage perdue et d'augmenter le degré de sécurité des barrages existants.

L'une des solutions possible correspond à la réhabilitation de l'évacuateur de crues en faisant surélever le seuil du déversoir et allonger la longueur de sa crête tout en maintenant le même niveau maximum de la retenue. Ces deux modifications du déversoir permettent d'augmenter le stockage de la retenue et d'accroître le débit évacué par le déversoir existant.

Des études et essais sur modèles réduits ont été engagés depuis six ans pour définir une forme de déversoir qui peut être réalisable sur des structures existantes et peut augmenter la capacité des évacuateurs existants à moindre coût. Par conséquent, les résultats obtenus ont donné une nouvelle base de conception des déversoirs en labyrinthe et la conception d'une nouvelle forme de déversoir non rectiligne (Piano Key Weirs).

1 Introduction

Malgré les efforts déployés dans le domaine de la lutte contre l'envasement des retenues des barrages la capacité de stockage continue à diminuer d'une année à l'autre. La collecte des données d'observation hydrologiques et le développement de nouvelles méthodes d'estimation des crues ont montré que la plupart des évacuateurs de crues ne permettent pas le passage de la crue extrême en toute sécurité.

La réduction de la capacité de stockage et l'insuffisance de la capacité d'évacuation des crues représentent deux problèmes fondamentaux auxquels sont exposés les barrages en exploitation.

Il est possible de remédier à ces problèmes en procédant au remodelage de la plupart des évacuateurs de crues des barrages existants. Le principe consiste à faire surélever le seuil du déversoir existant d'une hauteur d'environ la moitié de la charge maximale sur le seuil existant, par conséquent, l'espace de stockage supplémentaire augmente d'une manière significative (de 20 à 100% selon le cas). Il est évident que la capacité du déversoir diminue avec la réduction de la charge, ceci peut être évité en choisissant une forme de crête non rectiligne qui permet d'avoir une longueur de crête plus longue que la largeur du déversoir existant. Cette disposition permet de doubler et même tripler le débit évacué par le déversoir en le comparant à un déversoir standard de type Creager de même largeur et sous la même charge.

La configuration de déversoir la plus connue qui peut assurer le passage d'un grand débit sous une faible charge correspond au déversoir en labyrinthe. Ce dernier a fait l'objet d'application au barrage Ute aux USA pour augmenter la capacité de stockage. Ce barrage était équipé d'un déversoir rectiligne de type Creager qui a été remplacé par un déversoir en labyrinthe (Hinchliff et al. 1984).

Le déversoir en labyrinthe peut être une solution pour la réhabilitation des barrages en terre puisque l'évacuateur de crues est indépendant de la digue (Souvent implanté dans un canal latéral). Cependant, ce type de déversoir ne peut pas être une solution pour les barrages en béton à cause de ses murs latéraux qui sont plus longs que la largeur de la section transversale au sommet de ces barrages.

Des études et essais sur modèles réduits ont été engagés depuis l'année 2002 au Laboratoire Aménagements Hydrauliques et Environnement à l'Université de Biskra en collaboration avec Hydrocoop-France dans le but de définir une forme économique de déversoir non rectiligne qui peut être utilisé pour accroître à la fois la capacité de stockage et la capacité de l'évacuation des crues des barrages existants et nouveaux (Ouamane et al. 2006).

Ces études ont abouti d'une part à la conception d'un nouveau type de déversoir non rectiligne baptisé déversoir en touches de piano (P.K.Weir) et d'autre part à l'amélioration de la forme du déversoir en labyrinthe pour qu'il puisse être appliqué aux barrages en béton.

2 Déversoir en touches de piano (PKWeir)

Le déversoir en touches de piano ou PKWeir peut être utilisé pour les nouveaux barrages ou pour les barrages existants qui nécessitent une augmentation de la capacité du déversoir et/ou la capacité de stockage. Il peut être placé sur des sections réduites de barrages poids existants ou nouveaux, permet l'évacuation des débits spécifiques jusqu'à $100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ et multiplie au moins par trois le débit d'un déversoir Creager (Lemprière et al. 2003).

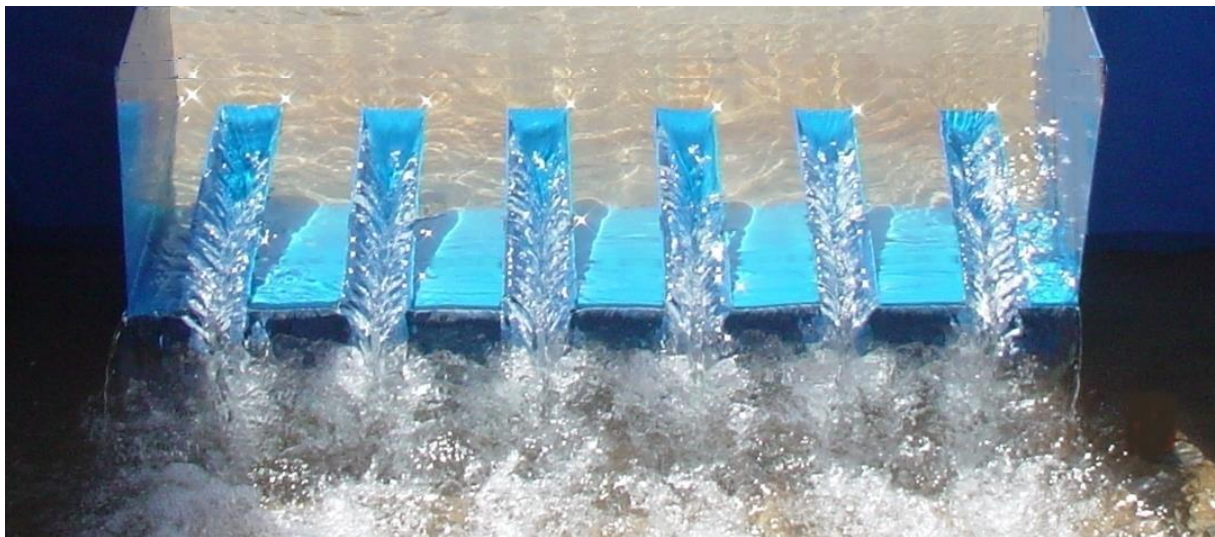


Fig.1 Déversoir en touches de piano (P.K.Weir)

Des essais préliminaires effectués sur des modèles réduits physiques ont permis de définir la configuration géométrique du P.K.Weir qui est basée sur :

- Une disposition rectangulaire en plan.
- Un radier incliné des alvéoles amont et aval.
- Une base de longueur réduite grâce à l'utilisation des porte-à-faux.
- Une largeur réduite des éléments de forme rectangulaire.

Ainsi, deux types de PKWeir ont été sélectionnés, le premier avec des porte-à-faux en amont et en aval (Type A) et le second avec des porte-à-faux en amont (Type B) (fig.02 et fig.03)

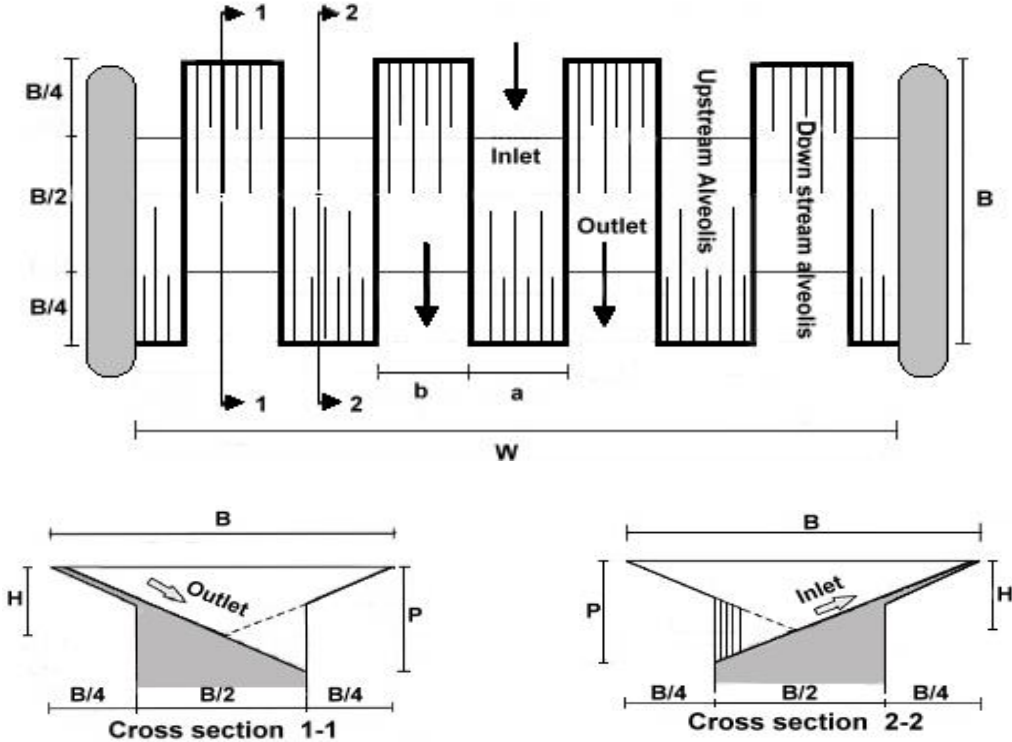


Fig.2 Déversoir en touches de piano type A

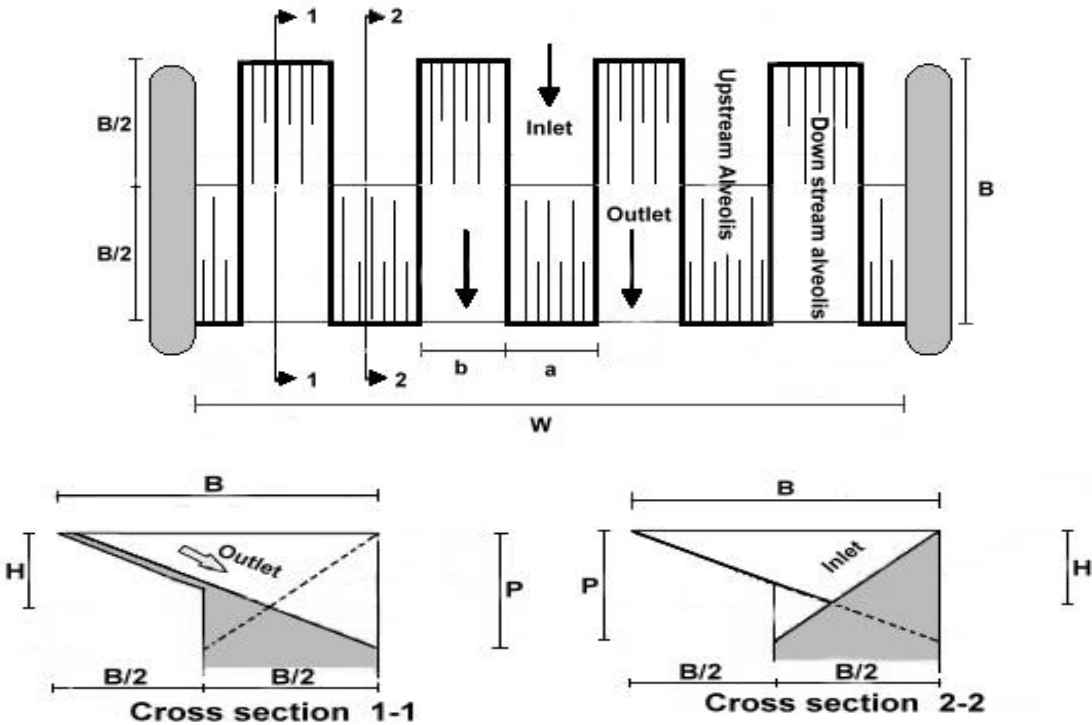


Fig.3 Déversoir en touches de piano type B

Ce nouveau type de déversoir (PKWeir) multiplie le débit d'un déversoir Creager par 3,5 ou 4 pour $h^* = 0,3 H$ et par deux pour $h^* = H$. Le gain en profondeur de réservoir (ou en hauteur du barrage) est proche de $0,5 H$ et le gain de débit spécifique est proche de $2 H^{1,5}$ (Ouamane et al. 2007).

h^* désigne la charge totale sur le PKWeir et H la hauteur maximale des murs latéraux. Le débit spécifique du PKWeir (Type A) peut être estimé par la relation suivante :

$$q = 4H^*\sqrt{H} \quad (01)$$

Le P.K.Weir peut être conçu en éléments préfabriqués en acier pour des débits spécifiques inférieurs à $10 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ et en éléments en béton armé d'épaisseur moyenne ($0,15$ à $0,40 \text{ m}$) selon la hauteur pour des débits spécifiques supérieurs à $10 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (Ouamane 2006).

En pratique, la hauteur des murs pourra être de 1 à 6 m , avec des éléments entièrement préfabriqués jusqu'à 2 m . Le béton armé nécessaire par mètre de largeur de déversoir est de l'ordre de $0,4 H^2$ (en m^3) (H hauteur des éléments en m).

La première application du P.K.Weir a eu lieu au barrage Goulours près de Toulouse (France) et la seconde application est en phase de réalisation au barrage Saint Marc (France).



Fig. 4 Déversoir en touches de piano (P.K.Weir) réalisé en 2006 au Barrage GOULOURS (France)

3. Programme Expérimental.

Le travail expérimental a été conduit dans une station d'expérimentation qui représente un dispositif de simulation de retenue composé d'un canal d'amenée ayant une section $0,95 \times 1,2 \text{ m}$ et de longueur $5,5 \text{ m}$. Ce canal est raccordé à un bassin de simulation de retenue ayant une forme rectangulaire $4,0 \times 4,60 \text{ m}$ et de hauteur $2,0 \text{ m}$. L'entrée amont du bassin de simulation de retenue est équipée d'une grille métallique et d'un mur en briques qui permettent d'assurer un écoulement stable. Une série de prise de pression est placée dans le bassin de simulation à différents endroits permettant de mesurer la pression d'eau dans chaque point. Les modèles de P.K.Weir sont insérés à l'exutoire de bassin de simulation de retenue. Un canal de restitution de longueur $3,0 \text{ m}$ et de largeur $2,0 \text{ m}$ est raccordé à l'exutoire assurant le rôle d'un coursier d'évacuateur de crues.

Les modèles de P.K.Weir ont été construits en tôle métallique d'épaisseur 2 mm qui ont été fixées dans le canal d'essai par un adhésif qui fournit un joint imperméable. L'ensemble des modèles est caractérisé par une forme de crête à paroi mince.



Fig. 5 Dispositif expérimental (Vue de l'aval)

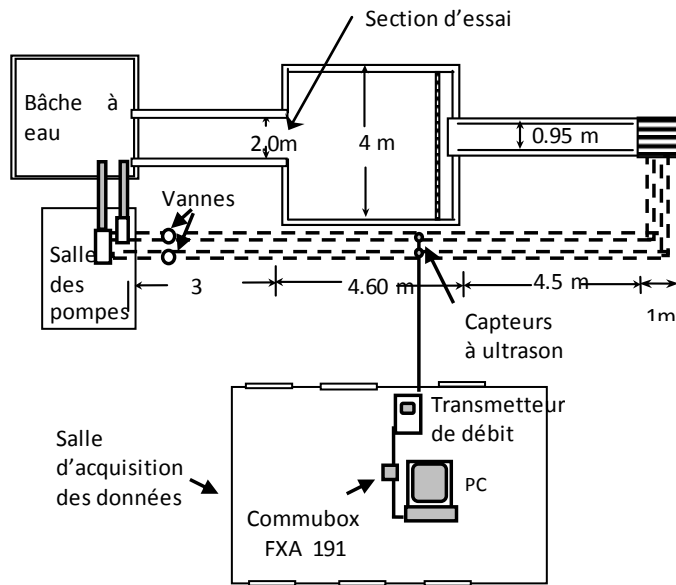


Fig. 6 Schémas de la station expérimentale

4. Présentation des résultats.

Pour vérifier le rendement de ce nouveau déversoir plusieurs essais détaillés sur des formes choisies ont été alors réalisés depuis l'année 2002 au Laboratoire d'Aménagements Hydrauliques et Environnement de l'Université de Biskra.

Les essais effectués sur une trentaine de modèles réduits de P.K.Weir ont donné une base pour optimiser l'accroissement de la capacité d'évacuation du P.K.Weir selon les rapports entre la longueur, la hauteur, la largeur et la forme des éléments, en particulier selon le rapport entre la longueur de la crête du P.K.Weir et sa largeur $N=L/W$.

La capacité d'évacuation d'un déversoir non rectiligne est exprimée généralement par son coefficient de débit qui découle de l'équation universelle qui exprime le débit qui transite par un déversoir :

$$C_w = \frac{Q}{W \sqrt{2gh}^{3/2}} \quad (02)$$

Avec :

C_w : coefficient de débit ;

W : largeur du déversoir (m) ;

Q : débit qui transite par le déversoir (m^3/s)

h : hauteur de la lame déversante (m).

Le coefficient de débit est déterminé en fonction du couple des valeurs mesurées, le débit Q et la hauteur de la lame déversante h , les autres paramètres de l'équation (02) sont constants pour un déversoir donné.

L'analyse dimensionnelle de l'écoulement en fonction des paramètres géométriques a permis d'exprimer le coefficient de débit du P.K.Weir en fonction des paramètres adimensionnels.

$$C_w = f\left(\frac{W}{P}, \frac{L}{W}, \frac{b}{a}, \frac{c}{d}, \frac{h^*}{P}\right) \quad (03)$$

Ou:

h^* :	charge totale sur le seuil du P.K.Weir ;	P :	hauteur totale du P.K.Weir
a :	largeur de l'alvéole amont ;	b :	largeur de l'alvéole aval
c :	longueur du porte-à-faux amont ;	d :	longueur du porte-à-faux aval
W :	largeur du déversoir ;	L :	longueur développée du déversoir

La charge totale correspond à la hauteur piézométrique ajoutée à la charge cinétique.

$$h^* = h + \frac{V^2}{2g} \quad (04)$$

4.1 Mode d'écoulement sur le P.K.Weir

L'écoulement sur le P.K.Weir est tout à fait différent de l'écoulement sur le déversoir en labyrinthe, il se caractérise par deux nappes déversantes, la première sous forme d'un jet du fond qui s'écoule le long du radier incliné de l'alvéole aval et la deuxième sous forme d'un écran plus au moins mince selon la charge sur le déversoir. La deuxième nappe qui est superficielle favorise l'aération du déversoir à cause de la présence des porte-à-faux (Fig.7).



Fig. 7 Ecoulement en deux nappes déversantes sur un cycle de P.K.Weir

4.2 Rapport d'aspect vertical, W/P

Le rapport d'aspect vertical qui représente la géométrie verticale peut avoir deux indications, la première reflète l'effet de la variation de la hauteur pour une largeur de cycle fixe et la seconde indique l'influence de la variation de la largeur pour une hauteur du déversoir fixe. Les résultats des essais obtenus sur trois modèles de P.K.Weir de même largeur de cycle et de hauteur différente indiquent que le coefficient de débit du P.K.Weir est dépendant du paramètre W/P . Autrement dit, la capacité d'évacuation est dépendante de la hauteur du P.K.Weir. L'accroissement de la hauteur de 25% fait augmenter la capacité d'évacuation d'environ 6% (Fig.8).

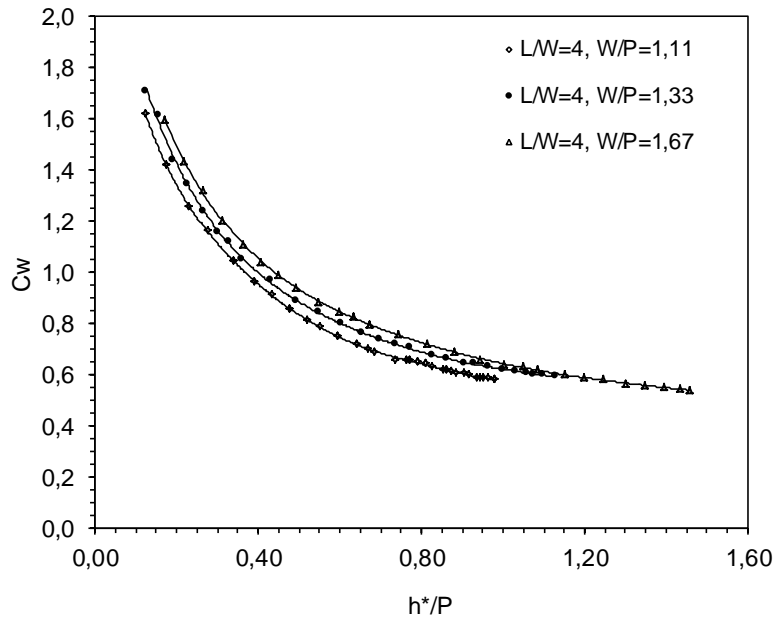


Fig. 8 Coefficient de débit en fonction du rapport de l'aspect vertical W/P

4.3 Longueur relative, L/W

Généralement, le ratio L/W qui exprime le rapport entre la longueur totale de la crête et la largeur du déversoir influe remarquablement sur l'écoulement.

La figure-9- montre que l'augmentation dans l'accroissement de la longueur du P.K.Weir fait augmenter la capacité d'évacuation d'une manière significative, faire augmenter le ratio L/W de deux fois cela conduit à un accroissement du coefficient de débit de plus de 50% pour les charges relatives $h^*/P < 0.4$. Cependant, l'efficacité diminue remarquablement pour les charges relatives $h^*/P > 0.6$. Le faible gain dans la capacité d'évacuation enregistré pour les grandes valeurs de L/W et h^*/P est peu probable en pratique de justifier les dépenses supplémentaires structurelles impliquées.

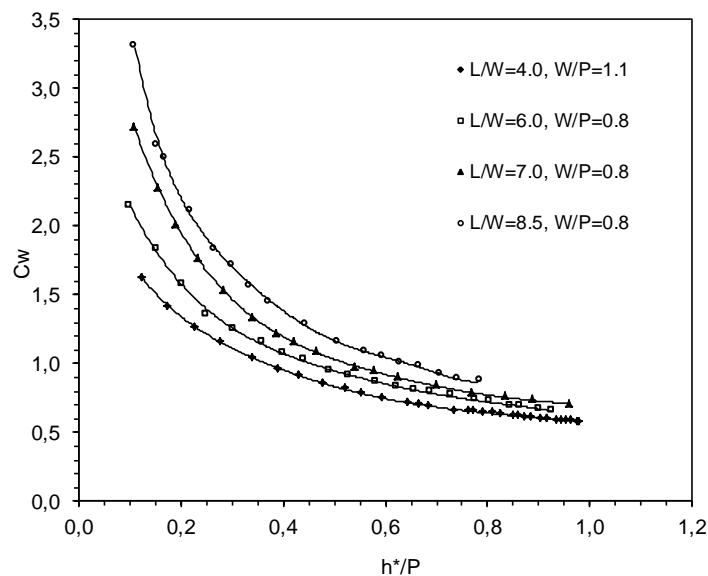


Fig. 9 Coefficient de débit en fonction du ratio L/W

4.4 Impact de la largeur des alvéoles a et b

La géométrie en plan du P.K.Weir est caractérisée par deux alvéoles de forme rectangulaire, la première de largeur a orientée vers l'amont et la deuxième de largeur b orientée vers l'aval. La pente des radiers des alvéoles est dépendante de la longueur des porte-à-faux et de la hauteur du déversoir, de ce fait, l'écoulement dans les alvéoles amont et aval peut être différent.

Pour vérifier l'impact de la variation de la largeur des alvéoles amont et aval sur l'écoulement trois cas ont été considéré ($b/a = 0.67, 1.0$ et 1.5).

La figure 10 montre que le choix de la largeur de l'alvéole amont supérieure à l'alvéole aval permet d'avoir un rendement meilleur. Ceci est plus apparent pour les charges relatives $h^*/P < 0.5$. Quand la charge relative est supérieure à 0.5 cet avantage devient faible.

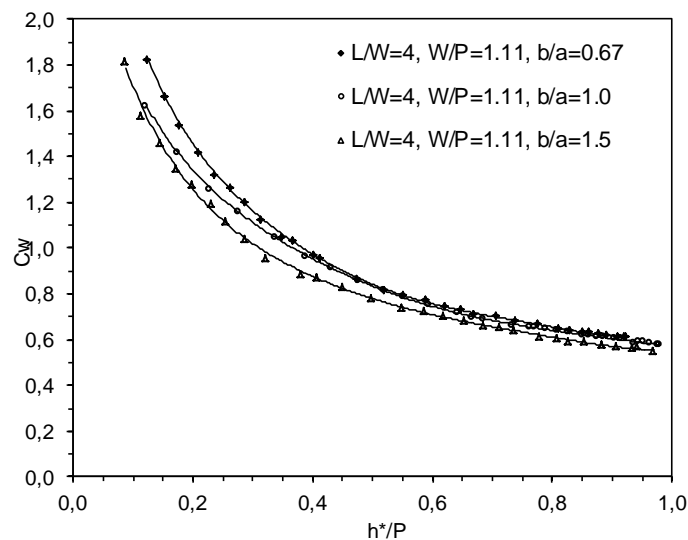


Fig. 10 Coefficient de débit en fonction de la largeur des alvéoles amont et aval

La figure 10 fait remarquer aussi que pour une même largeur d'un élément du P.K.Weir, il est possible pour le même coût d'augmenter la largeur de l'alvéole amont de 20 % et réduire en conséquence la largeur de l'alvéole aval. Ceci fait augmenter le rendement d'environ 5 % sans aucune dépense supplémentaire. De ce fait, il est plus rentable de concevoir le P.K.Weir avec une largeur de l'alvéole amont plus grande que la largeur de l'alvéole aval pour des charges relatives de dimensionnement inférieures à 0.5.

4.5 Impact de la longueur des porte-à-faux

L'impact de la longueur des porte-à-faux a été étudié selon trois configurations, la première avec des porte-à-faux amont plus longs que les porte-à-faux aval ($c=B/3, d=B/6, d/c=0.5$), la seconde configuration avec des porte-à-faux amont et aval identiques ($c=d=B/4, d/c=1$) et la dernière configuration avec seulement des porte-à-faux amont ($c=B/2, d=0, d/c=0$). Ces trois configurations ont été choisies pour des raisons de conception structurelle et de construction afin de déterminer les solutions les plus rentables.

La figure 11 fait montrée que le modèle sans porte-à-faux aval ($d/c=0$) se caractérise par un rendement plus élevé que les modèles avec porte-à-faux aval. L'accroissement du modèle avec $d/c=0$ est d'environ 12% pour des charges relatives $h^*/P < 0.4$ et de l'ordre de 9% pour $h^*/P > 0.4$. Par contre, le rendement du modèle avec porte-à-faux symétriques ($d/c=1$) est plus grand que celui du modèle avec des porte-à-faux non symétrique, l'accroissement du rendement est de 7% pour les charges relatives $h^*/P < 0.4$ et d'environ 2% pour $h^*/P > 0.4$.

Ce résultat montre que le modèle sans porte-à-faux aval ($d/c=0$) peut être une solution pour les grands débits spécifiques et le modèle à porte-à-faux symétriques représente une solution économique à cause de la symétrie des porte-à-faux, ce qui favorise l'utilisation des éléments préfabriqués.

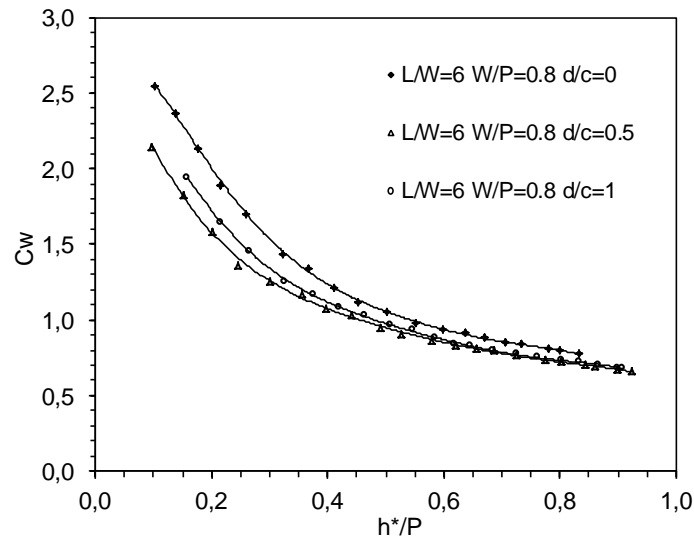


Fig. 11 Coefficient de débit en fonction de la longueur des porte-à-faux

4.6 Impact de la forme d'entrée sous les porte-à-faux amont

La géométrie de P.K.Weir fait que le déversoir devient sensible à la forme d'entrée immédiate en amont du déversoir.

Pour vérifier l'impact de la forme d'entrée sous les porte-à-faux, deux formes d'entrée ont été considérées, la première correspond à une forme plane sous les porte-à-faux et la seconde correspond à une forme d'entrée arrondie.

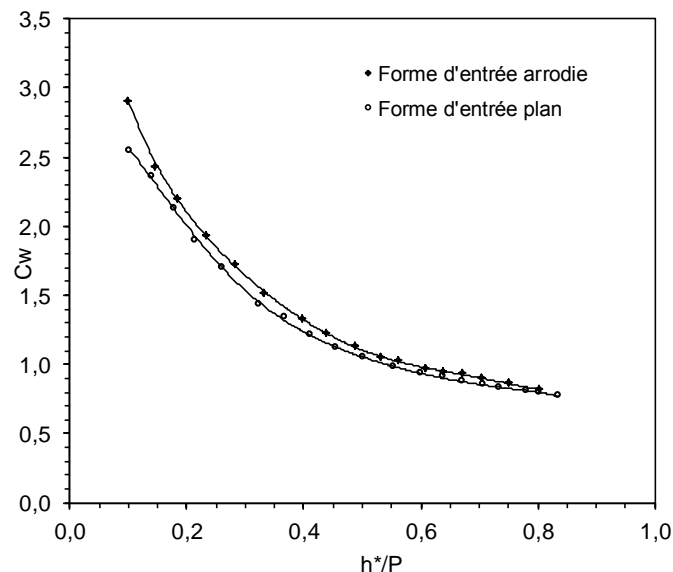


Fig. 12 Coefficient de débit en fonction de la forme d'entrée sous les porte-à-faux

La figure 12 montre que la conception d'une meilleure forme hydraulique à la partie verticale sous les porte-à-faux amont (comme pour les piliers d'un déversoir vanné), augmenteraient le rendement du P.K.Weir d'environ 7 % pour un faible coût supplémentaire.

4.7 Impact des corps flottants

Afin de vérifier le comportement du P.K.Weir dans le cas de passage d'une crue chargée de corps flottants, des essais ont été effectués dans des conditions extrêmes d'encombrement de l'entrée du déversoir.



Fig. 13 Fonctionnement du P.K.Weir avec encombrement de l'entrée par des corps flottants

Pendant l'expérimentation, il a été remarqué qu'aucun blocage des corps flottants sous les porte-à-faux n'a été observé pendant la montée du niveau d'eau de la base du P.K.Weir jusqu'à la crête. Pour les faibles charges les corps flottants sont entraînés dans les alvéoles aval et reste bloqués jusqu'à ce que la charge sur le seuil du déversoir atteigne une valeur moyenne de l'ordre de $0.4P$, à cet instant, les corps flottants commencent à être évacués systématiquement vers l'aval, ce qui permet au P.K.Weir de retrouver sa capacité initiale.

Le graphique (14) qui représente le coefficient de débit en fonction de l'encombrement du déversoir par les corps flottants montre une discontinuité de la courbe qui représente le modèle avec corps flottants.

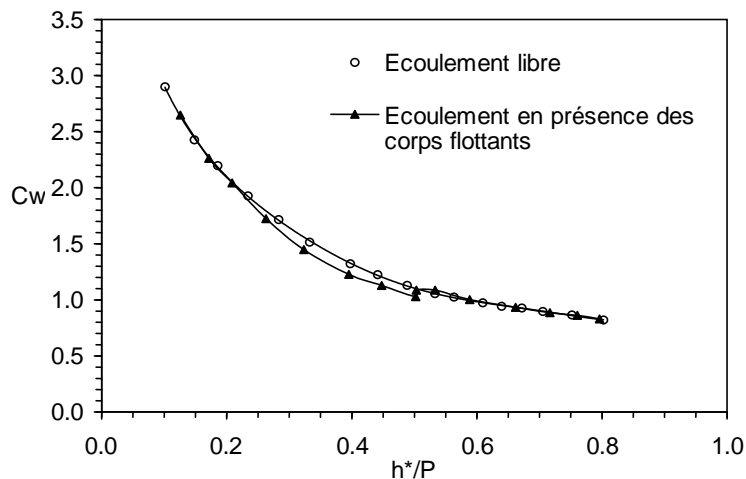


Fig. 14 Coefficient de débit en fonction de la présence des corps flottants

A partir d'une charge relative $h^*/P=0.25$, les valeurs de coefficient de débit deviennent inférieures aux valeurs obtenues sur le modèle sans encombrement. Quand la charge relative atteint une valeur de l'ordre 0.5, l'écoulement sur le déversoir redevient normal et le coefficient de débit prend des valeurs égales aux valeurs correspondant à la courbe qui représente l'écoulement libre.

L'effet des corps flottants peut réduire le débit d'environ 10 % quand la profondeur de la lame déversante est dans la gamme de 1 ou 2m (Comme pour les déversoirs Creager). Pour les profondeurs de la lame déversante supérieures à 2m les corps flottants sont évacués systématiquement vers l'aval.

5 Conclusion

Le P.K.Weir représente une solution rentable de point des vues hydraulique et économique. Il peut être une solution pour la plupart des barrages existants qui nécessite un accroissement de la capacité de la retenue et/ou l'accroissement de débit des évacuateurs de crues. Comme il pourrait être une solution pour réduire la largeur des évacuateurs de crues et/ou la hauteur des nouveaux barrages.

Les essais effectués sur des modèles réduits de PKWeir ont permis de définir deux types de configuration de ce déversoir. Ces deux configurations peuvent être utilisées pour la réadaptation des déversoirs à écoulement libre des barrages en terre et des barrages en béton.

9- REFERENCES

- HINCHLIFF D. L. and HOUSTON, K. L. 1984. Hydraulic Design and Application of Labyrinth Spillways, *Division of Research Engineering and Research Center, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.*
- LEMPERIERE F. 2000. More cost data may help to optimize spillways. *The international journal on Hydropower and Dams.* Issue four.
- LEMPERIERE F. OUAMANE A. 2003. The piano keys weir: a new cost-effective solution for spillways. *The international journal on Hydropower and Dams* volume ten, issue Five.
- OUAMANE A. LEMPERIERE F. 2006. Nouvelle conception de déversoir pour l'accroissement de la capacité des retenues des barrages. *Colloque International sur la Protection et la préservation des ressources en eau.* Blida. Algérie
- 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.
- OUAMANE A., 2006. Hydraulic and Costs data for various Labyrinth Weirs, *22th Congress on Large Dams, ICOLD, Q84, Barcelona.*
- 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.