

# ETUDE PARAMETRIQUE DE LA CAPACITE DES PK-WEIRS

## *PK-Weir capacity parametric study*

Olivier Le Doucen<sup>(1)</sup>, Marcelo Leite Ribeiro<sup>(2)</sup>, Jean-Louis Boillat<sup>(3)</sup>,  
Anton Schleiss<sup>(4)</sup>, Frédéric Laugier<sup>(5)</sup>

<sup>(1), (2), (3), (4)</sup> Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

EPFL-ENAC-IIC-LCH, Station 18, CH-1015 Lausanne, Suisse

Tél: +41 (0)21 693 63 38, Fax: +41 (0)21 693 22 64, e-mail: [olivier.ledoucen@epfl.ch](mailto:olivier.ledoucen@epfl.ch), [marcelo.leite@epfl.ch](mailto:marcelo.leite@epfl.ch),  
[jean-louis.boillat@epfl.ch](mailto:jean-louis.boillat@epfl.ch), [anton.schleiss@epfl.ch](mailto:anton.schleiss@epfl.ch)

<sup>(5)</sup> EDF-CIH, Savoie-Technolac, 73 393 Le-Bourget-Du-Lac, France

Tél: +33 (0)4 79 60 60 60, Fax: +33 (0)4 79 60 62 31, e-mail: [frederic.laugier@edf.fr](mailto:frederic.laugier@edf.fr)

*Récemment, un nouveau type d'évacuateur labyrinthe appelé « PK-Weir » (Piano Key Weir, ou déversoir en touches de piano), a été développé par Hydrocoop (France), en collaboration avec le Laboratoire de développements hydrauliques et environnementaux de l'Université de Briska (Algérie) et le Laboratoire National Hydraulique et Environnement d'Electricité de France (EDF-LNHE Chatou). En raison de sa facilité d'implantation sur le couronnement de barrages existants, et surtout de son efficacité en comparaison des déversoirs à crête linéaire, le PK-Weir offre une alternative intéressante dans les projets de réhabilitation de barrages. La présente étude se base sur des essais systématiques réalisés sur des modèles de PK-Weir, dans l'objectif d'analyser l'influence des principaux paramètres géométriques sur leur efficacité. L'analyse dimensionnelle évalue le rendement hydraulique du PK-Weir en fonction de la charge, de la longueur de crête, de la largeur du PK-Weir, de la hauteur de pelle et des largeurs réciproques des alvéoles d'entrée et de sortie. Les résultats présentés peuvent être utilisés pour le dimensionnement de PK-Weirs.*

*Recently, a new type of labyrinth spillways called PK-Weir (Piano Key Weir) has been developed by Hydrocoop (France) in collaboration with the Laboratory of Hydraulic and Environmental Developments of the University of Briska (Algeria) and the National Laboratory of Hydraulic and Environment of EDF (EDF-LNHE Chatou). Due to its simple implementation on the top of existing dams and its efficiency compared to linear crest spillways, the PK-Weir is an interesting solution for dam rehabilitation projects. The present study is based on systematic experimental tests carried out in PK-Weir models and its objective is to analyze the influence of the major geometrical parameters in the PK-Weir efficiency. The dimensional analyses evaluates the hydraulic efficiency of the PK-Weir as function of the head, the crest length, the width of the PK-Weir, the height of the wall and the inlet and outlet alveoli widths. The results can be useful for the design of PK-Weirs.*

## I INTRODUCTION

Au fil des ans, avec l'enrichissement des bases de données hydrologiques et le développement de nouvelles méthodes d'estimation des débits de crue, certains barrages existants nécessitent une réhabilitation des évacuateurs de crue, en adéquation avec la capacité requise.

Récemment, un nouveau type d'évacuateur labyrinthe appelé "PK-Weir" (Piano Key Weir, ou déversoir en touches de piano), a été développé par Hydrocoop (France), en collaboration avec le Laboratoire de développements hydrauliques et environnementaux de l'Université de Briska (Algérie) et le Laboratoire National Hydraulique et Environnement d'Electricité de France (EDF-LNHE Chatou). En raison de sa facilité d'implantation sur le couronnement, et surtout de son efficacité en comparaison des déversoirs à crête linéaire, le PK-Weir offre une alternative intéressante dans les projets de réhabilitation de barrages [2, 6, 7].

Toutefois, le dimensionnement d'un PK-Weir sur un barrage existant n'est pas évident car la débitance de l'évacuateur dépend de plusieurs paramètres liés aux propriétés intrinsèques du fluide et aux caractéristiques géométriques du déversoir. La Figure 1 illustre un PK-Weir type, où  $W$  est la largeur du PK-Weir,  $a$  et  $b$  les largeurs respectives des alvéoles amont et aval,  $c$  et  $d$  les longueurs respectives des porte-à-faux amont et aval,  $B$  la longueur du PK-Weir,  $P$  la pelle des alvéoles amont et aval,  $e$  l'épaisseur des voiles. D'autres paramètres comme le rayon de courbure de la crête, l'angle du labyrinthe et la présence ainsi que la forme des déflecteurs sous les porte-à-faux amont doivent être pris en considération.

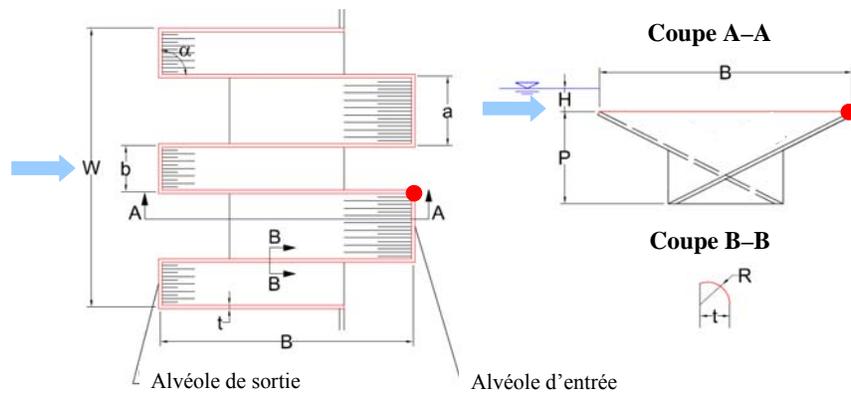


Figure 1 : Principales caractéristiques géométriques du PK-Weir [1]

Le gain d'efficacité du PK-Weir résulte prioritairement de l'allongement de la crête déversante ( $L$ ) en comparaison d'un déversoir linéaire de longueur ( $W$ ). L'augmentation du débit déversé et de la charge amont réduit progressivement l'efficacité du PK-Weir car des phénomènes hydrauliques perturbateurs affectent la capacité des crêtes latérales.

Actuellement, l'installation de PK-Weir sur des barrages existants appartenant à Electricité de France (EDF, France) est très prisée [3, 4, 5]. En l'absence de bases de dimensionnement précises, le design des tels évacuateurs impose encore les recours à des essais sur modèle physique.

Le but de la présente étude est d'évaluer expérimentalement l'influence des principaux paramètres géométriques d'un PK-Weir sur sa capacité d'évacuation. L'évaluation se base sur 4 facteurs adimensionnels:

- Le nombre de cycles d'alvéoles ( $n$ )
- Le rapport des largeurs des alvéoles d'entrée et de sortie ( $a/b$ );
- Le rapport entre la charge hydraulique et la pelle des alvéoles d'entrée et sortie ( $H/P$ );
- Le rapport entre la longueur totale développée de la crête et la largeur du PK-Weir ( $L/W$ ).

Les résultats obtenus constituent une base de données homogène qui permet l'établissement de recommandations de dimensionnement dans une perspective d'optimum hydraulique.

## II PROGRAMME D'ESSAIS

La maquette du PK-Weir est implantée dans un canal de 2 m de largeur, 17 m de longueur amont et 1 m de hauteur. Pour tester l'influence des différents facteurs géométriques, il a été choisi de représenter une configuration dite unitaire, composée d'une alvéole et demi amont et d'une alvéole et demi aval, soit un nombre de cycles  $n = 1.5$ . Afin de déterminer l'influence éventuelle du nombre de cycles sur la débitance, une série de tests a été réalisée en augmentant les cycles jusqu'à  $n=3$ . Pour éviter les effets de bords, deux parois guideau longitudinales favorisent un écoulement d'approche uniforme sur l'évacuateur.

Dans le cadre de l'étude de sensibilité, une configuration présentant les facteurs géométriques les plus couramment utilisés à ce jour pour les projets de PK-Weir a été adoptée comme référence. Elle est caractérisée par un rapport  $a/b$  de 1.25, un ratio  $L/W$  de 5 et une pelle à l'échelle du modèle de 21.7 cm, fixant ainsi l'angle d'inclinaison des alvéoles à 26.6°.

Dans une première étape expérimentale, l'influence du rapport  $a/b$  pour un ratio  $L/W$  constant de 5 a été testée pour les valeurs suivantes :  $a/b = 0.5, 0.625, 0.8, 1.25, 1.6, 2.0$ . Deux différentes hauteurs de pelle  $P=21.7$  et  $15.7$  cm ont aussi été testées pour chaque ratio  $a/b$ .

Deux rapports supplémentaires de  $L/W=7$  et  $L/W=3$  ont ensuite été testés pour un ratio  $a/b=1.25$  et  $0.8$ . Pour  $L/W=7$ , une seule valeur de pelle de 21.7cm a été testée alors que pour  $L/W=3$ , trois pelles de 21.7, 13.4 et 9.6 cm ont été expérimentées, fixant les angles d'inclinaison d'alvéoles respectifs à 39.1°, 26.6° et 19.9°. Concrètement la dépendance entre la longueur du PK-Weir, la pelle et l'angle d'inclinaison des alvéoles limite le nombre de configurations possibles.

Dans la présente étude, les essais ont été réalisés sur des configurations symétriques, où la pelle de l'alvéole d'entrée est égale à celle de l'alvéole de sortie. Le Tableau 1 recense les différents cas testés.

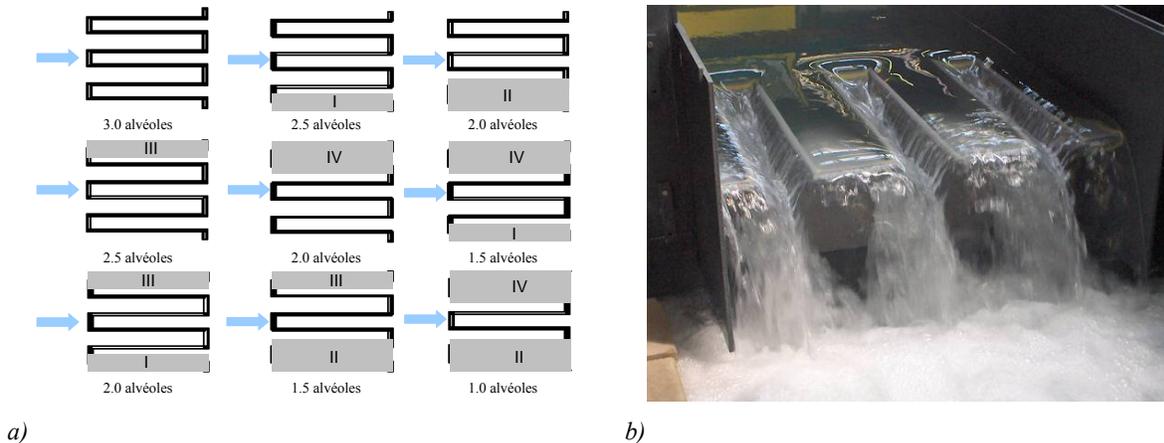
| Essai n° | Configuration          | L/W | a/b   | L   | W   | B    | a     | b     | c    | d    | B-c  | B-d  | P     |
|----------|------------------------|-----|-------|-----|-----|------|-------|-------|------|------|------|------|-------|
|          |                        | [-] | [-]   | [m] | [m] | [m]  | [m]   | [m]   | [m]  | [m]  | [m]  | [m]  | [m]   |
| 1        | L/W=5;a/b=1.25;P=0.217 | 5   | 1.250 | 2.5 | 0.5 | 0.67 | 0.163 | 0.130 | 0.23 | 0.23 | 0.43 | 0.43 | 0.217 |
| 2        | L/W=5;a/b=1.25;P=0.157 | 5   | 1.250 | 2.5 | 0.5 | 0.67 | 0.163 | 0.130 | 0.23 | 0.23 | 0.43 | 0.43 | 0.157 |
| 3        | L/W=5;a/b=0.80;P=0.217 | 5   | 0.800 | 2.5 | 0.5 | 0.67 | 0.130 | 0.163 | 0.23 | 0.23 | 0.43 | 0.43 | 0.217 |
| 4        | L/W=5;a/b=0.80;P=0.157 | 5   | 0.800 | 2.5 | 0.5 | 0.67 | 0.130 | 0.163 | 0.23 | 0.23 | 0.43 | 0.43 | 0.157 |
| 5        | L/W=5;a/b=1.60;P=0.217 | 5   | 1.600 | 2.5 | 0.5 | 0.67 | 0.181 | 0.113 | 0.23 | 0.23 | 0.43 | 0.43 | 0.217 |
| 6        | L/W=5;a/b=1.60;P=0.157 | 5   | 1.600 | 2.5 | 0.5 | 0.67 | 0.181 | 0.113 | 0.23 | 0.23 | 0.43 | 0.43 | 0.157 |
| 7        | L/W=5;a/b=0.63;P=0.217 | 5   | 0.625 | 2.5 | 0.5 | 0.67 | 0.113 | 0.181 | 0.23 | 0.23 | 0.43 | 0.43 | 0.217 |
| 8        | L/W=5;a/b=0.63;P=0.157 | 5   | 0.625 | 2.5 | 0.5 | 0.67 | 0.113 | 0.181 | 0.23 | 0.23 | 0.43 | 0.43 | 0.157 |
| 9        | L/W=5;a/b=2.00;P=0.217 | 5   | 2.000 | 2.5 | 0.5 | 0.67 | 0.195 | 0.098 | 0.23 | 0.23 | 0.43 | 0.43 | 0.217 |
| 10       | L/W=5;a/b=2.00;P=0.157 | 5   | 2.000 | 2.5 | 0.5 | 0.67 | 0.195 | 0.098 | 0.23 | 0.23 | 0.43 | 0.43 | 0.157 |
| 11       | L/W=5;a/b=0.50;P=0.217 | 5   | 0.500 | 2.5 | 0.5 | 0.67 | 0.098 | 0.195 | 0.23 | 0.23 | 0.43 | 0.43 | 0.217 |
| 12       | L/W=5;a/b=0.50;P=0.157 | 5   | 0.500 | 2.5 | 0.5 | 0.67 | 0.098 | 0.195 | 0.23 | 0.23 | 0.43 | 0.43 | 0.157 |
| 13       | L/W=7;a/b=1.25;P=0.217 | 7   | 1.250 | 3.5 | 0.5 | 1.00 | 0.163 | 0.130 | 0.40 | 0.40 | 0.60 | 0.60 | 0.217 |
| 14       | L/W=7;a/b=0.80;P=0.217 | 7   | 0.800 | 3.5 | 0.5 | 1.00 | 0.130 | 0.163 | 0.40 | 0.40 | 0.60 | 0.60 | 0.217 |
| 15       | L/W=3;a/b=1.25;P=0.217 | 3   | 1.250 | 1.5 | 0.5 | 0.33 | 0.163 | 0.130 | 0.07 | 0.07 | 0.27 | 0.27 | 0.217 |
| 16       | L/W=3;a/b=1.25;P=0.134 | 3   | 1.250 | 1.5 | 0.5 | 0.33 | 0.163 | 0.130 | 0.07 | 0.07 | 0.27 | 0.27 | 0.134 |
| 17       | L/W=3;a/b=1.25;P=0.096 | 3   | 1.250 | 1.5 | 0.5 | 0.33 | 0.163 | 0.130 | 0.07 | 0.07 | 0.27 | 0.27 | 0.096 |
| 18       | L/W=3;a/b=0.80;P=0.217 | 3   | 0.800 | 1.5 | 0.5 | 0.33 | 0.130 | 0.163 | 0.07 | 0.07 | 0.27 | 0.27 | 0.217 |
| 19       | L/W=3;a/b=0.80;P=0.134 | 3   | 0.800 | 1.5 | 0.5 | 0.33 | 0.130 | 0.163 | 0.07 | 0.07 | 0.27 | 0.27 | 0.134 |
| 20       | L/W=3;a/b=0.80;P=0.096 | 3   | 0.800 | 1.5 | 0.5 | 0.33 | 0.130 | 0.163 | 0.07 | 0.07 | 0.27 | 0.27 | 0.096 |

Tableau 1 : Paramètres géométriques des différentes configurations unitaires testées

### III RESULTATS ET DISCUSSION

#### III.1 Influence du nombre de cycles

Afin de statuer sur d'éventuels effets parasites dus au nombre réduit de cycles d'alvéoles ou à des effets de bords, 9 séries de tests ont été réalisés sur une configuration à 3 cycles, en obstruant successivement des demi alvéoles de manière à obtenir des configurations à nombre de cycles et à conditions de bords différentes. La Figure 2a présente les configurations testées avec le tableau des paramètres géométriques correspondants. Le nombre d'alvéoles d'entrée reste toujours identique au nombre d'alvéoles de sortie. Les chiffres romains correspondent aux 4 différents obturateurs qui permettent d'obtenir des configurations à nombre de cycles d'alvéoles différents, indiqué sous la configuration. La Figure 2b illustre la répartition des écoulements sur le PK-Weir avec 3 cycles en fonctionnement, vue de l'aval.



| Configurations   | 0 | I    | I, III | I, IV | IV   | II, IV | II   | II, III | III  |
|------------------|---|------|--------|-------|------|--------|------|---------|------|
| Nombre de cycles | 3 | 2.5  | 2      | 1.5   | 2    | 1      | 2    | 1.5     | 2.5  |
| L [m]            | 5 | 4.17 | 3.33   | 2.5   | 3.33 | 1.67   | 3.33 | 2.5     | 4.17 |

Figure 2: Configurations à nombre de cycles d'alvéoles et conditions de bords différents (a), photo depuis l'aval de la configuration à 3 cycles d'alvéoles (b) et tableau avec les caractéristiques géométriques des configurations testées

La Figure 3 présente la relation "Niveau-Débit spécifique" par unité de longueur  $L$  pour les différentes configurations testées. L'analyse montre clairement l'homogénéité des couples "Niveau-Débit" des différentes configurations à nombre de cycles d'alvéoles  $n$  différent. Cela signifie que la capacité spécifique d'évacuation d'une configuration de PK-Weir ne dépend pas du nombre de cycles d'alvéoles ni des effets de bords, qui peuvent alors être négligés dans l'analyse des résultats expérimentaux.

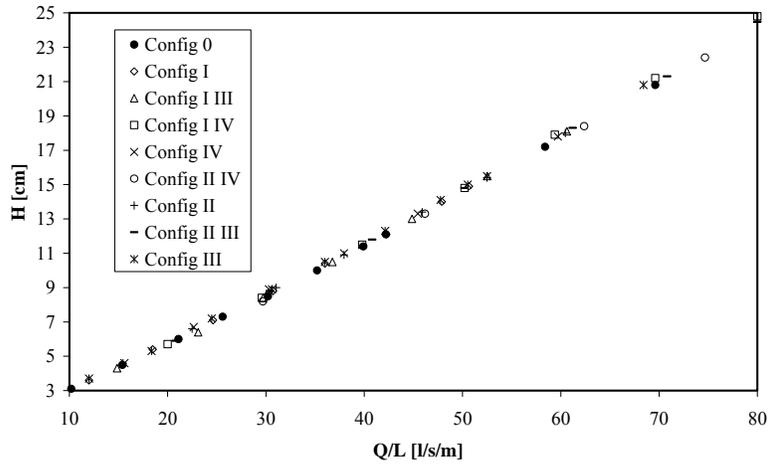


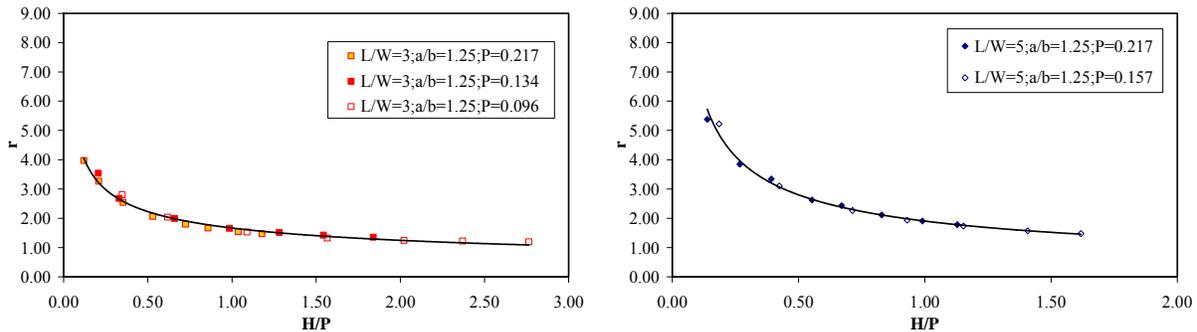
Figure 3: Charge hydraulique  $H$  en fonction du débit spécifique sur la longueur développée du PK-Weir pour les différentes configurations testées

### III.2 Influence du rapport $H/P$

Afin d'évaluer l'influence de la hauteur de pelle  $P$  sur la capacité hydraulique du PK-Weir, le rendement  $r$  (Eq. 1) est représenté en fonction de la charge adimensionnelle  $H/P$ , où  $H$  est la charge hydraulique de l'écoulement d'approche par rapport à la crête de déversement (Figure 1). Le rendement  $r$  exprime le rapport entre le débit évacué par le PK-Weir ( $Q_{PKW}$ ) et le celui d'un évacuateur en paroi mince de longueur de crête égale à la largeur  $W$  ( $Q_W$ ). Dans le présent travail,  $Q_{PKW}$  est mesuré sur modèle et  $Q_W$  est calculé théoriquement, en considérant un coefficient de débit  $C_d$  constant et égal à 0.42. En admettant un coefficient identique pour le PK-Weir, le rendement  $r$  exprime le rapport entre la longueur de crête effective du PK-Weir ( $L_{eff}$ ) et sa largeur ( $W$ ).

$$r = \frac{Q_{PKW}}{Q_W} = \frac{C_d L_{eff} \sqrt{2gH^2}^{\frac{3}{2}}}{C_d W \sqrt{2gH^2}^{\frac{3}{2}}} = \frac{L_{eff}}{W} \dots \dots \dots Eq. 1$$

Les résultats sont présentés sur la Figure 4a pour  $L/W=3$  et  $a/b=1.25$  et sur la Figure 4b pour  $L/W=5$  et  $a/b=1.25$ . Ils montrent que la hauteur des alvéoles est un paramètre influent sur la capacité de l'évacuateur mais que le ratio  $H/P$  permet d'homogénéiser cet effet.

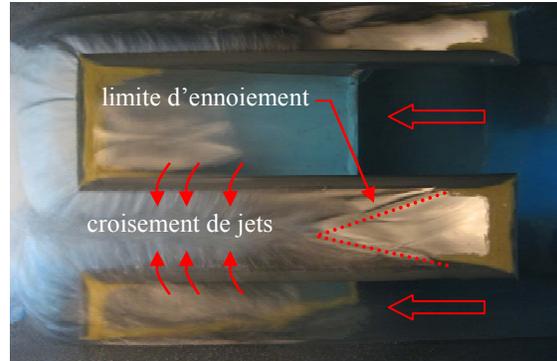
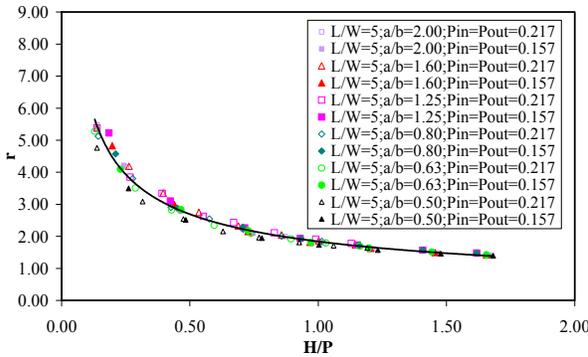


a) b) Figure 4: Rendement  $r$  vs.  $H/P$  pour les essais avec  $L/W=3$  et  $a/b=1.25$  (a) et avec  $L/W=5$  et  $a/b=1.25$  (b)

### III.3 Influence du rapport $a/b$

Pour évaluer indépendamment la sensibilité du rapport  $a/b$  sur la capacité d'évacuation du PK-Weir, les essais réalisés pour le ratio  $L/W=5$  ont été considérés. La représentation graphique de la Figure 5a, où les résultats obtenus avec les rapports  $a/b=2.00, 1.60, 1.25, 0.80, 0.63$  et  $0.50$  sont reportés, montre que :

- L'efficacité maximale est obtenue avec des ratios  $a/b \geq 0.8$  ;
- Pour  $a/b < 0.8$  la réduction de l'alvéole d'entrée ne permet pas de profiter de la capacité accrue de l'alvéole de sortie.
- La différence de fonctionnement entre les différentes configurations se réduit avec l'augmentation de  $H/P$ . Cela est dû à l'envoiment progressif de l'alvéole de sortie et à la rencontre des lames d'eau déversées latéralement (Figure 5b).



a)

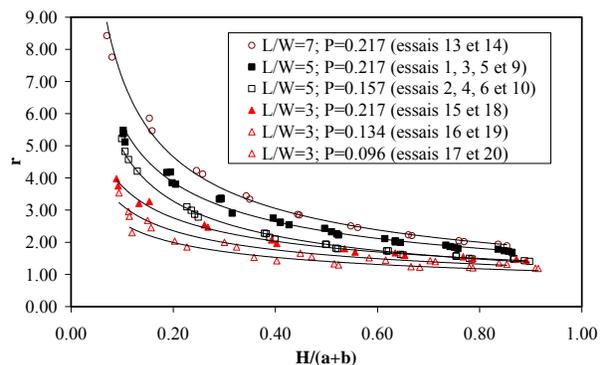
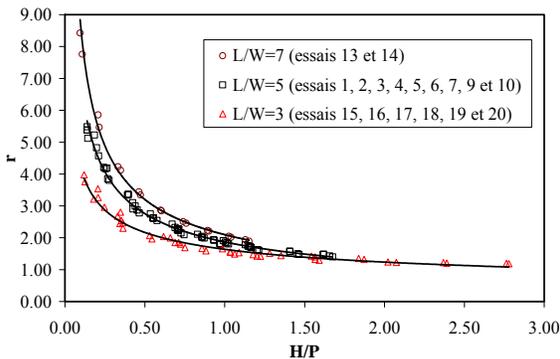
b)

Figure 5: Rendement  $r$  vs.  $H/P$  pour  $L/W=5$  et rapports  $a/b=2.00, 1.60, 1.25, 0.80, 0.63$  et  $0.50$  (a) et vue zénithale du PK-Weir en fonctionnement (b)

### III.4 Influence du rapport $L/W$

Afin d'évaluer la sensibilité du rapport  $L/W$  sur le rendement  $r$  et considérant que le ratio  $H/P$  permet d'homogénéiser les résultats obtenus avec  $L/W$  constant pour  $a/b \geq 0.8$  (Figure 4 et Figure 5a), les essais effectués avec des rapports  $L/W=3, 5$  et  $7$  pour des ratios  $a/b \geq 0.8$  ont été comparés. Comme précédemment, le rendement  $r$  est représenté pour les différents ratios  $L/W$  (Figure 6a). Il apparaît que l'influence de  $L/W$  est très importante pour les faibles charges, lorsque la quasi-totalité de la longueur de la crête contribue au déversement. Cette influence diminue progressivement avec l'augmentation de la charge. Ainsi, pour  $H/P=1$ , l'évacuateur  $L/W=7$  ne débite que 32% de plus que ceux de  $L/W=3$ , alors que ce rapport est d'environ 70% pour  $H/P=0.25$ .

Pour visualiser respectivement les effets de  $P$  et  $L/W$ , le rendement  $r$  est exprimé en fonction de  $H/(a+b)$  sur la Figure 6b. Cette représentation permet de confirmer l'influence prioritaire du ratio  $L/W$  et celle significative de la hauteur de pelle  $P$ . Il convient de remarquer ici que l'adimensionnalisation de la charge  $H$  par rapport  $a+b$  est purement factuelle car  $a+b$  est constant pour l'ensemble des essais.



a)

b)

Figure 6: Rendement  $r$  vs.  $H/P$  (a) et  $r$  vs.  $H/(a+b)$  (b) pour les configurations avec  $L/W=7, 5$  et  $3$  et rapports  $a/b \geq 0.80$

Les graphiques de la Figure 6 présentent la synthèse des configurations les plus efficaces, caractérisées par  $a/b \geq 0.8$ . Ils peuvent être utilisés dans le dimensionnement d'un PK-Weir, pour choisir le rapport  $L/W$ , la valeur de  $P$  et les valeurs de  $a$  et  $b$  adaptés aux conditions hydrauliques et constructives imposées.

#### IV CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le comportement hydraulique d'un évacuateur labyrinthe de type PK-Weir a été analysé sur la base d'essais expérimentaux systématiques. L'analyse paramétrique porte sur le nombre de cycles d'alvéoles, la relation entre la charge hydraulique et la hauteur de pelle, le rapport entre les largeurs des alvéoles d'entrée et de sortie et le rapport entre la longueur développée de crête et la largeur du PK-Weir. Les conclusions suivantes peuvent être établies :

- Pour les essais réalisés dans un canal avec des conditions d'approche identiques, le nombre d'alvéoles n'influence pas le débit spécifique par unité de longueur de crête. Ainsi, les résultats obtenus avec un cycle et demi d'alvéoles s'appliquent à des nombres de cycles plus élevés.
- Un rapport entre les largeurs des alvéoles d'entrée et de sortie  $a/b \geq 0.8$  est gage d'efficacité.
- Le rapport  $L/W$  est le paramètre le plus influent sur la capacité du PK-Weir. Toutefois, cette influence diminue rapidement avec l'augmentation de la charge par rapport à la pelle  $H/P$ .
- Pour un même ratio  $L/W$  et pour  $a/b \geq 0.8$ , le rendement  $r$  du PK-Weir ne dépend que de  $H/P$ .

Le dimensionnement d'un évacuateur optimal du point de vue hydraulique peut conduire à différentes configurations géométriques. La solution économiquement optimale doit être examinée de cas en cas, en fonction des contraintes locales.

#### V REFERENCES

- [1] Bieri, M., Leite Ribeiro, M., Boillat, J.-L., Schleiss, A.J. (2009). – Rehabilitation de la capacité d'évacuation des crues – intégration de PK-Weir sur des barrages existants, Colloque CFBR-SHF, Dimensionnement et fonctionnement des évacuateurs de crues. Paris, France.
- [2] Chi Hien, T., Thanh Son, H. and Ho Ta Khanh, M.(2006). “Results of some “Piano Keys” weir hydraulic model tests in Vietnam”. 22<sup>ème</sup> Congrès des Grands Barrages. Barcelona, Spain.
- [3] Laugier, F. (2007). - Design and construction of the first Piano Key Weir (PKW) spillway at the Goulours dam. *Hydropower & Dams*, Issue 5: 94-101.
- [4] Leite Ribeiro, M., Boillat, J.-L., Schleiss, A., Laugier, F., & Albalat, C. (2007). - Rehabilitation of St-Marc Dam - Experimental Optimization of a Piano Key Weir. Proceedings of the 32nd Congress of IAHR. Venice, Italy.
- [5] Leite Ribeiro, M, Bieri, M, Boillat, J.-L., Schleiss, A., Delorme. F., & Laugier F. (2009). - Hydraulic capacity improvement of existing spillways – Design of piano key weirs. 23<sup>ème</sup> Congrès des Grands Barrages. Brasília, Brésil.
- [6] Lempérière, F., & Ouamane, A. (2003). - The Piano Keys weir: a new cost-effective solution for spillways. *Hydropower & Dams*, Issue 5: 144-149.
- [7] Ouamane, A., & Lempérière, F. (2006). - Design of a new economic shape of weir. Proceedings of the International Symposium on Dams in the Societies of the 21st Century, 463-470, Barcelona, Spain.