

## Analyse expérimentale de l'influence des largeurs d'alvéoles sur la débitance des déversoirs en touches de piano

*Experimental study of the alveoli widths influence on the release capacity of Piano Key Weirs*

**OLIVIER MACHIELS, SÉBASTIEN ERPICUM, PIERRE ARCHAMBEAU, BENJAMIN DEWALS\*, MICHEL PIROTON**

Université de Liège, Département ArGENCo, Unité de recherche HACH

\* Fond National de la Recherche Scientifique (FRS-FNRS)

1, chemin des Chevreuils - B52/3 - B-4000 Liège - Belgique

Tél : +32 (0)4 366 95 96, Fax : +32 (0)4 366 95 58, e-mail : omachiels@ulg.ac.be

**D**ans le cadre de la mise à niveau des capacités d'évacuation et de stockage d'ouvrages de retenue existants, l'utilisation de déversoirs en touches de piano (PKW) peut se révéler une alternative intéressante soit pour augmenter la débitance d'un seuil libre sans modifier l'emprise de l'ouvrage ni le niveau de retenue avant déversement, soit pour accroître le niveau de retenue avant déversement en conservant l'emprise de l'ouvrage et son niveau de sécurité. Afin d'aider à la compréhension du fonctionnement de ce nouveau type de déversoir et à la caractérisation de son potentiel hydraulique, les résultats d'une étude expérimentale ayant pour objectif de juger de l'influence de la largeur relative des alvéoles amont et aval sur les caractéristiques hydrodynamiques de la structure sont présentés. Une formulation analytique physiquement basée pour l'évaluation du coefficient de débit des PKW testés sur modèles réduits est proposée. Elle est en bonne correspondance avec les résultats expérimentaux et permet le calcul objectif du rapport de largeurs d'alvéoles optimal.

**W**ithin the framework of updating the release and storage capacities of existing reservoirs, the use of piano keys weirs (PKW) can be an interesting alternative either to increase the discharge of a free weir without changing the weir layout or the reservoir level, or increase the reservoir level before discharge while keeping the weir layout and the level of safety. In order to help to the understanding of the behavior of this new type of weirs and to characterize their hydraulic potential, the results of an experimental study with for objectives to study the influence of the relative width of the inlets and outlets on the hydrodynamic characteristics of the structure are presented. A process oriented analytical formulation for the evaluation of the discharge coefficient of the PKW tested on scale models is proposed. It is in satisfactory agreement with the experimental results and leads to an objective evaluation of the optimal ratio of the alveoli widths.

### I ■ INTRODUCTION

Depuis une vingtaine d'années, les modifications climatiques et l'allongement des périodes de mesures disponibles pour des statistiques incitent à une réévaluation systématique des critères de sécurité des ouvrages hydrauliques [1]. Cette dernière montre une augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes extrêmes dans un contexte de vieillissement de la grande majorité des ouvrages de retenue existants en Europe. La question de la sécurité des ouvrages apparaît dès lors comme une priorité pour les gestionnaires, propriétaires et ingénieurs hydrauliciens. Ainsi, la révision des débits de crues extrêmes des grands ouvrages existants amène à une remise à niveau concomitante à la réhabilitation de bon nombre de structures d'évacuation.

Dans ce cadre, les déversoirs en labyrinthe offrent une solution intéressante, permettant d'augmenter le débit évacué en conservant la largeur d'emprise des déversoirs classiques (type Creager). Cependant, le coût de tels ouvrages limite leur application et incite à chercher d'autres alternatives.

Dans cette optique, la société Hydrocoop-France, en collaboration avec l'université de Biskra en Algérie, a développé une nouvelle forme de déversoir permettant d'évacuer, pour une même hauteur de charge, un débit plus important que les déversoirs traditionnels de type Creager [2, 3, 4]. Tout en utilisant l'augmentation de capacité débitante apportée par l'utilisation de déversoirs en labyrinthe, les travaux ont eu pour objectif de développer un déversoir multipliant la longueur de crête déversante tout en conservant l'emprise en base des seuils classiques.

Ainsi sont nés les déversoirs en touches de piano (Piano Key Weirs - PKW), tirant leur nom de leur forme en alvéoles alternées (Figure 1). Ces déversoirs offrent les avantages des déversoirs en labyrinthe traditionnels : multiplication par au moins 4 du débit spécifique des déversoirs standards, entretien et utilisation aisés, évacuation de débits spécifiques allant jusqu'à  $100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  et gain sur la hauteur de retenue pour un même degré de sécurité [2]. Ils possèdent de plus l'avantage de leur moindre coût. En effet, la présence de porte-à-faux, diminuant le volume de béton, ainsi qu'une géométrie simple, permettant l'utilisation d'éléments préfabriqués, diminuant sensiblement les coûts de réalisation de ces ouvrages [2].

Une autre opportunité d'application des PKW réside dans leur avantage de ne nécessiter qu'une faible charge pour évacuer des débits importants. Leur utilisation permet ainsi une rehausse des niveaux de retenue, à sécurité hydraulique constante, augmentant considérablement les volumes stockés [5]. Ceci offre donc des perspectives intéressantes pour la mitigation de la limitation de plus en plus marquée des ressources hydrauliques disponibles [6].

Les PKW s'avèrent ainsi être d'un intérêt capital tant pour la réhabilitation d'ouvrages existants que pour l'élaboration de nouveaux équipements. Il convient cependant de bien comprendre leur fonctionnement hydraulique et structurel, et d'optimiser leur dimensionnement. Des travaux expérimentaux, dont les premiers résultats [7] sont présentés dans cet article, sont entrepris dans ce but au Laboratoire d'Hydraulique des Constructions de l'Université de Liège (Unité de recherche HACH).

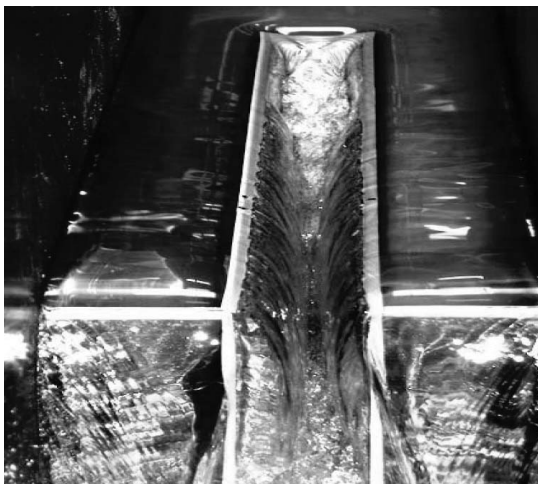


Figure 1. Ecoulement sur un PK Weir

## II ■ PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES DU PKW

Le déversoir en touches de piano tire son nom de sa géométrie particulière, alternance d'alvéoles amont (inlet) et aval (outlet), rappelant la configuration d'un clavier de piano.

Ces alvéoles sont de forme rectangulaire afin de simplifier la géométrie de l'ouvrage. Leur dimensionnement résulte d'un compromis entre l'augmentation de la capacité d'éva-

cuation du déversoir par profilage des alvéoles et la diminution des coûts par simplification de la structure. Les radiers des alvéoles présentent des pentes alternées, favorisant l'utilisation de porte-à-faux. Ceux-ci permettent de diminuer de manière conséquente le volume de béton à mettre en œuvre, la largeur d'emprise de la structure en crête de barrage et ainsi le coût global de l'ouvrage.

On appelle « élément PKW », la structure générique du déversoir en touche de piano composée d'un voile entouré d'une demi-outlet et d'une demi-inlet. La géométrie du PKW est définie (Figure 2) par la hauteur totale  $P$ , la longueur amont - aval en crête  $B$  et en base  $B_m$ , les largeurs d'inlet  $a$  et d'outlet  $b$ , les longueurs de porte-à-faux amont  $c$  et aval  $d$ , l'épaisseur des voiles  $e$ , la largeur des éléments PKW  $W$  et leur nombre  $n$ .

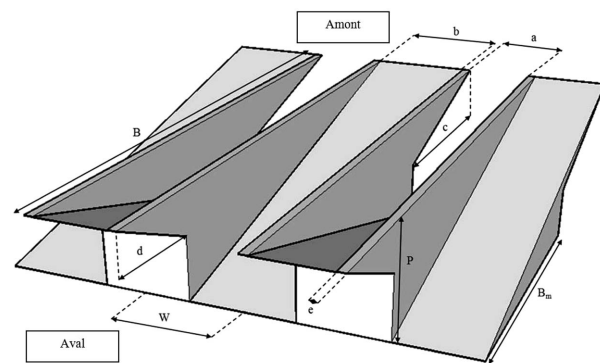


Figure 2. Représentation 3D d'un élément de déversoir en touches de piano et définition de ses paramètres géométriques

Les caractéristiques hydrauliques du déversoir en touches de piano, et plus particulièrement son débit spécifique, peuvent dès lors être évaluées sur base des paramètres sans dimensions suivants [2] :  $H/P$ ,  $a/b$ ,  $L/W$ ,  $e/H$ ,  $c/d$ ,  $W/P$  et  $n$ , où  $H$  est la charge sur le seuil et  $L$  sa longueur déversante développée.

Lors d'études préalables, Ouamane et Lempérière [2, 3, 4] ont noté qu'une augmentation de 25 % de la hauteur des éléments étudiés, conduit à un gain de 6 % en termes de capacité d'évacuation. Pour des charges relativement faibles, le coefficient de débit augmente de façon importante avec la longueur relative du déversoir  $L/W$ , alors que cette augmentation est sensiblement moindre pour des hauteurs de charge plus importantes. L'étude, par les mêmes auteurs, de l'impact de la longueur relative des porte-à-faux  $d/c$ , a quant à elle montré l'efficacité des déversoirs sans porte-à-faux aval face au cas de porte-à-faux amont et aval similaires ou de porte-à-faux amont plus longs que le porte-à-faux aval. Enfin, l'étude de l'impact des largeurs des inlets et outlets a conclu à l'intérêt d'élargir l'inlet au détriment de l'outlet, soit d'augmenter le rapport  $a/b$ .

Poussant ce dernier raisonnement à l'extrême et faisant tendre la largeur des outlets vers 0, on retrouverait un déversoir rectiligne penché vers l'aval (inlet unique). Le coefficient de débit de ce déversoir, semblable à celui d'un

déversoir traditionnel, est bien inférieur à ceux mesurés sur les PKW. De même, lorsque l'on pousse le raisonnement inverse à l'extrême, on retrouve une outlet unique dont le coefficient de débit est, une fois encore, largement inférieur à ceux mesurés sur des modèles standards de PKW. On peut s'attendre, dès lors, à trouver un rapport optimal des largeurs entre ces deux extrêmes offrant le meilleur rendement du déversoir. C'est la recherche de ce rapport optimal qui fait l'objet principal des expérimentations présentées dans cet article.

### III ■ OBJECTIF ET PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Dans le but de déterminer l'influence du rapport des largeurs d'alvéoles  $a/b$  sur le coefficient de débit d'un PKW avec un seul porte-à-faux amont, des essais sur modèles réduits ont été réalisés au Laboratoire d'Hydraulique des Constructions de l'Université de Liège [7].

La débitance de 6 géométries de PKW (Tableau 1), variant uniquement par la valeur de leur rapport  $a/b$ , a été mesurée sur modèle physique.

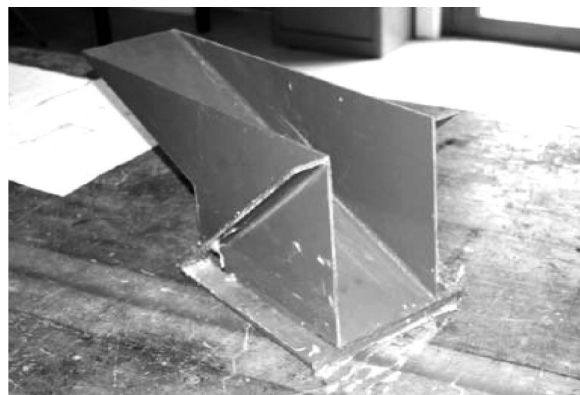
Tableau 1. Paramètres géométriques des PKW étudiés

$W/P$	0.5
$L/W$	6
$d/c$	0 ( $c = 0.25$ m)
$a/b$	0 ; 0.54 ; 0.82 ; 1.5 ; 2.33 ; $\infty$
$n$	2

Les tests ont ainsi été menés sur un cycle composé de deux demi-alvéoles aval encadrant une alvéole amont (Figure 3b).



(a) Section du canal



(b) Modèle type utilisé au laboratoire

Figure 3. Exemple de modèles étudiés au laboratoire

Le dispositif expérimental se compose d'un bac en amont qui contient un convergent alimentant un canal à fond plat de 0.2 m de large pour 2.4 m de long et 1.2 m de haut (Figure 4). L'élément de PKW étudié est placé à l'extrémité aval du canal (Figure 3a). Il est posé sur un socle de 0.2 m de hauteur.

Des mesures de hauteur d'eau ont été effectuées à l'aide de limnimètres en deux endroits : dans une zone de vitesses nulles, localisée dans le réservoir, et dans le canal d'amenée, 0.4 m en amont du déversoir (Figure 5). Les vitesses découlement ont été mesurées, au droit du second limnimètre, par un moulinet placé à la hauteur du seuil déversant. Elles ont de plus été vérifiées à l'aide de 4 sondes à effet Doppler. La mesure du débit injecté dans le modèle était assurée par un débitmètre électromagnétique placé sur le système de pompage en circuit fermé. La précision des mesures de débit est de 1 l/s. La précision des mesures au limnimètre est de 0.5 mm.

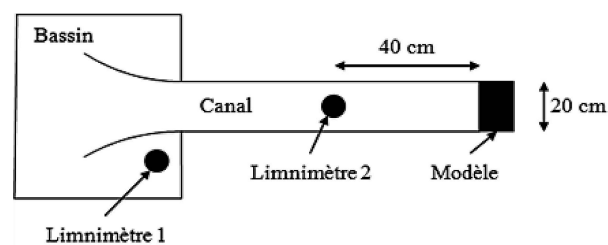


Figure 4. Schéma de la zone d'essai et positionnement des appareils de mesure

### IV ■ RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Pour chaque type de déversoir, le débit évacué  $Q$  est lié à la hauteur de charge sur le déversoir  $H$ . Cette dernière a été déterminée sur base des mesures, au niveau du second limnimètre, de la hauteur d'eau  $h$  et de la vitesse moyenne  $v$  sur la hauteur d'eau. Le coefficient de débit  $C_w$ , représentant la

capacité d'évacuation du déversoir peut alors être calculé par l'équation (1) où  $g$  est l'accélération de la pesanteur.

$$C_w = \frac{Q}{nW\sqrt{2gH^3}} \quad (1)$$

Pour les 6 modèles, les courbes de la *Figure 5* ont été obtenues pour des débits variant de 8 l/s à 70 l/s. Elles représentent la variation du coefficient de débit  $C_w$  avec la charge relative sur le déversoir  $H/P$ .

Pour les faibles rapports  $H/P$ , le rapport  $a/b = 1.5$  offre le meilleur rendement parmi les modèles étudiés. Pour des rapports  $H/P$  plus élevés, les coefficients de débit des différents modèles sont plus proches et les rapports  $a/b = 0.82$  puis  $a/b = 0.54$  offrent un rendement plus proche de l'optimum.

Il existe donc bien, comme attendu, un rapport  $a/b$  optimal. Ce rapport optimal varie avec la charge sur le déversoir.

## V ■ INTERPRÉTATION ANALYTIQUE

Dans le but de construire une équation analytique liant le coefficient de débit  $C_w$  aux paramètres géométriques du

PKW, une formulation semi-empirique a été élaborée sur base d'un raisonnement sur la physique de l'écoulement, avant le calage des paramètres en regard des résultats expérimentaux.

En séparant les contributions au débit total évacué de chaque partie amont, aval et latérale du déversoir, on obtient la formulation (2) du coefficient de débit global  $C_w$  :

$$C_w = C_{w\text{ amont}} + C_{w\text{ aval}} + C_{w\text{ latéral}} \quad (2)$$

Introduisant des facteurs correctifs pour tenir compte des interactions entre ces diverses parties, on obtient une formulation dont les paramètres ont été calés sur base des résultats des essais réalisés.

L'apport de la partie amont (*Eq. (3)*) se calcule sur base du coefficient de débit déterminé empiriquement sur le cas de l'alvéole amont seule. Les trois termes suivants de l'équation sont introduits pour tenir compte respectivement de la largeur relative de l'alvéole amont, de la contraction latérale de la lame fluide ainsi que de la variation de cette contraction avec la vitesse de l'écoulement. L'influence de la contraction latérale de la lame fluide est représentée par la largeur relative de l'alvéole amont quantifiant l'importance du débit passant sur l'alvéole par rapport au débit passant

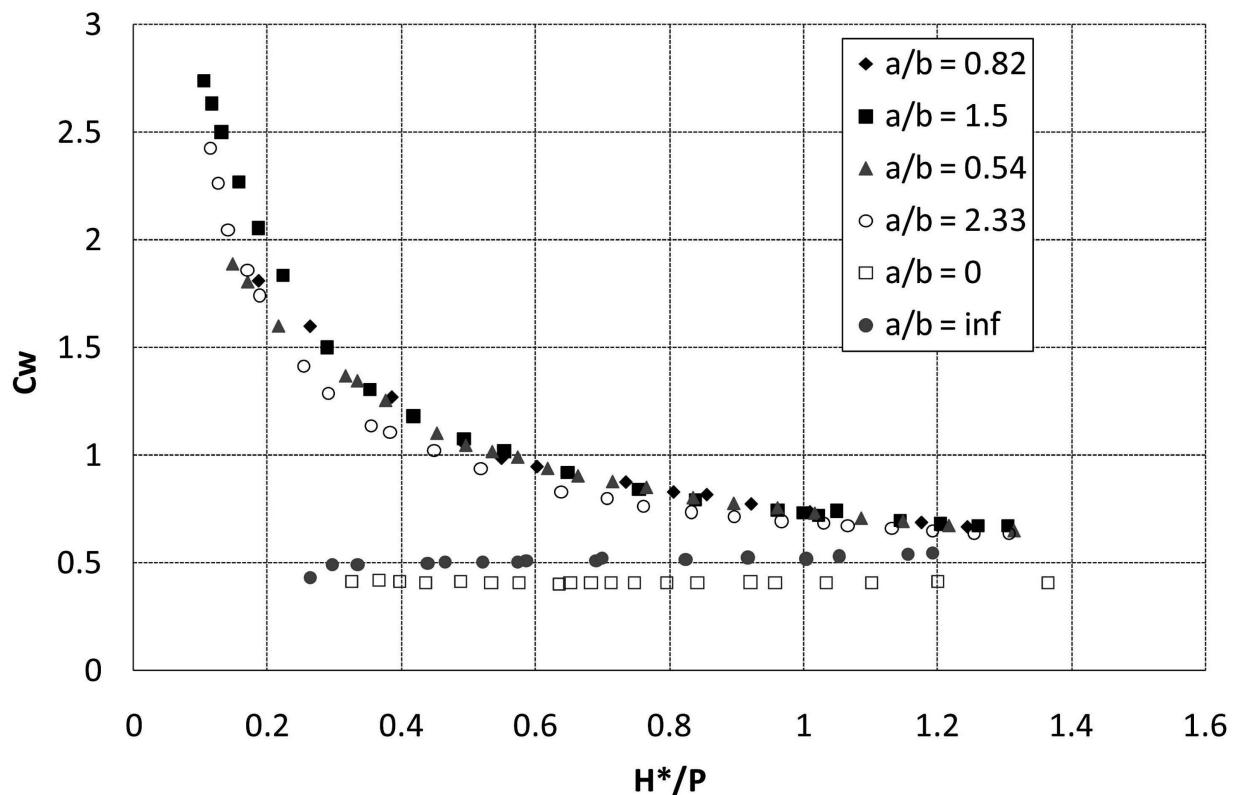


Figure 5. Variation du coefficient de débit avec la charge pour les différents modèles étudiés

sur les déversoirs latéraux. L'importance de cette contraction variant avec la vitesse de l'écoulement, le dernier terme sera fonction de celle-ci qui, à coefficient de débit constant, est proportionnelle à la racine de la charge  $H$ .

$$C_{w\text{ amont}} = \underbrace{0,414}_{\text{Coefficient de débit}} \cdot \underbrace{\frac{b}{2W}}_{\text{largeur relative}} \cdot \underbrace{\frac{b}{2W}}_{\text{contraction latérale de la lame fluide due au débit latéral}} \cdot \underbrace{\frac{\left(\frac{H}{P}\right)^{0,5} + \frac{b}{2W}}{\left(\frac{H}{P}\right)^{0,5} + 1}}_{\text{variation de la contraction latérale de la lame fluide due à la vitesse de l'écoulement}} \quad (3)$$

Comme pour la partie amont, l'apport de la partie aval (Eq. (4)) est calculé sur base du coefficient de débit déterminé pour le cas d'une alvéole aval seule. Dans ce cas, l'influence de la contraction verticale de la lame fluide, due à la charge, n'est pas négligeable. Le deuxième terme de l'équation tient ainsi compte de l'influence de la charge sur le coefficient de débit du déversoir aval. Les deux autres termes de l'équation sont introduits afin de prendre en compte respectivement la largeur relative de la partie aval et la variation de la charge entre l'amont et l'aval du déversoir. Cette variation de la charge est uniquement fonction de la charge à l'amont du déversoir et de la géométrie de celui-ci.

$$C_{w\text{ aval}} = \underbrace{0,476}_{\text{Coefficient de débit}} \cdot \underbrace{\left[1 + 0,125 \cdot \left(\frac{H}{P}\right)^{1-0,373} \left(\frac{b}{a}\right)^{0,1}\right]}_{\text{contraction verticale de la lame fluide due à la charge}} \cdot \underbrace{\frac{a}{2W}}_{\text{largeur relative}} \cdot \underbrace{\left(\frac{H}{P}\right)^{-0,56} \left(\frac{b}{a}\right)^{0,1}}_{\text{prise en compte de la hauteur sur le déversoir aval}} \quad (4)$$

Enfin, l'apport de la partie latérale (Eq. (5)) est calculé sur base de la formulation de Dominguez [8] donnant le coefficient de débit pour les déversoirs latéraux et prenant en compte la contraction verticale de la lame fluide due à sa charge. Comme pour le calcul de l'apport de la partie aval, les troisième et quatrième termes de l'équation sont introduits afin de prendre en compte respectivement la largeur relative des déversoirs latéraux et la variation de la charge le long de ceux-ci. Enfin, comme pour la partie amont, les deux derniers termes de l'équation sont introduits pour prendre en compte la contraction latérale de la lame fluide due à l'interaction entre la lame du déversoir amont et celles des déversoirs latéraux.

$$C_{w\text{ lateral}} = \underbrace{0,985}_{\text{Coefficient de débit}} \cdot \underbrace{\left[0,4 + 0,272 \cdot \left(\frac{H}{P}\right)^{0,451} \left(\frac{b}{a}\right)^{0,1}\right]}_{\text{contraction verticale de la lame fluide due à la charge}} \cdot \underbrace{\frac{B}{W}}_{\text{largeur relative}} \cdot \underbrace{\left(\frac{H}{P}\right)^{-0,56} \left(\frac{b}{a}\right)^{0,1}}_{\text{prise en compte de la hauteur sur le déversoir aval}} \quad (5)$$

$$\cdot \underbrace{\frac{a}{2W}}_{\text{contraction latérale de la lame fluide due au débit sur l'alvéole amont}} \cdot \underbrace{\frac{\frac{b}{2W}}{\left(\frac{H}{P}\right)^{0,5} + 1}}_{\text{variation de la contraction latérale de la lame fluide due à la vitesse de l'écoulement}}$$

Il est important de noter que l'étude a porté sur la variation du rapport des largeurs des alvéoles. Les équations (3), (4) et (5) sont donc uniquement valables pour une longueur relative  $L/W = 6$ , un rapport d'aspect vertical  $W/P = 0.5$  et un porte-à-faux amont unique. Pour des conditions différentes, la forme de leurs formulations resterait valable mais les paramètres devraient être à nouveau calés.

Les résultats de l'équation (2) sont en bonne concordance avec les résultats expérimentaux, comme on peut le voir sur les graphiques de la figure 6. L'erreur relative maximale (tableau 2) entre les débits calculés par les équations (1) à (5) et les débits réellement observés sur les 6 modèles dans la gamme de débit de 8 à 70 l/s est de 11.4 % pour un débit de 11 l/s (proche de l'erreur de mesure).

Tableau 2. Erreur relative entre les débits mesurés au laboratoire et ceux calculés par les équations (1) à (5)

a/b	Erreur relative maximale Entre $C_w$ calculé et mesuré
0	2.1 %
0.54	8.5 %
0.82	5.5 %
1.5	11.4 %
2.33	11.1 %
$\infty$	2.6 %

Le calcul des racines de la dérivée de l'équation (2) fournit la courbe de la figure 7, représentant le rapport optimal des largeurs d'alvéole pour chaque hauteur de charge sur le déversoir, dans les conditions d'étude envisagées.

Le rapport optimal des largeurs d'alvéoles  $a/b$  varie bien en fonction de la charge sur le seuil déversant. Dans les conditions d'étude, le rapport connaît ainsi un maximum pour un rapport  $H/P$  proche de 0.5. Pour des rapports  $H/P$  inférieurs, on aura intérêt à augmenter le rapport  $a/b$  avec la charge. Inversement, pour des rapports  $H/P$  supérieurs à 0.5, il faudra diminuer le rapport  $a/b$ , pour des charges croissantes, en vue d'obtenir un rendement optimal du déversoir.

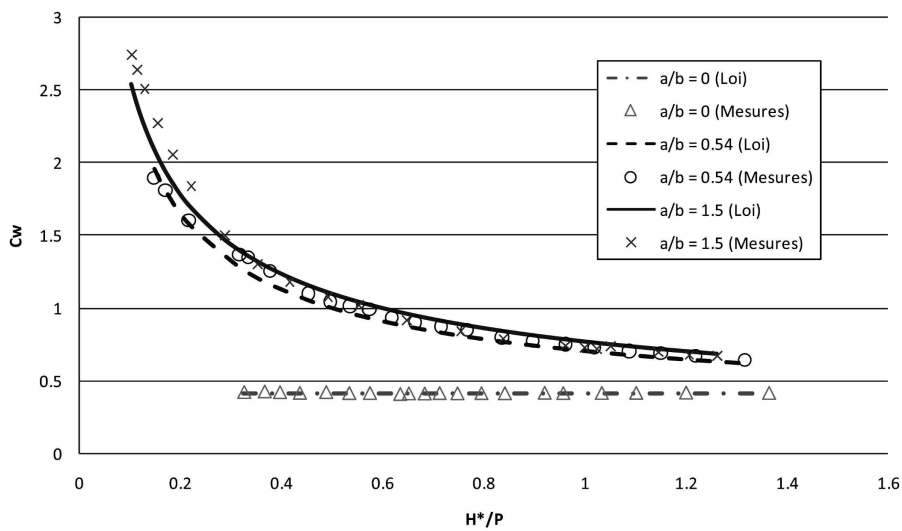


Figure 6. Comparaison de la formulation analytique de  $C_w$  avec les résultats expérimentaux des différents modèles

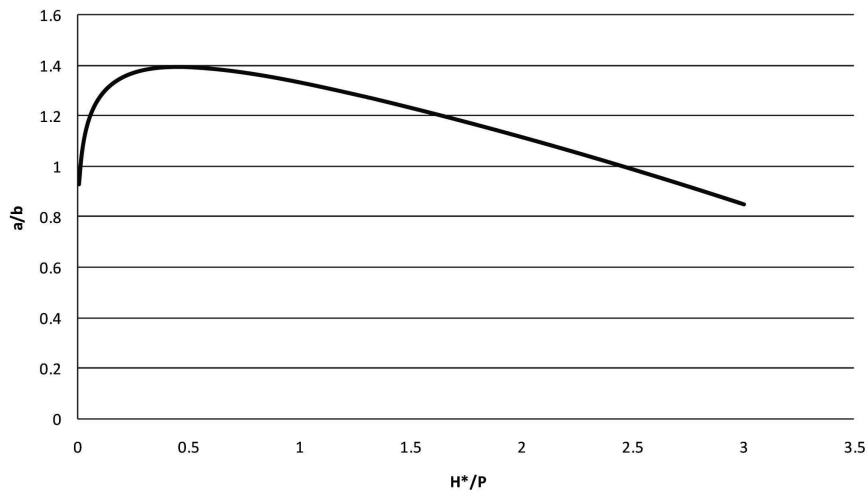


Figure 7. Rapport de forme  $a/b$  pour une utilisation optimale du PKW étudié en fonction de la charge adimensionnelle en amont

Pour des rapports d'aspect vertical  $W/P$ , des longueurs relatives  $L/W$  ou des porte-à-faux différents, on obtiendrait, par intégration de l'équation (2) modifiée adéquatement, des courbes aux formulations semblables mais aux paramètres différents.

## VI ■ CONCLUSIONS

Les PKW sont un nouveau type de déversoir alliant les intérêts du déversoir en labyrinthe, augmentant largement la débitance d'un seuil Creager classique, et l'utilisation de porte-à-faux, diminuant l'emprise en base et ainsi le coût global de l'ouvrage d'évacuation.

L'étude expérimentale sur modèles réduits de PKW, présentée dans cet article, avait pour objectif de définir le rapport des largeurs d'alvéoles  $a/b$  optimal à mettre en œuvre. Ce rapport optimal est défini comme celui qui, pour une charge donnée, permet l'évacuation du débit le plus important.

L'analyse des résultats expérimentaux, obtenus par exploitation de 6 modèles réduits aux rapports  $a/b$  variables, fournit une formulation analytique de la variation du coefficient de débit en fonction de la géométrie de l'ouvrage et de la charge sur le seuil. Cette expression a été validée par comparaison avec les résultats des essais dans une large gamme de débits. Par intégration de la formulation analytique, une courbe du rapport  $a/b$  optimal en fonction de la charge a été obtenue.

## VII ■ RÉFÉRENCES

- [1] J.C. MILLET, J. CHAMBON, G. SOYER, C. LEFEVRE (1988) — Augmentation de la capacité des ouvrages d'évacuation de divers barrages Q63 R78 . *16ème Congrès des Grands Barrages, San Francisco, USA* .
- [2] A. OUAMANE, F. LEMPÉRIÈRE (2006) — Design of a new economic shape of weir . *The International Symposium on Dams in the Societies of the 21st Century, Barcelona, Spain* .
- [3] A. OUAMANE, F. LEMPÉRIÈRE (2007) — Increase of the safety of dams. Rehabilitation of weirs . *ICOLD 75th Annual meeting, St Petersburg, Russia* .
- [4] A. OUAMANE, F. LEMPÉRIÈRE (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, Bida, Algérie* .
- [5] M. BARCOUDA, O. CAZAILLET, P. COCHET, B.A. JONES, S. LACROIX, F. LAUGIER, C. ODEYER, J.P. VIGNY (2006) — Cost effective increase in storage and safety of most dams using fusegates or P. K. Weirs, Q86 R3 . *22ème congrès des grands barrages, Barcelona, Spain* .
- [6] THE WORLD COMMISSION ON DAMS (2001) — [//www.dams.org/](http://www.dams.org/).
- [7] Y. KARELLE (2008) — *Etude expérimentale du comportement hydraulique des déversoirs en touches de piano (Piano Key Weirs). Travail de fin d'études, HACH, Université de Liège* .
- [8] M. CARLIER (1972) — *Hydraulique générale et appliquée. Collection du centre de recherches et d'essais de Chatou, Ed. Eyrolles* .