

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département D'hydraulique.



Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Hydraulique

Thème :

Contribution à l'étude des déversoirs en touches de piano (PK-Weir)

Proposé et Dirigé par:

Pr OUAMANE Ahmed

Dr BENMAMAR Saadia

Réalisé par :

Melle DEKHILI Wahiba

Melle OUAMANE Romaila

Promotion juin 2012

10, Avenue Pasteur, BP N° 182 El Harrach Alger

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Avant tout nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage et nous avoir guidé pour pouvoir mener à bien ce modeste travail.

Nos sincères remerciements s'adressent au Laboratoire d'aménagements hydrauliques et de l'environnement de l'université Mohamed Khider de Biskra qui nous a ouvert un terrain de stage pour concrétiser notre formation d'ingénieur d'état en hydraulique, plus particulièrement Mr OUAMANE Ahmed, Mr BEN AISSA Sahraoui et Mr NOUI Abd Rahman et Mr OTHMANI Bassem qui nous ont été d'un précieux apport afin de mener à beau et à bien ce travail, et nous espérons être dignes de leur confiance.

Nous tenons à remercier Melle BENMAMER Sadiàa de nous avoir fait l'honneur de nous encadrer et pour sa disponibilité au cours de ces trois mois durant lesquels elle nous a orienté avec ses conseils judicieux, et ses critiques constructives.

Et nos remerciements les plus profonds à Mr OUAMANE Ahmed qui a accepté de nous encadrer, nous guider et orienter, et de nous avoir enrichi avec ses conseils et informations.

Un grand Merci au corps enseignants ainsi qu'à l'administration de l'Ecole Nationale Polytechnique ENP qui ont veillé sur notre formation et notre suivi durant tout le cursus d'étude.

Nous remercions également les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail.

Enfin nous adressons nos remerciements à tous ceux qui ont contribué par leurs conseils et leurs encouragements à l'aboutissement de ce travail, à nos deux familles et amis pour leurs aides et soutiens.

Dédicaces

A mes très chers parents, pour leur encouragement que Dieu les protège et puisse-t-il les rendre fiers de moi.

A mes deux adorables sœurs Almazia qui ma toujours soutenu, et la petite Razouna.

A mes frères El mehdi et Zakaria.

A mon cher mari Aymane que je remercie du fond du cœur pour son soutien, son encouragement et surtout son amour.

A tout mes amis : Aisha, hanane, Houda, Kafia, Lydia, Nassima, Saida , Saliha, soumia, Zaki, Hicham, Adel pour leur amitié, et à tout ceux que je n'ai pas cité, que j'aime et que je respecte.

A toi Wahiba chère binôme et amie, pour les inoubliables moments qu'on a passés ensemble surtout a Biskra.

A toute ma famille, spécialement ma grand-mère et mon grand-père symbole d'affection, ma charmante cousine Radia ainsi qu'a ma belle mère, mon beau-père et mes belles sœurs, et mon beau-frère.

A tous mes cousins et cousines que j'adore énormément.

A toutes les personnes qui me connaissent de près ou de loin.

Je dédie ce modeste travail.



...Romaila.

Dédicaces

Je dédie ce Travail :

A mes très chers parents que Dieu les protège

A mes Frères : Imad, Youcef & Anoir

*A mes deux Sœurs : Habiba et Sihem qui seront toujours présentes dans ma
pensée*

A mes nièces : Dounia, Salsabil et Maram

A toute ma famille

A mes chers amies : Khaoula, Salwa, Nadia , Imene & Majda.

*A mon binôme Romaila, avec qui j'ai passé des moments inoubliables ainsi qu'à sa
famille.*

A toute ma promotion 2012

A tous ceux qui m'aiment et qui me portent dans leurs cœurs.



...Wahiba

الملخص

يمثل المفيض عامل فعال بديل للسيطرة على الفيضانات. يتميز بطول قمته مقارنة بالمفيض المستقيم الذي له نفس العرض وهذا هو السبب في زيادة الخضم بنسبة معتبرة؛ تم تصميم مفيض مفاتيح البيانو في عدة أشكال هندسية بسيطة و متكررة ولهذا تعدد أشكاله و صعوبة فهم جريان الماء عليه لم تسمح بإيجاد شكل أمثل لإحتوائه.

تحقيقا لهذه الغاية، لقد ركز هذا العمل على دراسة الاستفادة من مفيض مفاتيح البيانو تجريبيا. وأظهرت هذه الدراسة أن جريان الماء على هذا المفيض تعتمد على مقاييسه الهندسية لتحديد خصائص هذا النوع من هذا المفيض التحليل البعدي للجريان أعطى قاعدة للتطوير الرياضي لعلاقات تسمح بتحديد أبعاد هذا المفيض .

الكلمات المفتاحية: المفيض, مفيض مفاتيح البيانو, الجريان, الخضم.

Résumé

Le Pkweir représente une alternative efficace pour la maîtrise des crues. Il est caractérisé par une longueur de crête plus longue que celle d'un déversoir rectiligne pour la même largeur d'emprise, ceci permet d'augmenter le débit d'une manière significative. Le déversoir en touche de piano est conçu sous plusieurs formes géométriques simples et répétitives. cependant, la diversité des formes du PK-Weir et la complexité de son écoulement n'ont pas permis la détermination d'une forme optimale que peut prendre ce type de déversoir.

A cet effet, le présent travail s'est intéressé à l'étude d'optimisation du déversoir en touche de piano par voie expérimentale. Cette étude a montré que l'écoulement sur le déversoir PK-Weir dépendant des différents paramètres géométriques qui caractérisent ce type de déversoir. L'analyse dimensionnelle de l'écoulement a donnée une base pour le développement mathématique de relations qui permettent le dimensionnement du déversoir en touche de piano.

Mots-clé : Déversoir, Déversoir en Touches de piano, Ecoulement, Débit.

Abstract

The Pkweir represents an effective alternative for flood control. It is characterized by a length crest longer than a straight weir for the same width grip, this can increase the rate significantly. The piano key weir is designed in several simple and repetitive geometric shapes. However, the diversity of the PK-Weir forms and the complexity of the flow did not allow the determination of an optimal form that can take this type of weir. To this end, this work has focused on the optimization study of the piano key weir experimentally. This study showed that the flow over the PK- Weir dependent to geometric parameters that characterize this type of weir. Dimensional analysis of the flow has given a basis for the development of mathematical relationships that allow the design of piano keys weir.

Key-word : weir, Piano Keys Weir, flow, Rate.

Sommaire

Introduction générale	2
-----------------------------	---

Première Partie

Etude bibliographique

CHAPITRE I : Déversoir rectiligne

1. Introduction	4
2. Définition d'un déversoir	4
3. Déversoirs rectiligne	5
3.1 Déversoir en mince paroi	5
3.1.1 Déversoir vertical	6
3.1.2 Déversoir incliné	9
3.1.3 Déversoir oblique	10
3.2 Déversoir à seuil épais	11
3.2.1 Déversoir à seuil épais à profil rectangulaire	11
3.2.2 Déversoir à seuil épais à profil triangulaire	11
3.3 Déversoir standard	12
4. Conclusion	13

CHAPITRE II : Déversoir non rectiligne

1. Introduction	15
2. Différentes formes des déversoirs non rectilignes	15
2.1 Déversoir en labyrinthe	15
2.2 Déversoir en hausses fusibles	19
2.3 Déversoir en touches de piano	22
3. Conclusion	23

CHAPITRE III : Déversoir en touches de piano

1. Introduction	25
2. Définition d'un déversoir en touche de piano	25
3. Fonctionnement hydraulique des PK-Weirs	26
4. Paramètres géométriques	27
5. Les deux types de PK-Weir proposés	28
5.1 PK-Weir Type (A).....	28
5.2 PK-Weir Type (B).....	28
6. Caractéristiques et performance hydrauliques du déversoir PK-Weir de type A	29
6.1 Rapport d'aspect vertical, W/P	29
6.2 Longueur relative, L/W	30
6.3 Impact de la largeur des alvéoles a et b	31
6.4 Impact des corps flottants	32
6.5 Impact de la longueur des porte-à-faux.....	33
7. Caractéristiques et performance hydrauliques du déversoir PK-Weir de type B.....	34
8. Conclusion	36

CHAPITRE VI : Analyse dimensionnelle

1. Introduction.....	38
2. Définition de la modélisation physique.....	38
2.1 Analyse dimensionnelle	38
2.2 Lois de similitude.....	40
2.2.1 Similitude géométrique	40
2.2.2 Similitude cinématique.....	40
2.2.3 Similitude dynamique	40
3. Analyse Dimensionnelle Appliquée Au PK-Weir	42
3.1 Configuration géométriques du Pkweir	42
3.2 Application du Théorème π de Buckingham au Pkweir	43
4. Conclusion	51

Deuxième Partie

Étude expérimentale sur modèle réduits

1. Introduction.....	53
2. Description de l'organisation expérimentale	53
2.1 Description de la station d'expérimentation	53
2.2 Protocole expérimental	56
3. Les différentes parties de l'étude expérimentale.....	56
3.1 Première série d'essais	56
3.2 Deuxième série d'essais	57
3.3 Troisième série d'essais	59
4. Instrumentation de mesure	60
4.1 Mesure des hauteurs d'eau	60
4.2 Mesure des débits.....	60
5. Interprétation et discussion des résultats expérimentaux	61
5.1 Étude de l'effet des guideaux sur la capacité d'évacuation	63
5.1.1 Ouverture des angles 0° et 15°	63
5.1.2 Ouverture des angles angle 27° , 30° et 33°	64
5.1.3 Ouverture des angles angle 60° et 45°	65
5.1.4 Choix du meilleur angle d'ouverture des guideaux du déversoir PK-Weir.....	66
5.2 Étude de l'effet de la forme en plan du PK-Weir sur la capacité d'évacuation	67
5.3 Effet des corps flottants sur l'écoulement au niveau des déversoirs (A standard, A1).....	70
6. Conclusion	72
 Conclusion générale	 75

Liste des figures

Figure I.01 : (A) : Déversoir dénoyé et (B) : déversoir noyé.....	5
Figure I.02 : Schéma d'un déversoir rectiligne.	5
Figure I.03 : Déversoir en mince paroi standard	6
Figure I.04 : Déversoir rectangulaire en mince paroi sans contraction latérale ...	7
Figure I.05: Déversoir rectangulaire en mince paroi avec contraction frontale ..	7
Figure I.06 : Déversoir triangulaire en mince paroi.....	8
Figure I.07: Coupe transversale d'un déversoir trapézoïdal	8
Figure I.08 : Coupe transversale d'un déversoir circulaire.....	9
Figure I.09 : Coupe longitudinale d'un déversoir incliné.....	9
Figure I.10 : Vue en plan d'un déversoir oblique	10
Figure I.11 : Déversoir à seuil épais	11
Figure I.12 : Coupe longitudinale d'un déversoir à seuil épais à profil rectangulaire.....	11
Figure I.13 : Vue en perspective d'un déversoir à seuil épais à profil triangulaire	12
Figure I.14 : Déversoir standard	12
Figure II.01 : Déversoir non rectiligne.....	15
Figure II.02 : Vue en perspective d'un déversoir labyrinthe	15
Figure II.03: Forme en plan du déversoir labyrinthe	16
Figure II.04 : Représentation typique des paramètres du déversoir en labyrinthe	17
Figure II.05: Schéma des hausses fusibles	20
Figure II.06 : Disposition des hausses fusibles	20
Figure II.07 : Hausse fusible fonctionne comme un barrage	21
Figure II.08: Hausse fusible fonctionne comme un déversoir	21
Figure II.09 : Alimentation de la chambre de mise en pression.	22
Figure II.10 : L'eau bascule la hausse.....	22
Figure III.01 : Représentation 3D d'un élément de déversoir en touches de piano et définition de ses paramètres géométriques	27
Figure III.02 : PK-Weir de type A	28
Figure III.03 : PK-Weir de type B	29
Figure III.04 : Variation du coefficient de débit en fonction h^*/P pour différents rapports de l'aspect vertical W/P	30
Figure III.05 : Variation du coefficient de débit en fonction h^*/P pour différents ratio L/W	31
Figure III.06 : Variation du Coefficient de débit en fonction h^*/P pour différentes largeurs relatives des alvéoles b/a	32

Figure III.07 : Coefficient de débit en fonction de la charge relative h^*/P en présence des corps flottants	33
Figure III.08 : Coefficient de débit en fonction de la charge relative h^*/P pour différentes longueurs des porte-à-faux	33
Figure III.09 : Comparaison des débits entre le PK-Weir et le déversoir Creager	34
Figure III.10 : Courbe de débit en fonction de la charge relative h^*/P pour différents ratio L/W	35
Figure III.11 : courbe de Coefficient de débit en fonction de la charge relative h/p pour différentes largeurs relatives des alvéoles	35
Figure IV.01 : Déversoir en clés de piano (Pk-weir)	42
Figure IV.02 : Vu en plan du déversoir en touche de piano(PK-weir)	43
Figure IV.03 : Vu en plan des guideau	44
Figure V.01 : Vue d'ensemble de la station d'expérimentation des modèles réduits.....	54
Figure V.02 : Shéma du dispositif expérimental (Vue en plan)	54
Figure V.03: Schéma du dispositif expérimental (Vue de profil).....	55
Figure V.04: Définition des paramètres du déversoir à écoulement libre et noyé.....	61
Figure V.05 : Variation du débit en fonction de h_* pour des angles d'ouverture des guideaux de 0° et 15°	63
Figure V.06: Variation du coefficient C_W en fonction de h_*/P pour des angles d'ouverture des guideaux de 0° et 15°	64
Figure V.07 : Variation du débit en fonction de h_* pour des angles d'ouverture des guideaux de 27° , 30° et 33°	64
Figure V.08 : Variation du coefficient C_W en fonction de h_*/P pour des angles d'ouverture des guideaux de 27° , 30° et 33°	65
Figure V.09: Variation du coefficient C_W en fonction de h_*/P pour des angles d'ouverture des guideaux de 45° et 60°	66
Figure V.10 : Variation du coefficient C_W en fonction de h_*/P pour des angles d'ouverture des guideaux de 15° , 27° et 60°	67
Figure V.11 : Variation du débit en fonction h^* pour différentes forme en plan (trapézoïdal, Triangulaire & A standard).....	69
Figure V.12 : Variation du coefficient de débit en fonction h^*/P différentes inclinaisons des guideaux (trapézoïdal, Triangulaire & A standard)	70
Figure V.13: Variation du débit en fonction h^* pour le type A1 avec et sans corps flottants...	71
Figure V.14 : Variation du débit en fonction h^* pour le type A avec et sans corps flottants...	72

Liste des tableaux

Tableau I.01 : Valeurs du coefficient β pour différentes valeurs de l'angle d'obliquité du déversoir.....	10
Tableau IV.01 :Symbole et dimension des quantités courantes en mécanique des fluides.....	39
Tableau VI.02 : Liste des paramètres et leurs dimensions.....	44
Tableau V.01 :Cractéristique géométrique des modèles réduits(A standard,A1)	58
Tableau V.02 :Cractéristique géométrique des modèles réduits (trapézoïdal, triangulaire).....	..59

Liste des photos

Photo II.01: Déversoir en touches de Piano de Goulours.....	23
Photo III.01: Écoulement en deux nappes déversante sur un cycle de Pkweir.....	26
Photo III.02: Fonctionnement du Pkweir avec encombrement de l'entrée par corps flottants.....	26
Photo V.01: Vue d'ensemble de la station d'expérimentation des modèles réduits.....	54
Photo V.02: Vue de l'aval de la station d'expérimentation.....	56
Photo V.03: Vue de haut des guideaux.....	57
Photo V.04: Vue de profil de guideaux.....	57
Photo V.05: Vue de l'amont du déversoir avec des guideaux.....	57
Photo V.06: PK-Weir type A standard.....	58
Photo V.07: PK-Weir type A1.....	58
Photo V.08: Fonctionnement du PK-Weir en présence des corps flottants.....	58
Photo V.09: PK-Weir de la forme en plan triangulaire.....	59
Photo V.10: PK-Weir de la forme en plan trapézoïdale.....	59
Photo V.11: Tableaux manométriques de mesure des niveaux d'eau.....	59
Photo V.12: Débitmètre à ultrason Flowmeter 93W2.....	60
Photo V.13: PK-Weir type A.....	67
Photo V.14: PK-Weir rectangulaire (A standard).....	68

Introduction générale

Introduction générale

Le changement climatique enregistré ces dernières décennies et la disponibilité des données hydrologiques de longues périodes ont incité les concepteurs et les gestionnaires des barrages à réévaluer les critères de sécurité des ouvrages hydrauliques. Ceci a eu comme incidence une augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes extrêmes. La question de la sécurité des ouvrages apparaît dès lors comme une priorité pour les gestionnaires, propriétaires et ingénieurs de conception des barrages. Ainsi, la révision des débits de crues extrêmes des ouvrages existants amène à une remise à niveau concomitante à la réhabilitation d'un grand 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 existants (type Creager). Cependant, le coût de tels ouvrages limite leur application et incite à chercher d'autres alternatives.

Dans cette optique, Hydrocoop - France et le Laboratoire Aménagements Hydrauliques et Environnement de l'université de Biskra en Algérie ont mis au point une nouvelle forme de déversoir permettant d'évacuer pour une même charge un débit plus important que les déversoirs traditionnels de type Creager. Le principe consiste à allonger la longueur de la crête déversante tout en conservant l'emprise du déversoir existant.

Ainsi est né le déversoir en touches de piano (Piano Key Weir or PK-Weir), tirant son nom des formes des alvéoles alternées.

Malgré les études et essais intensifs réalisés au laboratoire d'Aménagements Hydrauliques et Environnement (U. Biskra) depuis 2002 et les essais réalisés au LNH (EDF-France), au laboratoire HACH (U. Liège), au LCH (EPFL-Lausanne) et à l'université de Utah (USA), ce type de déversoir reste un vaste domaine de recherche, notamment pour mieux comprendre le principe de son fonctionnement hydraulique et l'impact des différents paramètres qui régissent l'écoulement sur ce type de déversoir.

Par conséquent, le présent travail de mémoire fin d'études se propose d'apporter une contribution à l'analyse de l'écoulement sur le PK-Weir par voie expérimentale pour déterminer l'effet de quelques paramètres géométriques sur la performance de ce type de déversoir.

Etant donné que le PK-Weir se caractérise par un nombre important de paramètres géométriques, l'analyse mathématique de l'écoulement sur ce type de déversoir paraît être complexe. Ainsi, pour réduire le nombre de paramètres géométriques une analyse dimensionnelle s'est avérée nécessaire. Les résultats de cette analyse nous ont permis de définir les paramètres adimensionnels. Ces derniers ont l'objet d'une analyse expérimentale. Du fait que certains paramètres adimensionnels ont fait l'objet d'analyse expérimentale, **une synthèse des études déjà faites. Une évaluation des paramètres qui ont influences principale et secondaire sur le déversoir,** sur le Ceci permettra certainement à mieux optimiser la forme du PK-Weir.

Chapitre I

État d'art sur les déversoirs rectilignes

Chapitre I

État d'art sur les déversoirs rectilignes

1. Introduction

Les évacuateurs de crues ont pour rôle d'assurer l'évacuation des crues exceptionnelles survenant à retenue pleine sans aucun risque de déversement sur la digue et sans créer d'érosion en aval du barrage.

Le coût d'un évacuateur peut être très important, il peut atteindre le tiers du coût de projet d'un barrage. Il est donc impératif de mettre en balance le coût de la digue, le coût de l'évacuateur, la probabilité de retour des crues et les dégâts provoqués, afin de choisir le type de digue et d'évacuateur de crues le plus économique et le risque admis de mauvais fonctionnement de ces ouvrages.

Une littérature scientifique et technique abondante a été consacrée aux déversoirs depuis plusieurs décennies afin d'explorer les différents caractères des déversoirs et de mieux comprendre le comportement de l'écoulement sur ces types d'ouvrages hydrauliques.

2. Définition d'un déversoir

Un déversoir est un dispositif qu'on utilise pour mesurer ou contrôler le débit s'écoulant dans les canaux. Un déversoir est essentiellement une paroi, mince ou épaisse, ayant une hauteur qui peut être variable. Il est disposé verticalement pour obstruer plus ou moins la section du canal.

- A l'amont, le niveau d'eau supposé constant s'abaisse sensiblement au dessus du seuil. On appellera charge : la hauteur d'eau entre le niveau amont constant et le niveau du seuil.
- A l'aval du seuil, la lame déversante peut prendre différentes formes, en liaison avec la charge et la hauteur d'eau à l'aval (*Carlier, 1980*).

Les déversoirs sont réalisés à travers les cours d'eau artificiels ou naturels et dans les retenues où la limitation d'un débit ou d'un niveau d'eau doit être assurée. Ils sont également utilisés en combinaison avec des organes mobiles, en particulier les vannes et les clapets installés sur leurs sommets.

Dans le cas d'un déversoir dénoyé, le débit déversé n'est dépendant que des conditions hydrauliques amont ; alors qu'un déversoir noyé fait intervenir en plus les conditions hydrauliques à l'aval de la crête déversante.

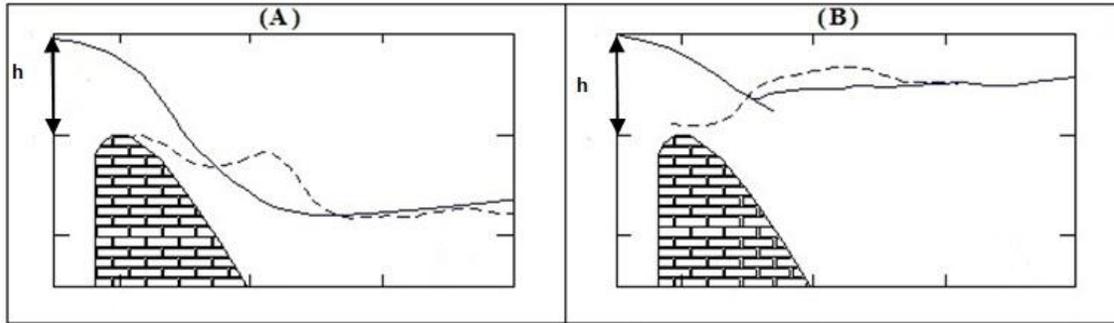


Figure I.01 : (A) : Déversoir dénoyé et (B) : déversoir noyé (*Vazquez*, 2000).

3. Déversoirs rectiligne

Lorsque le seuil d'un déversoir est en alignement rectiligne, ce type de déversoir est appelé déversoir rectiligne (figure I.02). Le débit qui transite sur un déversoir rectiligne est étroitement lié à la largeur du déversoir W et la charge sur le seuil h . Selon l'épaisseur de la crête, ce type de déversoir peut être en mince paroi où à seuil épais.

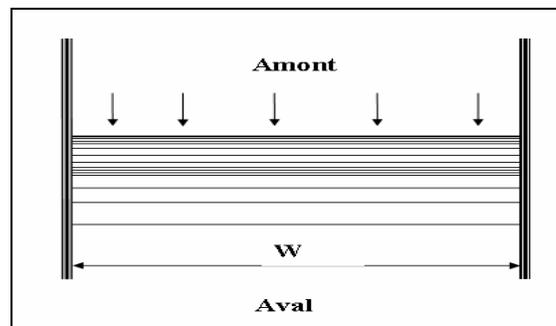


Figure I.02 : Schéma d'un déversoir rectiligne.

3.1 Déversoir en mince paroi

Le déversoir en mince paroi de largeur W permet de déterminer le débit Q en connaissant uniquement la hauteur d'eau à l'amont de l'ouvrage h . Ce type de déversoir constitue donc une structure qui permet la mesure du débit.

Si la paroi est placée verticalement dans un canal rectangulaire prismatique, la crête ayant la forme de la figure (I.03) et la nappe inférieure étant suffisamment aérée, cette structure est appelée déversoir en mince paroi standard. Un tel déversoir est caractérisé par la hauteur P du fond du canal jusqu'à la crête, sa largeur W et sa hauteur d'eau amont h (*Carlier*, 1980).

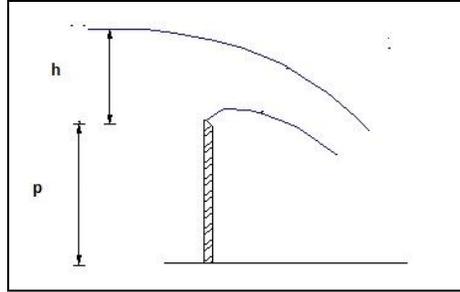


Figure I.03 : Déversoir en mince paroi standard (Vazquez, 2000).

3.1.1 Déversoir vertical

a) Déversoir rectangulaire

C'est le plus classique et celui qui a été le mieux étudié. Le déversoir normalisé est composé d'une échancrure rectangulaire, symétrique dans une mince paroi verticale. Toute la paroi doit être lisse et unie, surtout sur la partie amont. Elle doit être perpendiculaire aux parois et au fond du canal.

La crête du déversoir doit être une surface plane horizontale, perpendiculaire avec la face amont de la paroi du déversoir. L'intersection de ces deux surfaces doit être rectiligne et à arête vive.

Le débit du déversoir rectangulaire est égal à :

$$Q = \mu W h \sqrt{2gh} \quad (\text{I.01})$$

Où, μ est un facteur de correction, tel que : $C_d = \frac{2}{3}\mu$ (I.02)

Le coefficient de débit C_d du déversoir est déterminé par la relation empirique de **Rehbock** :

$$C_d = 0,4023 \left[1 + \frac{0,135h}{p} \right] \left[1 + \frac{0,0011}{h} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (\text{I.03})$$

➤ Déversoir rectangulaire sans contraction latérale

Un déversoir rectangulaire est dit sans contraction latérale lorsque la largeur d'écoulement sur le déversoir (W) est égale à la largeur d'écoulement en amont du déversoir (figure I.04).

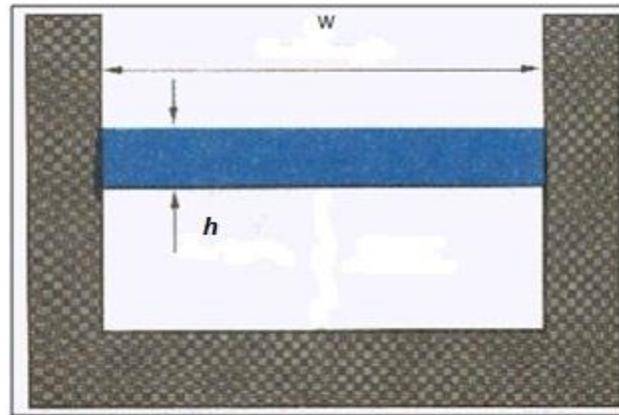


Figure I.04 : Déversoir rectangulaire en mince paroi sans contraction latérale

➤ Déversoir rectangulaire avec contraction latérale

Un déversoir rectangulaire est dit avec contraction latérale lorsque la largeur du canal est supérieure à la largeur d'écoulement W du déversoir (figure I.05).

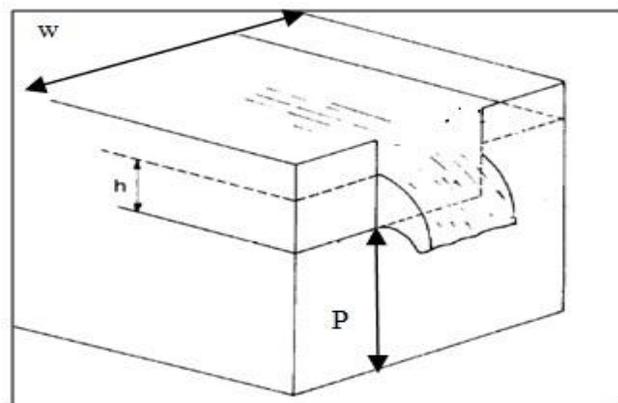


Figure I.05: Déversoir rectangulaire en mince paroi avec contraction frontale.

b) *Déversoir triangulaire*

Le déversoir triangulaire en mince paroi est un dispositif très précis pour les mesures de débits. Il doit être formé d'une échancrure en V symétrique, située dans une mince paroi verticale. La paroi du déversoir doit être lisse et plane (figure I.06). La formule générale du débit pour un déversoir triangulaire en mince paroi est :

$$Q = C_e \frac{8}{15} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \sqrt{2g} h_e^{2/5} \quad (\text{I.04})$$

Où, Q : débit (m^3/s) ; C_e : coefficient de débit ; g : l'accélération de la pesanteur (m/s^2) ; θ : l'angle formé par les parois de l'échancrure et h_e : charge piézométrique fictive ou hauteur de la surface liquide amont par rapport au point bas de l'échancrure (m).

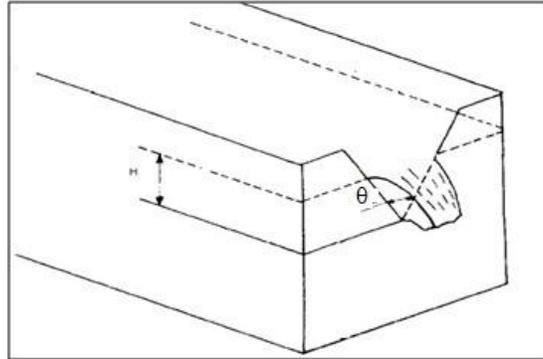


Figure I.06 : Déversoir triangulaire en mince paroi.

c) Déversoir trapézoïdal

Si l'échancrure du déversoir a la forme d'un trapèze, le déversoir est dit trapézoïdal (figure I.07). D'après **Gourley et Grimp** l'expression du débit pour une valeur quelconque de l'angle α d'inclinaison pour un déversoir trapézoïdal isocèle est donnée par la relation suivante :

$$Q = 1,32 h^{2,47} \operatorname{tg} \alpha + 1,96 w^{1,02} h^{1,47} \quad (\text{I.05})$$

Avec, w : largeur de la petite base du trapèze et α : L'angle entre la verticale et le côté du trapèze.

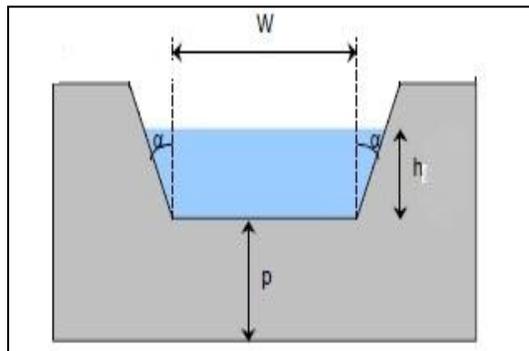


Figure I.07: Coupe transversale d'un déversoir trapézoïdal.

d) Déversoir circulaire

Ce type de déversoir (figure I.08) comporte une section d'écoulement à surface libre et présente les avantages suivants :

- simplicité et facilité d'exécution et de mise en place ;

- facilité de ventilation de la nappe ;
- une plus grande précision que le déversoir rectangulaire pour la mesure des petits débits.

D'après les résultats de *Stauss* et *Von Sanden* la formule générale du débit du déversoir circulaire est donnée généralement sous la forme suivante:

$$Q = \mu K d^{5/2} \quad (I.6)$$

avec, d' : diamètre d'ouverture (m) et K : fonction du degré de remplissage h/d ($m^{1/2}/s$).

L'Expression du coefficient K d'après la formule approximative de *Ramponi* est :

$$K = 3,203 \left(\frac{h}{d'} \right)^{1,975} - 0,842 \left(\frac{h}{d'} \right)^{3,78} \quad (I.07)$$

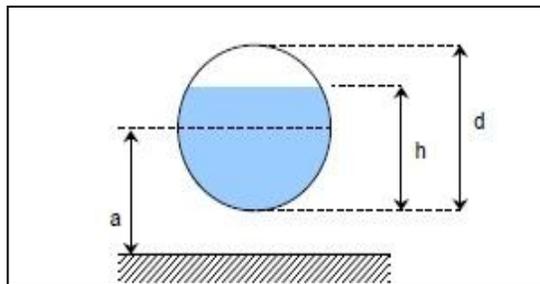


Figure I.08 : Coupe transversale d'un déversoir circulaire.

3.1.2 Déversoir incliné

Un déversoir incliné a une crête perpendiculaire à l'axe du canal, mais le plan qui le contient est incliné par rapport à la verticale (figure I.09).

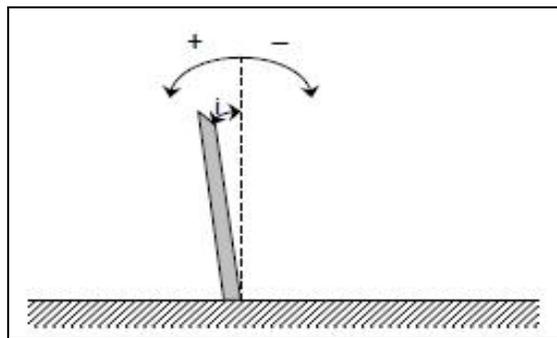


Figure I.09 : Coupe longitudinale d'un déversoir incliné.

L'expression du débit d'après *Poleni* pour un déversoir incliné est égal à :

$$Q = \mu_1 C_V L h^{\frac{3}{2}} \sqrt{2g} \quad (I.08)$$

où, C_v : coefficient de vitesse.

D'après la théorie de **Boussinesq**, le coefficient de débit de ce type de déversoir, μ_1 , est le produit du facteur de correction μ , valable pour un déversoir vertical, et d'un coefficient K' fonction de l'inclinaison du déversoir, tel que :

$$K' = 1 - 0,3902 \frac{i}{180} \quad (I.09)$$

L'angle i est compté positivement si le déversoir est incliné vers l'amont et compté négativement s'il est incliné vers l'aval.

3.1.3 Déversoir oblique

C'est un déversoir vertical dont la crête est disposée obliquement par rapport à l'axe longitudinal du canal dans lequel il est placé (figure I.10).

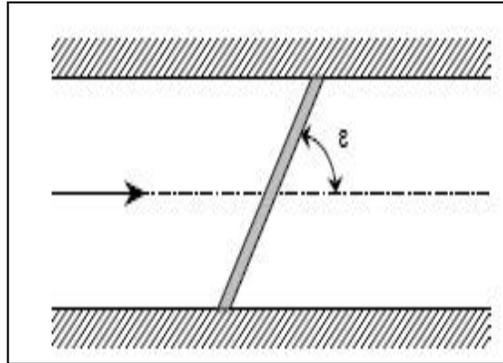


Figure I.10 : Vue en plan d'un déversoir oblique

Selon **Aichel**, le débit Q d'un tel déversoir est donné par la formule :

$$Q = \left[1 - \frac{h\beta}{p} \right] Q_n \quad (I.10)$$

Dans laquelle, Q_n : est le débit d'un déversoir de même largeur et de même type disposé perpendiculairement à l'axe longitudinal du canal ($\varepsilon = 90^\circ$) et β : fonction empirique sans dimension de l'angle ε .

Tableau I-01 : Valeurs du coefficient β pour différentes valeurs de l'angle d'oblicité du déversoir (**A. Lencastre**)

ε	β	ε	β	ε	β
$<15^\circ$	-	35°	0,298	60°	0,110
15°	0,691	40°	0,244	65°	0,084
20°	0,526	45°	0,200	70°	0,061
25°	0,420	50°	0,166	75°	0,048
30°	0,357	55°	0,139	90°	0

3.2 Déversoir à seuil épais

Le déversoir est considéré à seuil épais dans le cas où la largeur du seuil est suffisamment grande pour qu'elle assure une forme régulière de la nappe déversante le long du seuil. Dans un tel déversoir, les filets liquides sont parallèles et horizontaux au droit du seuil (figure I.11).

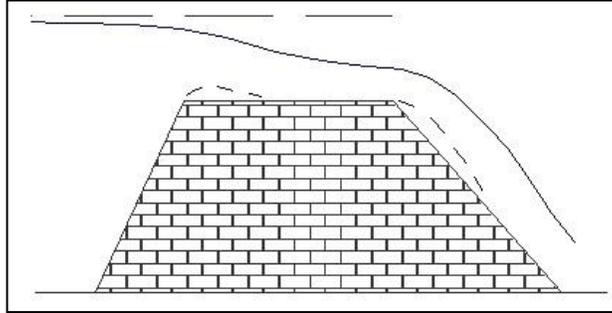


Figure I.11 : Déversoir à seuil épais.

La formule fondamentale pour calculer les débits des déversoirs à seuils épais est:

$$Q = C_e C_d W \sqrt{2gh}^{\frac{2}{3}} \quad (\text{I.11})$$

Où, Q : Débit évacué (m^3/s) ; C_d : Coefficient de débit ; C_e : Coefficient de correction ; W : Largeur du déversoir (m) ; h : Charge totale sur le déversoir (m) et g : Accélération de la pesanteur (m/s^2).

Les seuils épais peuvent être : à profil rectangulaire où à profil triangulaire.

3.2.1 Déversoir à seuil épais à profil rectangulaire

Le bloc déversant doit être placé dans un canal rectangulaire et les surfaces doivent être lissées. L'arête d'amont soit bien définie et que l'angle soit à 90° .

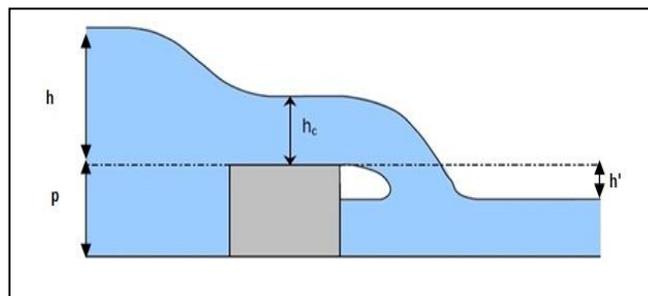


Figure I.12 : Coupe longitudinale d'un déversoir à seuil épais à profil rectangulaire.

3.2.2 Déversoir à seuil épais à profil triangulaire

Il y a parfois avantage à utiliser une section de contrôle triangulaire quand on se propose de mesurer une vaste gamme de débits. Les débits seront donnés avec une précision raisonnable même quand ils sont relativement faibles.

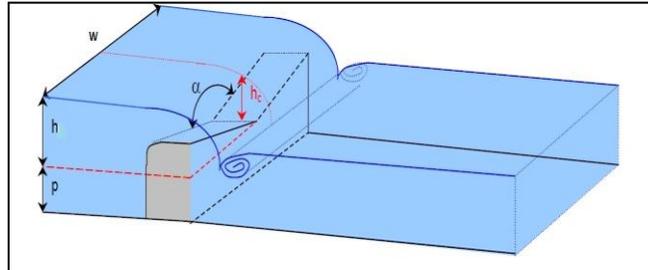


Figure I.13 : Vue en perspective d'un déversoir à seuil épais à profil triangulaire.

3.3 Déversoir standard

Le concept de déversoir standard consiste au développement d'un déversoir dont le parement aval épouse la géométrie de la nappe inférieure du déversoir en mince paroi afin d'éviter les zones de sous-pressions le long du radier. Ceci permet théoriquement d'avoir une pression égale à zéro le long du parement aval du déversoir standard (figure I.14).

Le débit est donné par la relation suivante en considérant (h) comme la charge mesurée à partir de la crête du déversoir standard :

$$Q = C_d W \sqrt{2gh}^{3/2} \quad (\text{I.12})$$

Avec, W : largeur du déversoir et C_d : est le coefficient de débit du déversoir standard qui dépend de la charge (h).

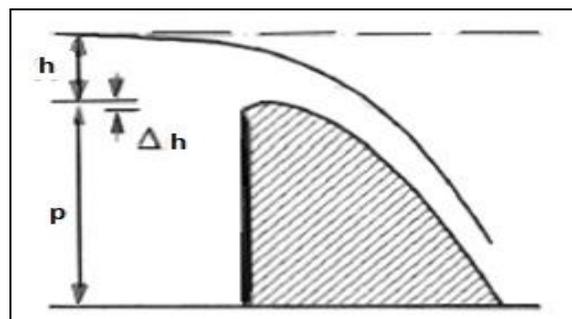


Figure I.14 : Déversoir standard

4. Conclusion

Cette état d'art a pour but de décrire le fonctionnement hydraulique des singularités de type déversoir et de recenser l'ensemble des travaux qui leur a été consacré, formules de débit notamment, afin de faciliter la compréhension de l'utilisation de ces ouvrages et de leur dimensionnement, ainsi que l'évaluation de leurs impacts.

Les différents types déversoirs rectilignes :

- Déversoirs à mince paroi ;
- Déversoirs à seuil épais ;
- Déversoirs standard.

Chapitre II

État d'art sur les déversoirs non rectilignes

Chapitre II

État d'art sur les déversoirs non rectilignes

1. Introduction

Les déversoirs non rectilignes sont caractérisés par un axe de crête discontinu en plan, ce qui permet d'avoir une longueur de crête plus importante que la largeur de l'emprise du déversoir. L'objectif est d'augmenter le débit par unité de largeur du déversoir pour une charge de fonctionnement donnée.

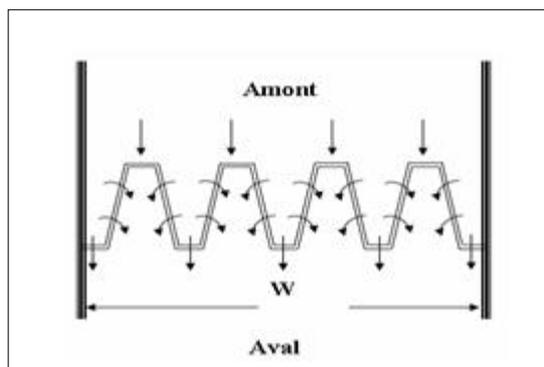


Figure II.01 : Déversoir non rectiligne.

2. Différentes formes des déversoirs non rectilignes

2.1 Déversoir en labyrinthe

a) Définition

La conception de déversoir en labyrinthe se base essentiellement sur la modification de l'alignement de la crête de la forme rectiligne à la forme d'alignement non rectiligne sous forme de lignes discontinues. Ce type de déversoir représente une structure idéale pour faire passer des fortes crues à des charges comparativement faibles. Il est souvent utilisé lorsque la largeur de l'emprise est limitée ou dans les conditions de charge maximale réduite.

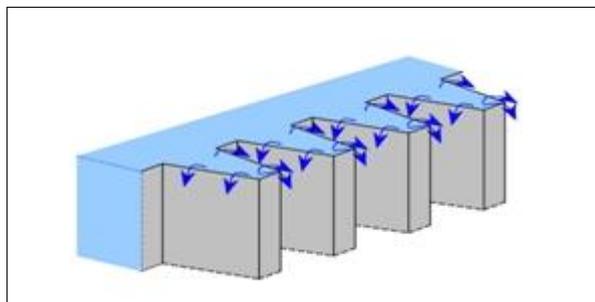


Figure II.02 : Vue en perspective d'un déversoir labyrinthe.

b) Géométrie du déversoir en labyrinthe

Les variations des formes en plan du déversoir en labyrinthe sont possibles, les formes les plus répandues sont les formes symétriques trapézoïdales, triangulaires, rectangulaires, curvilignes ou la combinaison de deux de ces formes.

Cependant, la forme trapézoïdale symétrique est considérée comme la forme la plus avantageuse à cause des facilités de construction et de sa performance hydraulique.

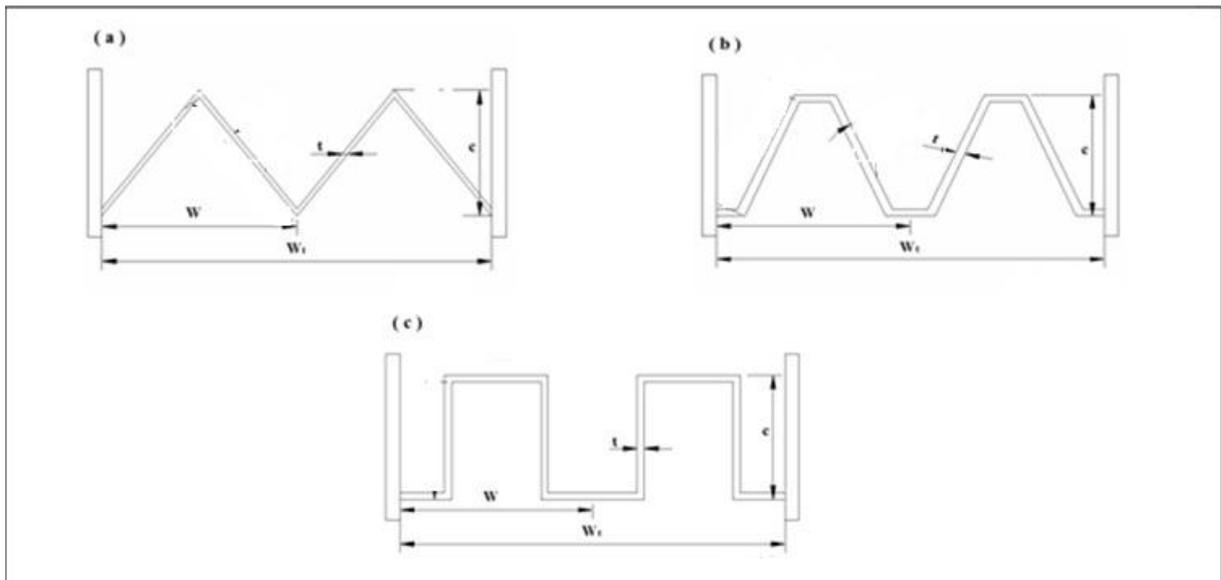


Figure II.03 : Forme en plan du déversoir en labyrinthe
(a) - triangulaire, (b) - trapézoïdale (c) - rectangulaire.

Pour un développement donné de la longueur, l'angle α varie de zéro pour une forme rectangulaire en plan à une valeur maximale pour une forme triangulaire.

La longueur et la largeur par cycle sont souvent combinées pour donner l'accroissement de la longueur L/W .

La géométrie verticale du déversoir en labyrinthe est généralement exprimée par le rapport de l'aspect vertical W/P .

Souvent, le déversoir en labyrinthe est composé de plusieurs cycles de même géométrie répétée périodiquement. Evidemment ceci augmente vivement la longueur en crête.

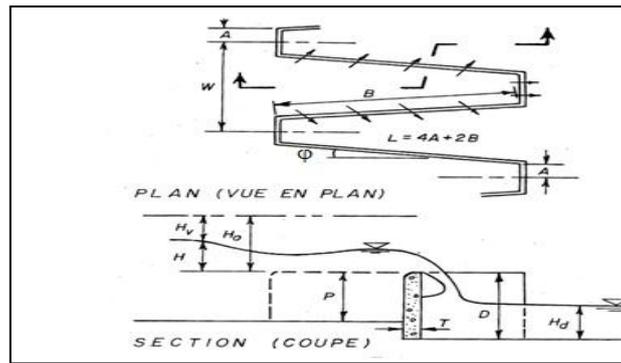


Figure II.04 : Représentation typique des paramètres du déversoir en labyrinthe.

φ : Angle du mur	A : Demi-longueur des parois frontales
W : Largeur de cycle	B : Longueur du mur latéral
l : Longueur d'un cycle de crête	P : Hauteur amont des parois
T : Épaisseur du mur	D : Hauteur aval des parois
H_0 : Charge totale de chute	H_v : Charge cinétique d'approche en amont
H : Hauteur piézométrique en amont	H_d : Hauteur piézométrique en aval.

c) *Choix de site et l'orientation du déversoir*

Tullis (1995) a considéré que l'emplacement du déversoir est plus important que son orientation, il doit être implanté aussi loin que possible en amont du réservoir. Un tel emplacement réduira les pertes de charges locales à l'amont parce que la contraction du secteur en amont du déversoir est immédiatement réduite. Quand l'emplacement du déversoir en labyrinthe a été déterminé, son orientation aux extrémités doit être considérée.

d) *Equation du déversoir en Labyrinthe*

La première relation mathématique qui exprime l'équation de débit pour un déversoir en labyrinthe a été déterminée par **Lux** et **Hinchliff** (1985) qui ont présenté des courbes de conception pour plusieurs types de déversoirs en labyrinthe. En combinant l'analyse dimensionnelle et expérimentale, les auteurs ont défini le coefficient du débit :

$$Q = C_w \left(\frac{W/P}{W/P + k_L} \right) W \sqrt{g} H_0^{3/2} \quad (\text{II-01})$$

Où, k_L : est une constante qui dépend de la forme polygonale, sa valeur est de 0,18 pour les formes triangulaires et de 0,1 pour les formes trapézoïdales ($A/W = 0,0765$).

D'après ces résultats, le coefficient de débit C_w sera en fonction de (H_0/P) et (L/W) aussi bien que (H_d/P) pour un modèle polygonal donné.

Tullis et al (1995) ont proposé une méthode pour concevoir un déversoir en labyrinthe qui utilise l'équation de base développée pour les déversoirs rectilignes :

$$Q = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2g} H_t^{3/2} \quad (\text{II-02})$$

où, C_d : coefficient de la crête de dimensionnement ; g : accélération de pesanteur ;

L : longueur efficace du déversoir et H_t : la charge totale sur la crête.

Selon *Tullis* (1995), la longueur efficace du déversoir est :

$$L = n (2L_1 + A + D) \quad (\text{II-03})$$

où, n : Nombre de cycle ; L_1 : Longueur d'une paroi latérale et D : Largeur de la paroi frontale amont.

La charge totale est normalement déterminée à une courte distance en amont du déversoir, elle est égale à la profondeur d'eau mesurée au-dessus de la crête plus la charge cinétique de la vitesse d'approche de l'écoulement au point de mesure. Le coefficient de débit est dépendant de (H/P) , l'épaisseur du mur (T), la configuration de la crête, et l'aération de la nappe.

La partie la plus importante des travaux de *Tullis* (1995) correspond à la détermination du coefficient de débit (C_d) pour la gamme complète des variables étudiées. Les coefficients de débit pour un déversoir en labyrinthe sont déterminés pour des angles qui varient de 6° à 35° . Les équations de régression [(II-04)-(II-11)] ont été déterminées pour la variation de (C_d) en fonction de (H_t/P) . Ces équations sont valides pour une largeur du sommet $t < A < 2t$; $H/P < 0,9$; $t = P/6$; la forme de la crête est en quart de cercle (sur le coté amont) et le rayon de courbure de la crête $R = P/12$.

$$C_d = 0,49 - 0,24(H_t/P) - 1,20(H_t/P)^2 + 2,17(H_t/P)^3 - 1,03(H_t/P)^4 \quad \varphi = 6^\circ \quad (\text{II-04})$$

$$C_d = 0,49 + 1,08(H_t/P) - 5,27(H_t/P)^2 + 6,79(H_t/P)^3 - 2,83(H_t/P)^4 \quad \varphi = 8^\circ \quad (\text{II-05})$$

$$C_d = 0,49 + 1,06(H_t/P) - 4,43(H_t/P)^2 + 5,18(H_t/P)^3 - 1,97(H_t/P)^4 \quad \varphi = 12^\circ \quad (\text{II-06})$$

$$C_d = 0,49 + 1,00(H_t/P) - 3,57(H_t/P)^2 + 3,82(H_t/P)^3 - 1,38(H_t/P)^4 \quad \varphi = 15^\circ \quad (\text{II-07})$$

$$C_d = 0,49 + 1,32(H_t/P) - 4,13(H_t/P)^2 + 4,24(H_t/P)^3 - 1,50(H_t/P)^4 \quad \varphi = 18^\circ \quad (\text{II-08})$$

$$C_d = 0,49 + 1,51(H_t/P) - 3,83(H_t/P)^2 + 3,40(H_t/P)^3 - 1,05(H_t/P)^4 \quad \varphi = 25^\circ \quad (\text{II-09})$$

$$C_d = 0,49 + 1,69(H_t/P) - 4,05(H_t/P)^2 + 3,62(H_t/P)^3 - 1,10(H_t/P)^4 \quad \varphi = 35^\circ \quad (\text{II-10})$$

$$C_d = 0,49 + 1,46(H_t/P) - 2,56(H_t/P)^2 + 1,44(H_t/P)^3 \quad H_t/P < 0,7 \text{ et } \varphi = 90^\circ \quad (\text{II-11})$$

La valeur de C_d ne varie pas considérablement avec les petites variations de (φ) . Par conséquent, chacune des équations peut être utilisée pour les angles près de ceux inscrits.

e) *Mode d'écoulement sur le Déversoir en Labyrinthe*

L'écoulement sur un déversoir en labyrinthe est compliquée et ne peut être expliqué qu'en termes de la charge locale présentée dans les alvéoles en amont, parce que le débit qui passe sur un déversoir augmente en fonction de la longueur de la crête et l'efficacité du déversoir n'est vérifiée que pour les faibles charges (*Hay et Taylor*, 1970). Pour cela il en résulte quatre phases fondamentales successives :

➤ *Phase complètement aérée*

L'écoulement s'amorce sous de très faibles charges en amont dont l'eau tombe librement sur toute la longueur de la crête du labyrinthe cette phase se caractérise par un écoulement complètement aérée, l'écoulement se caractérise par une mince épaisseur de la lame déversante et une profondeur d'eau en aval qui n'affecte pas la capacité d'évacuation du déversoir.

➤ *Phase partiellement aérée*

Cette phase se caractérise par le début d'interférence de la lame déversante, il en résulte ainsi une réduction du coefficient du débit. Le début d'interférence de la nappe déversante engendre un écoulement déprimé au niveau de la partie amont de la crête du déversoir, ceci définit le début de la phase partiellement aérée. Une poche d'air stable est formée le long de chaque paroi latérale et le sommet aval du labyrinthe.

➤ *Phase de transition*

La phase de transition est caractérisée par une lame alternée entre l'entraînement intermittent de l'air et l'écoulement ferme. Visuellement, il est difficile de faire la différence entre les phases partiellement aérées et de transition, mais la zone de transition peut être identifiée facilement comme une discontinuité dans la courbe du coefficient du débit.

➤ *Phase déprimée*

Cette dernière phase de l'écoulement aboutit finalement à la submersion complète du déversoir en labyrinthe, en limitant son efficacité. La submersion complète du labyrinthe se produit habituellement quand la profondeur d'eau sur la crête est plus grande que la hauteur du labyrinthe.

2.2 Déversoir en hausses fusibles

a) Définition

Le déversoir en hausses fusibles ou déversoir en labyrinthe fusible ont été inventés en 1989 par François Lempérière. Ce système est l'équivalent d'un tampon fusible, semblable à des hausses multiples placées sur la crête du déversoir. Elles ont la forme d'un déversoir en labyrinthe dans lequel chaque hausse représente un cycle du labyrinthe.

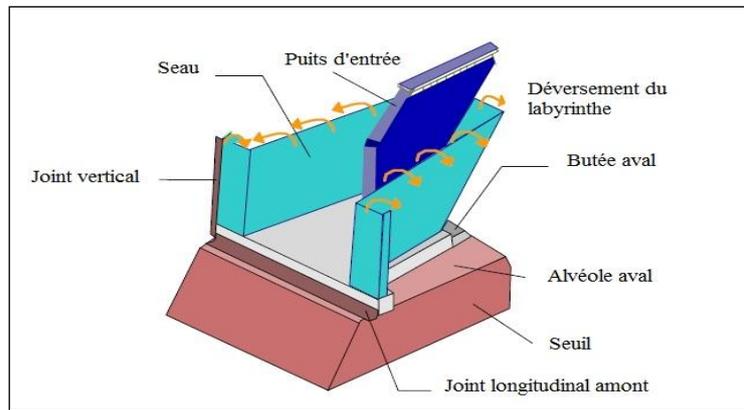


Figure II.05: Schéma des hausses fusibles.

Ce dispositif est composé par des éléments sous forme de vannes, chacune d'elles se compose de trois parties fondamentales, un godet fabriqué en métal ou en béton armé, une base et un puits d'admission qui est connecté à une chambre dans la base (Figure II.05).

L'accumulation d'eau de suintement dans la chambre de fond est évitée en prévoyant deux drains pour chaque chambre. L'étanchéité entre les hausses fusibles adjacentes est assurée par un joint plat en caoutchouc comme indiqué dans la figure II.05. Les joints sont seulement attachés à une des deux hausses adjacentes (*Degoutte*, 1992).

Les hausses fusibles peuvent augmenter la capacité de déversoir et le stockage de réservoir. Pour une installation sur un déversoir existant, une partie de la crête de type Creager est enlevée pour fournir une surface plane. L'augmentation de capacité de stockage exige que la crête des hausses fusibles soit placée au-dessus du niveau initial de la crête Creager.

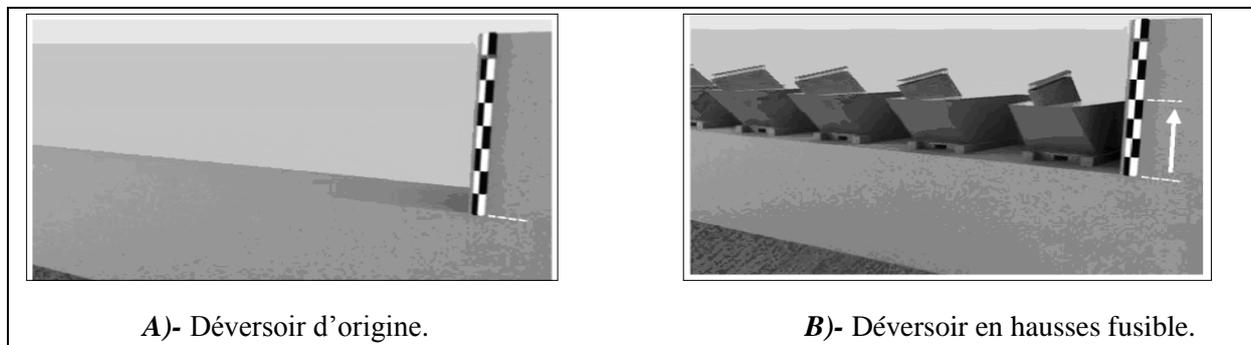


Figure II.06 : Disposition des hausses fusibles

Si le but de l'installation est seulement pour augmenter la capacité du déversoir, la crête des hausses fusibles doit être placée près du niveau initial de la crête Creager.

Les crues de dimensionnement des évacuateurs de crues sont parfois réévaluées après la construction du barrage. Les hausses fusibles offrent alors une solution économique, fiable et particulièrement adaptée pour la mise à niveau de la capacité de déversement des seuils pour une modification des crues de dimensionnement.

b) *Principe de fonctionnement des hausses fusibles*

Le principe des hausses fusibles consiste à obstruer le seuil sur une hauteur de l'ordre de 1 à 3 mètres par des éléments auto stables jusqu'à une certaine cote du plan d'eau amont et qui s'effacent automatiquement en cas de forte crue.

Selon le niveau d'eau dans la retenue, les éléments de rehausse fonctionnent comme un barrage, un déversoir, ou un fusible.

- Lorsque le niveau de l'eau est inférieur ou égal au niveau du seuil des hausses, celles-ci fonctionnent comme un barrage. Chaque élément est largement auto stable et résiste à la poussée hydrostatique grâce à son poids propre, au poids de l'eau contenue dans l'alvéole amont et à la butée en pied aval de la hausse.

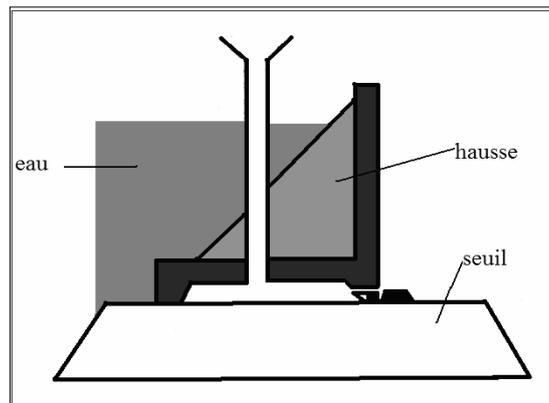


Figure II.07 : Hausse fusible fonctionne comme un barrage.

- Lorsque le niveau de l'eau s'élève au-dessus de la cote du seuil des hausses, celles-ci fonctionnent comme un déversoir à surface libre, jusqu'à une certaine épaisseur de lame d'eau, chaque élément reste largement auto stable comme dans la phase précédente.

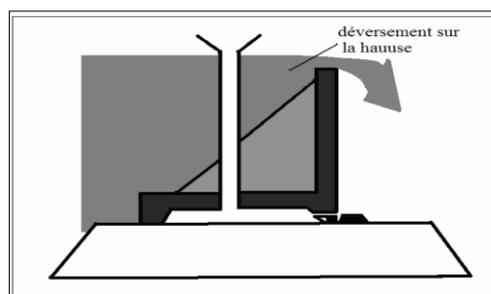


Figure II.08: Hausse fusible fonctionne comme un déversoir.

- En cas de fortes crues, au-delà d'une crue choisie, le niveau de l'eau atteint la cote d'entrée d'un puits par lequel l'eau pénètre dans une chambre à la base de l'élément. La sous-pression ainsi introduite sous l'élément modifie radicalement, ses conditions de stabilité et provoquent brutalement son basculement, libérant ainsi une brèche dans laquelle le niveau du seuil libre redevient celui du seuil initial dérasé.

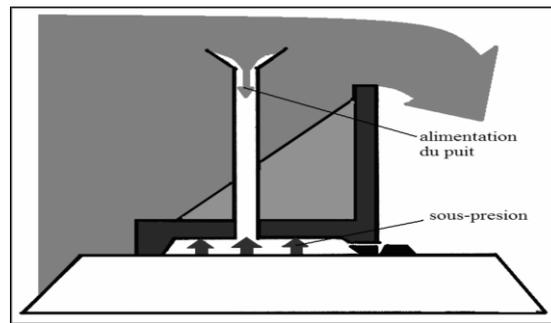


Figure II.09 : Alimenter la chambre de mise en pression.

Lorsque le seuil est équipé de plusieurs hausses, les cotes d'entrée des puits sont décalées de quelques centimètres, de façon à ce que les éléments puissent, si nécessaire, basculer les uns après les autres au fur et à mesure de la montée du plan d'eau. En cas de crue moyenne, un seul élément bascule, les autres restants en place.

- Lorsqu'un ou plusieurs éléments ont basculé, le niveau de la retenue s'établit à la fin de la crue au niveau du seuil initial dérasé. Il faut alors remplacer les éléments effacés afin de retrouver la pleine capacité de la retenue.

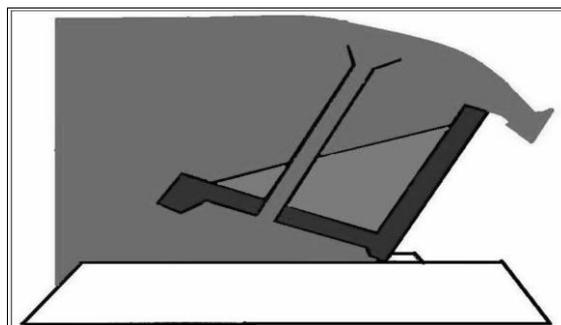


Figure II.10 : L'eau bascule la hausse.

2.3 Déversoir en touches de piano

Le déversoir en touches de piano peut être considéré comme une forme améliorée du déversoir en labyrinthe. Il peut être utilisé pour les nouveaux barrages ou pour les barrages existants qui nécessitent une augmentation de la capacité d'évacuateur 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 $100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

Des essais sur des modèles réduits physiques réalisés depuis l'année 2002 à l'université de Biskra (Algérie) ont permis de définir quelques formes qui sont basées sur :

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

Ainsi, deux types de déversoir en touches de piano ont été sélectionnés, le premier avec deux porte-à-faux amont et aval (type A) et le second avec seulement un seul porte-à-faux en amont (type B) (*Lempriere et Ouamanen*, 2006).



Photo II.1 : Déversoir en touches de Piano de Goulours.

3. Conclusion

Les différents travaux de recherche dans le domaine des déversoirs non rectilignes se sont intéressés à la configuration géométrique, le mode d'écoulement, et la performance hydraulique.

La géométrie en plan du déversoir non rectiligne est représentée par une ligne centrale discontinue, la discontinuité du seuil engendre un écoulement compliqué qui diffère de celui d'un déversoir rectiligne.

L'étude bibliographique a montré que l'écoulement sur un déversoir non rectiligne passe par quatre (04) phases importantes :

- Ecoulement complètement aéré pour les faibles charges ;
- Ecoulement partiellement aéré pour les charges relativement faibles ;
- Ecoulement de transition pour les charges moyennes ;
- Ecoulement déprimé pour les grandes charges.

Chapitre III

Déversoirs en touche de piano (PK-Weir)

Chapitre III

Les déversoirs en touches de piano

1. 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, de nombreux barrages existants requièrent une réhabilitation des évacuateurs de crues, en adéquation avec la capacité requise.

Récemment, un nouveau type d'évacuateur labyrinthe appelé « PK-Weir » (piano key Weir, ou déversoir en touche de piano) a été développé par Hydrocoop (France) en collaboration avec le laboratoire de développements hydrauliques et environnementaux de l'université de Biskra (Algérie) et le laboratoire national d'hydraulique et de l'environnement et d'électricité 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 barrage. Le premier exemple de ce type de déversoir a été construit par EDF sur le barrage de Goulours (France).

2. Définition d'un déversoir en touche de piano

Le déversoir en touches de piano représente une nouvelle forme de déversoir non rectiligne à écoulement libre. Ce type de déversoir a été baptisé Piano Key Weir en abrégé PK-Weir à cause de sa forme qui ressemble aux touches de piano. Cette nouvelle forme de déversoir développé par F. Lempérière et A. Ouamane (2003) représente une alternative économique et efficace pour l'évacuation des crues et l'accroissement de la capacité des retenues des barrages.

Ce nouveau type de déversoir multiplie le débit spécifique d'un déversoir Creager par trois ou plus pour la même largeur du déversoir et sous la même charge :

- Il réduit considérablement le coût de la construction de la plupart des nouveaux barrages ;
- Il Peut assurer la sécurité des barrages à faible coût ;
- Il Peut assurer le stockage ou l'efficacité de prévention des crues de plusieurs barrages existants ;
- Il Peut être placé sur des sections réduites de barrages poids existants ou nouveaux ;
- Il est structurellement simple et facile à construire avec les ressources locales de chaque pays ;
- Le PK-Weir peut être employé pour des débits spécifiques de 5 à 100 m³/s/m.

3. Fonctionnement hydraulique des PK-Weirs

D'après les essais effectués sur modèles réduits, l'écoulement sur les PK-Weir a été caractérisé par :

- Un déversement qui s'effectue directement par les extrémités des alvéoles amont et aval ;
- Une aspiration de l'eau par le fond, le long des murs bajoyers du déversoir à la manière d'un évacuateur latéral.

Il ressort que l'évolution du débit spécifique est égale à : $\alpha H\sqrt{P}$, pour H/P suffisamment grand.



Photo III.01 : Écoulement en deux nappes déversante sur un cycle de PKW.

On a ainsi mis en évidence que la géométrie des PK-Weirs permet une aération convenable des nappes d'eau. En effet, la présence des porte-à-faux favorise cette bonne aération.

Par ailleurs, il a fallu aussi vérifier l'influence de la présence des corps flottants ou les assemblages des glaçons sur l'écoulement normal de l'eau. C'est pourquoi, pour mieux connaître le comportement des PK-Weirs face à l'évacuation des corps flottants, il serait nécessaire de conduire une campagne d'essais spécifiques sur modèle réduit.



Photo III.02 : Fonctionnement du PKW avec encombrement de l'entrée par des corps flottants.

4. Paramètres géométriques

Le déversoir en touche de piano tire son nom de sa géométrie particulière, alternance d'alvéoles amont et aval, 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 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 et ainsi le coût global de l'ouvrage.

Les paramètres définissant la géométrie du déversoir (Figure III.01) sont : la hauteur des alvéoles (P), la largeur d'un cycle d'alvéoles (W), le nombre de cycle (n), la longueur du déversoir latéral (B), la largeur des alvéoles amont et aval (a et b) et la longueur des porte-à-faux amont et aval (c et d).

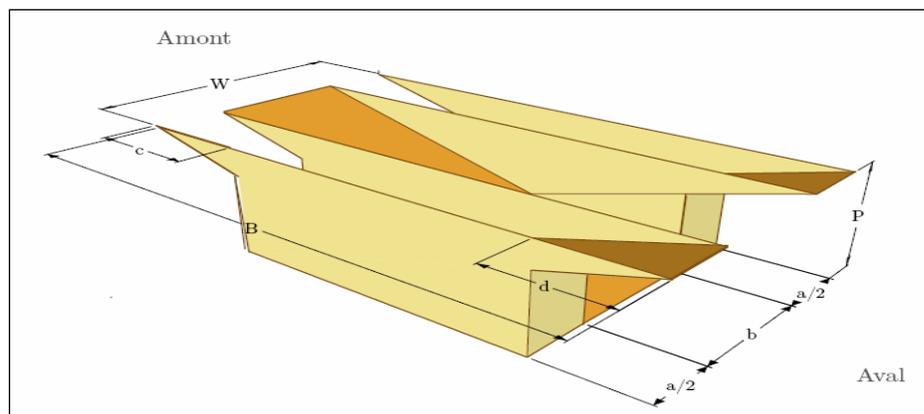


Figure III.01 : Représentation 3D d'un élément de déversoir en touches de piano et définition de ses paramètres géométriques.

5. Les deux types de PK-Weir proposés

Deux types de PK-Weir 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).

5.1. PK-Weir Type (A)

Les porte-à-faux amont et aval sont identiques. Ce type de PK-Weir peut être une solution pour l'amélioration de la capacité des retenues et/ou la capacité d'évacuation de plusieurs déversoirs des barrages existants (*Lempérière* et Al. 2003).

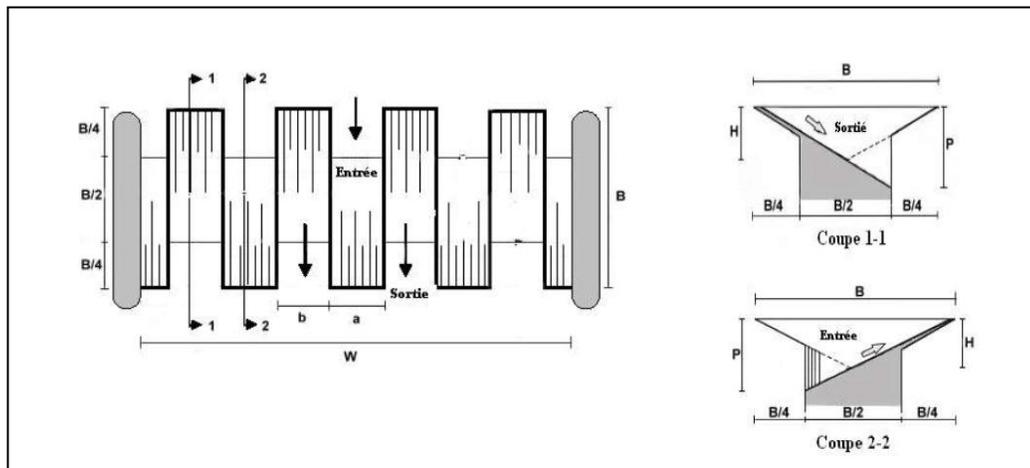


Figure III.02 : PK-Weir de type A.

5.2. PK-Weir Type (B)

Ce type de PK-Weir se caractérise par des porte-à-faux uniquement en amont, des gains importants en rendement, d'environ 10 % par rapport au type A sont enregistrés (*Ouamane*, 2006b). Les efforts structurels sont moins importants pour les grands débits spécifiques. Cela pourrait ainsi être le choix le plus attrayant pour plusieurs barrages futurs.

Cependant, Le type B est probablement plus intéressant pour les grands débits spécifiques (*Ouamane* et al, 2006c).

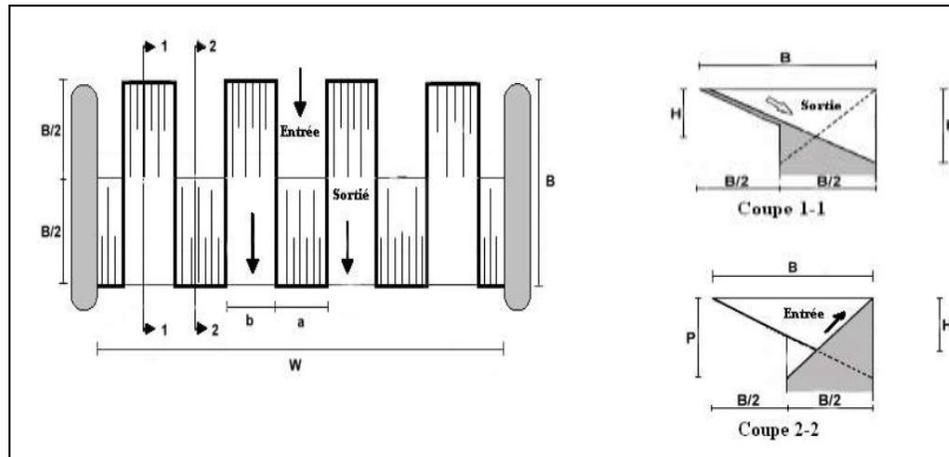


Figure III.03 : PK-Weir de type B.

6. Caractéristiques et performance hydrauliques du déversoir PK-Weir de type A

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 : H/P , a/b , L/W , c/d , W/P et n , où H est la charge sur le seuil et L sa longueur déversante développée.

Lors d'études préalables, La performance hydraulique du PK-Weir est en fonction des paramètres sans dimensions dérivant directement de la géométrie de conception et de la charge d'exploitation qui sont d'importance principale (Ouamane, 2006a).

La performance peut aussi être affectée par les paramètres d'importance secondaire résultant des détails de construction, comme la forme de la section de la crête, la forme d'entrée sous les porte-à-faux, et la présence des corps flottants.

Une couverture systématique des paramètres principaux et des paramètres secondaires a fait l'objet d'études sur modèles réduits physique de PK-Weir qui ont montrées l'effet de chaque paramètre sur le rendement de ce type de déversoir.

Les paramètres affectant particulièrement la performance hydraulique sont le ratio $n=L/W$, la largeur relative des alvéoles b/a la longueur relative des porte-à-faux c/d , le ratio de l'aspect vertical W/P et la charge relative H/P (Ouamane, 2006a).

$$C_w = f [W/P, L/W, b/a, c/d, h^*/P].$$

6.1 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.

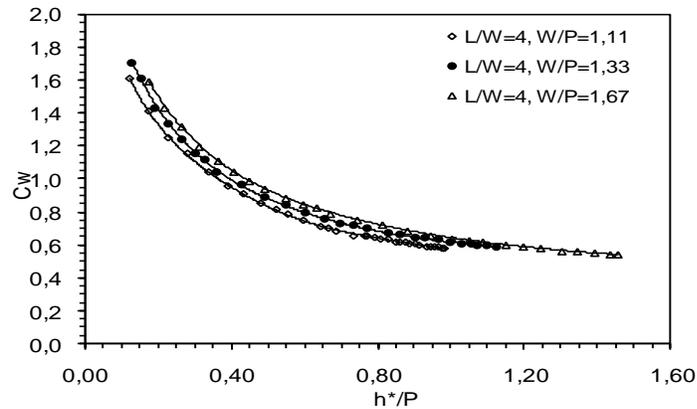


Figure III.04 : Variation du coefficient de débit en fonction h^*/P pour différents rapports de l'aspect vertical W/P (Ouamane, 2006b).

Les résultats des essais obtenus sur trois modèles de PK-Weir de même largeur de cycle et de hauteur différente indiquent que le coefficient de débit est dépendant du paramètre W/P . Autrement dit, la capacité d'évacuation est dépendante de la hauteur du PK-Weir.

6.2. 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 III.05) montre que l'augmentation dans l'accroissement de la longueur du PK-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 $h^*/H < 0,4$. Cependant, l'efficacité diminue remarquablement pour les charges relatives $h^*/H > 0,6$. 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 (Ouamane, 2006b).

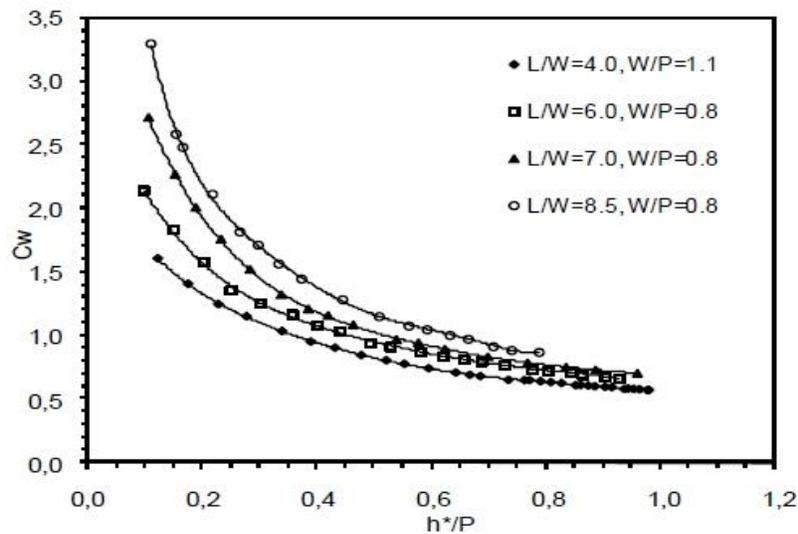


Figure III.05 : Variation du coefficient de débit en fonction h^*/P pour différents ratio L/W (Ouamane, 2006b).

6.3. Impact de la largeur des alvéoles a et b

La géométrie en plan du PK-Weir est caractérisée par deux alvéoles de forme rectangulaire, la première de largeur a orientée vers l'amont et la seconde 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.

La (figure III.06) fait remarquer que pour une même largeur d'un élément du PK-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 PK-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 (Ouamane, 2006b).

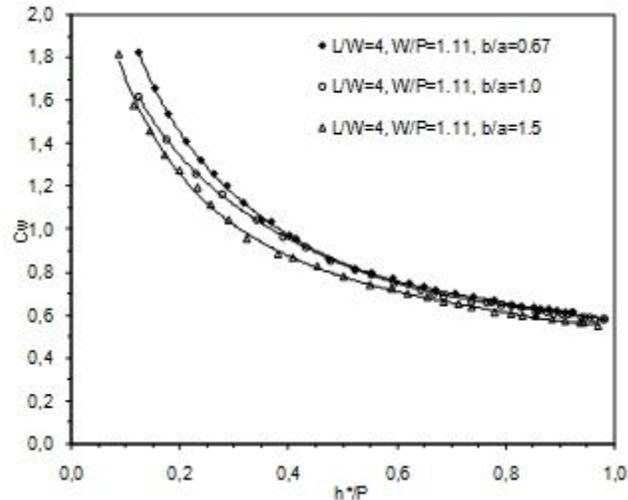


Figure III.06 : Variation du Coefficient de débit en fonction h^*/P pour différentes largeurs relatives des alvéoles b/a (Ouamane, 2006b).

6.4. Impact des corps flottants

Afin de vérifier le comportement du PK-Weir dans le cas de fonctionnement en présence des corps flottants, des essais ont été effectués dans des conditions d'encombrement extrême de l'entrée du déversoir.

Pendant les expériences qui ont été faites, 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 PK-Weir jusqu'à la crête. Pour les faibles charges les corps flottants sont entraînés dans les alvéoles aval et reste bloqués jusqu'à une charge moyenne de l'ordre de $0,4H$. Au-delà de cette charge les corps flottants commencent à être évacués systématiquement vers l'aval.

La (figure III.07) montre que l'impact des corps flottants se caractérise par une réduction du coefficient de débit pour des charges relatives $h^*/H < 0,5$, au-delà de cette valeur, l'écoulement redevient normal et le coefficient de débit prend des valeurs égales aux valeurs correspondant à 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 le déversoir Creager).

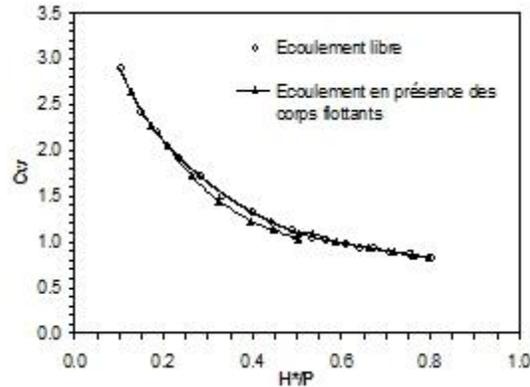


Figure III.07 : Coefficient de débit en fonction de la charge relative h^*/P en présence des corps flottants.

6.5. 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, la seconde avec des porte-à-faux amont et aval identiques et la dernière configuration avec seulement des porte-à-faux amont. Il a été remarqué 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. 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, A cet effet, le modèle sans porte-à-faux aval peut être une solution pour les grands débits spécifiques (*Ouamane, 2006b*).

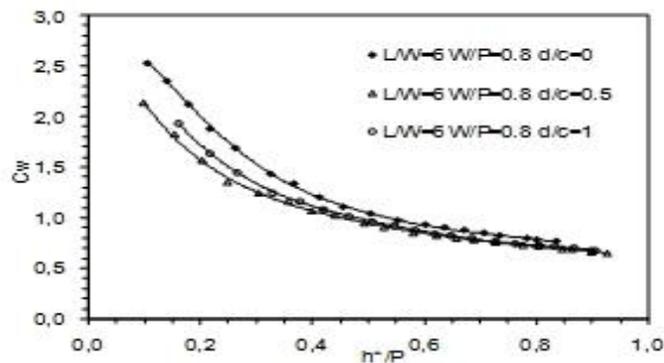


Figure III.8 : Coefficient de débit en fonction de la charge relative h^*/P pour différentes longueurs des porte-à-faux (*Ouamane, 2006b*).

Le débit spécifique du PK-Weir est comparé ci-dessous au débit du déversoir standard de type Creager en fonction de la profondeur de la lame déversante h .

Le débit spécifique d'un déversoir Creager est près de $2,2h^{1,5}$ ($m^3/s/m$).

Le débit spécifique d'un PK-Weir est près de $1,7nh^{1,5}$ pour $h < 0,3H$.

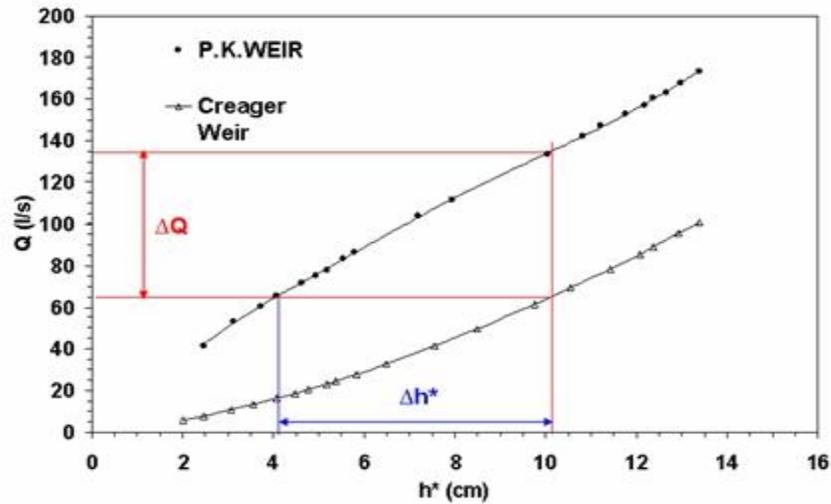


Figure III.9 : Comparaison des débits entre le PK-Weir et le déversoir Creager (*Ouamane* 2006c).

Pour les grandes valeurs de h et de n près de 5, le débit spécifique est de l'ordre de $4hH^{0.5}$.

7. Caractéristiques et performance hydrauliques du déversoir PK-Weir de type B

Le PK-Weir de type B a fait l'objet d'une étude détaillée au Laboratoire Aménagements Hydrauliques et Environnement (Université de Biskra) pour définir la forme optimale de ce type de PK-Weir. Ce travail qui a été réalisé par *Noui* dans le cadre de préparation du Magister (2007) a permis de déterminer l'impact des différents paramètres géométriques sur la performance de ce type de déversoir. Cette étude a montré que l'effet du ratio L/W n'apparaît pas pour les faibles pentes des radiers des alvéoles, par contre si les pentes des radiers sont raides, l'effet du ratio L/W est très apparent.

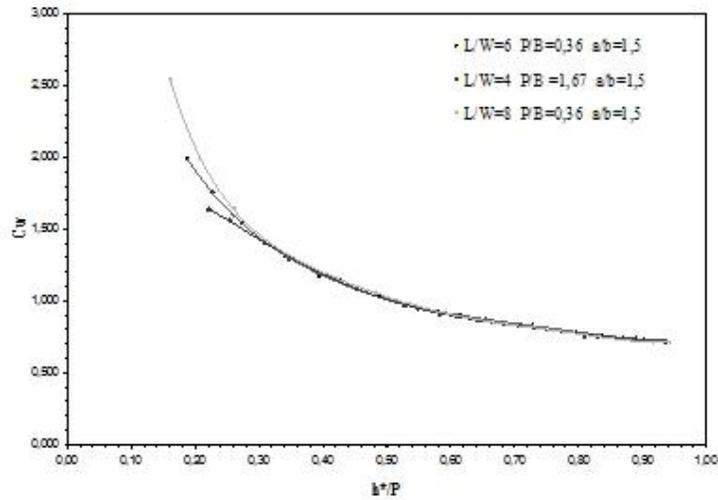


Figure III.10 : Courbe de débit en fonction de la charge relative h^*/P pour différents ratio L/W (Noui, 2007).

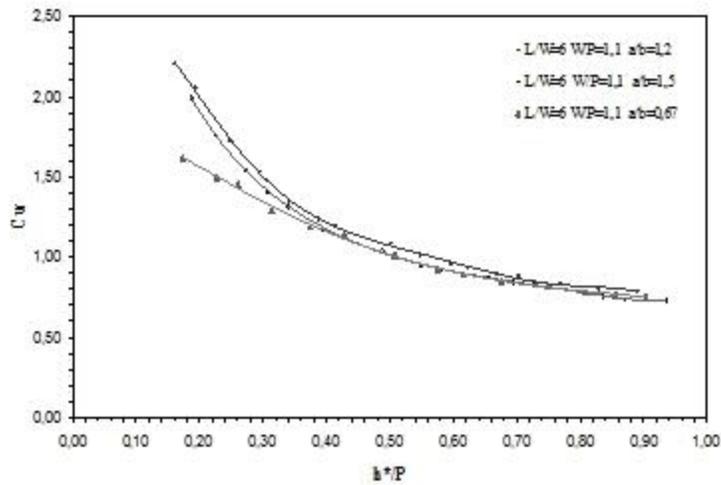


Figure III.11 : courbe de Coefficient de débit en fonction de la charge relative h/p pour différentes largeurs relatives des alvéoles (Noui, 2007).

Le travail de Noui a montré aussi que le meilleur rendement est obtenu pour une largeur de l'alvéole amont égale à 1,2 fois la largeur de l'alvéole aval.

8. Conclusion

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

La réhabilitation des barrages existants impose fréquemment une augmentation de leur capacité d'évacuation. Dans de nombreuses situations, le PK-Weir offre une solution compacte et efficace. La conception et la réalisation de tels ouvrages représentent un défi pour l'ingénieur en raison de la multiplicité des conditions locales rencontrées.

Chapitre IV

Analyse dimensionnelle appliqué au déversoir PK-Weir

Chapitre IV

Analyse dimensionnelle appliquée au déversoir PK Weir

1. Introduction

L'objectif de ce travail étant l'étude du déversoir en touche de piano, afin de mieux comprendre l'influence des guides d'eau et quelques paramètres géométriques sur le rendement de ce type de déversoir et de proposer une méthode de prédimensionnement de cette ouvrage. Ceci ne peut être réalisable que par une combinaison d'analyse dimensionnelle et expérimentale. A cet effet, une analyse dimensionnelle est nécessaire pour déterminer les paramètres adimensionnels qui régissent l'écoulement sur ce type de déversoir.

2. Définition de la modélisation physique

La modélisation signifie la représentation d'un objet destinée à la simulation de son comportement, elle se caractérise par deux principaux outils qui sont :

- Analyse dimensionnelle ;
- Similitude physique.

2.1 Analyse dimensionnelle

L'analyse dimensionnelle est un outil théorique servant à interpréter les problèmes à partir des dimensions des grandeurs physiques mises en jeu.

Théorème de Vashy Buckingham ou théorème des π

Ce principe de base est traduit par le théorème de Vashy- Buckingham ou théorème des π que l'on peut énoncer ainsi :

« Toute fonction G de p variables indépendantes x_1, x_2, \dots, x_p , mesurées par q unités fondamentales, et traduisent la variation d'un phénomène on fonction de p causes indépendantes, où $p > q$, s'exprime nécessairement à partir d'une relation fonctionnelle de la forme :

$$G = x_1^{g_1} x_2^{g_2} \dots x_q^{g_q} F(\pi_{q+1}, \pi_{q+2}, \dots, \pi_p) \quad (\text{IV.1})$$

Les variables x_1, \dots, x_p étant choisies dimensionnellement indépendantes et les $(\pi_{q+1}, \dots, \pi_p)$ sont des nombres sans dimension construits à partir des paramètres (x_i) . En général, le choix des (x_1, \dots, x_q) est fait parmi les paramètres que l'on juge comme essentiels dans la description du phénomène physique étudié » (Lencastre, 1983).

L'analyse dimensionnelle consiste à suivre les étapes suivantes :

1. Lister les n paramètres du problème ;

2. Exprimer les dimensions de chaque paramètre en utilisant les dimensions de base, (M, L, t, θ). Compter le nombre des dimensions de base utilisé, (j'), dans l'ensemble des paramètres considérés ;
3. Trouver le nombre (j) en supposant initialement ($j = j'$) et chercher les paramètres répétés qui ne forment pas un produit (π).
4. Choisir (j) paramètres répétés qui ne forment pas le produit (π) ;
5. En choisissant les paramètres non répétés et les mettant ensemble avec les paramètres répétés, ceci permet de former les produits (π) ;
6. Trouver algébriquement les puissances de chaque paramètre répété pour faire les produits (π) sans dimension ;
7. Écrire la combinaison des produits (π) afin de déterminer une forme de fonction :

$$\pi_k = f(\pi_1, \pi_2, \dots \pi_i)$$

Tableau IV.1 : Symbole et dimension des quantités courantes en mécanique des fluides.

Grandeurs physiques	Unité du système International (S.I)	Dimensions En Kg, m et s	Dimensions en L M et T
Longueur	Mètre (m)	m	L
Surface		m ²	L ²
Volume		m ³	L ³
Angle		Sans unité	1
Masse	Kilogramme (Kg)	Kg	M
Temps	Seconde (S)	S	T
Vitesse		m.S ⁻¹	LT ⁻¹
Accélération		m.S ⁻²	LT ⁻²
Force	Newton (N)	Kg.m.S ⁻²	MLT ⁻²
Pression	Pascal (Pa)	Kg.m ⁻¹ .S ⁻²	ML ⁻¹ T ⁻²
Énergie	Joule (J)	Kg.m ² .S ⁻²	ML ² T ⁻²
Puissance	Watt (W)	Kg.m ² .S ⁻³	ML ² T ⁻³
Fréquence	Hertz (HZ)	S ⁻¹	T ⁻¹

2.2 Lois de similitude

Pour tout système, les résultats des mesures expérimentales sur le modèle ne sont transposables au prototype que si les données définissant les problèmes posés satisfont à un certain nombre de relations. Ce sont les conditions de similitude physique :

On distinguera les similitudes :

- Géométrique;
- Cinématique ;
- Dynamique.

2.2.1 Similitude géométrique

Le modèle est géométriquement semblable au prototype si les dimensions linéaires homologues du modèle (L_2) et du prototype (L_1) sont dans le rapport de l'échelle du modèle λ définie par :

$$\lambda = \frac{L_2}{L_1}$$

2.2.2 Similitude cinématique

Il existe une similitude cinématique entre le modèle et le prototype si la trajectoire des particules équivalentes est géométriquement semblable et si les rapports de vitesse et accélération des particules équivalentes sont égales :

Il existe une similitude cinématique entre le modèle et le prototype si la trajectoire des particules équivalentes est géométriquement semblable et si les rapports de vitesse et accélération des particules équivalentes sont égales à :

$$\lambda_v = \frac{\lambda}{\lambda_t}$$

Et :

$$\lambda_a = \frac{\lambda}{\lambda_t^2}$$

λ_t étant l'échelle des temps est définie par :

$$\lambda_t = \frac{t_2}{t_1}$$

où, t_1 : temps mis à parcourir la distance L_1 dans le prototype ; t_2 : temps mis à parcourir la distance L_2 homologue de L_1 dans le modèle ; λ_v : échelle des vitesses et λ_a : échelle des accélérations.

2.2.3 Similitude dynamique

Les mouvements du liquide dans le prototype et dans le modèle sont provoqués par des forces.

Pour que le modèle et le prototype soient dynamiquement semblables, il est nécessaire que toutes les forces agissant en des points homologues soient dans le même rapport.

Les principales forces qui interviennent dans les écoulements sont les forces d'inertie, de turbulence, de pesanteur, de viscosité et les forces de capillarité.

Suivant la nature de l'écoulement considéré, ces catégories de forces interviennent d'une manière plus au moins importante. Il est à noter que les forces d'inertie ne peuvent jamais être négligées en raison qu'il y a toujours une masse liquide en mouvement, les conditions du problème traité permettent souvent, pour les autres catégories de force, d'en négliger certaines par rapport à d'autres.

2.2.3.1 Similitude de Reech-Froude

La similitude de Reech-Froude se repose sur la considération que les forces d'inertie, de turbulence et de pesanteur soient seules à intervenir dans le système hydraulique objet d'étude dans le modèle et le prototype. Cette considération amène à annoncer que le rapport des vitesses λ_v déjà défini soit égal à la racine carrée du rapport des longueurs λ (échelle du modèle) :

$$\lambda_v = \sqrt{\lambda}$$

$$\text{d'où : } \lambda_q = \lambda^{\frac{5}{2}}$$

avec, λ_q : échelle des débits.

La condition de similitude de Reech-Froude revient à réaliser un écoulement possédant le même nombre de Froude aux points homologues du modèle et du prototype. Ce nombre est désigné par F_r et il est défini par :

$$F_r = \frac{v_2}{\sqrt{gL_2}} = \frac{v_1}{\sqrt{gL_1}} = \text{constante}$$

où, v_1, v_2 : sont respectivement les vitesses d'écoulement dans le prototype et le modèle et L_1, L_2 : sont respectivement les dimensions linéaires dans le prototype et le modèle.

2.2.3.2 Similitude de Reynolds

Seules les forces d'inertie, de turbulence et de viscosité sont à considérer dans ce type de similitude.

$$\text{La condition de similitude de ces forces impose que : } \frac{\lambda \lambda_v}{\lambda_v} = 1$$

où, λ_v : est le rapport du coefficient de viscosité cinématique ν_2 dans le prototype et le coefficient de viscosité cinématique ν_1 dans la modèle.

Le nombre de Reynolds désigné par R_e sera défini alors par :

$$R_e = \frac{L_2 v_2}{\nu_2} = \frac{L_1 v_1}{\nu_1} = \text{constante}$$

v_1, v_2 : sont respectivement les vitesses d'écoulement dans le prototype et le modèle ; L_1, L_2 : sont respectivement les dimensions linéaires dans le prototype et le modèle.

Ce qui revient à dire que le nombre de Reynolds caractérisant l'écoulement objet d'étude doit être le même aux points homologues du modèle et du prototype.

3. Analyse Dimensionnelle Appliquée Au PK-Weir

3.1. Configuration géométrique du Pk-Weir

Sur la base des essais préliminaires sur des modèles réduits physiques effectués depuis l'an 2001 par le laboratoire Aménagement Hydrauliques et Environnement (U. Biskra) en collaboration avec Hydrocoop_France, la forme géométrique du Pk-Weir a été définie par :

- Une disposition rectangulaire des alvéoles quelque peu semblables aux formes de Clefs de Piano, ce qui explique le nom de Déversoir en Clefs de Piano (Pk-weir) ;
- Un radier incliné des alvéoles amont et aval, ce qui favorise l'utilisation des porte-à-faux ;
- Une longueur réduite de la base grâce à l'utilisation des porte-à-faux (la longueur de la crête est égale à trois fois la longueur de la base) ;
- Une largeur réduite des éléments grâce à la forme rectangulaire ;
- Une surface réduite des murs latéraux résultant de l'utilisation d'un radier incliné.

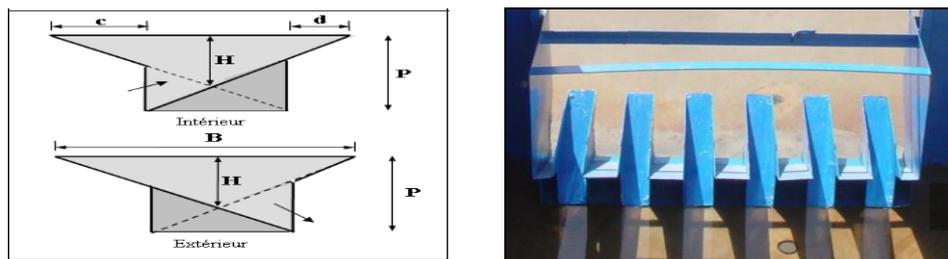


Figure IV.01 : Déversoir en clés de piano (Pk-Weir)

La configuration d'une telle forme en plan est définie par la hauteur du déversoir (P), la largeur des alvéoles amont et aval (a et b), la longueur des porte-à-faux amont et aval (c et d), la hauteur maximale des parois latérales (H), la longueur de la paroi latérale (B), la largeur d'un élément (W), et la longueur de la crête d'un élément (L).

Où, P : hauteur maximale du Pk-Weir ; B : longueur d'une paroi latérale ; 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 ($w=a+b$) et L : longueur du déversoir ($L = a + b + 2B$).

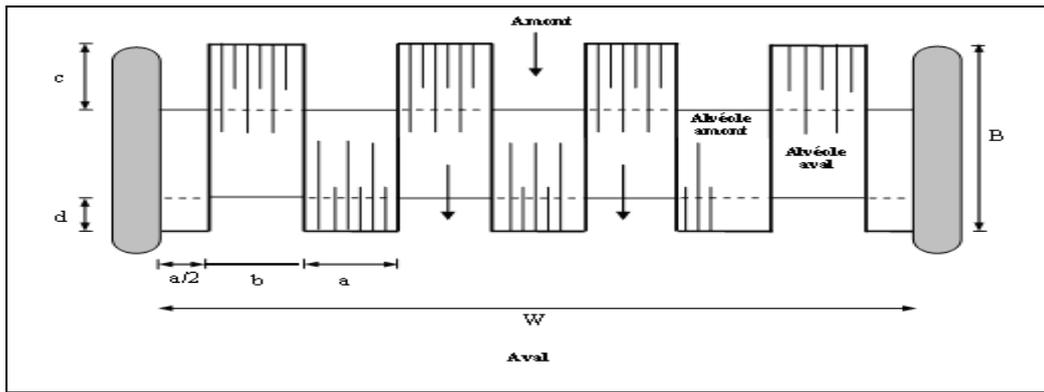


Figure IV.02 : Vue en plan du déversoir en clefs de Piano (PK-Weir).

3.2 Application du Théorème π de Buckingham au Pk-Weir

Comme l'écoulement sur le Pk-Weir est tridimensionnel et ne se prête pas aisément à une description mathématique, la solution la plus directe pour exprimer la fonction du débit implique une combinaison d'analyse dimensionnelle et expérimentale. Pour simplifier cette analyse, la viscosité et les effets de la tension superficielle pourraient être négligés. Avec cette supposition, le seul paramètre important du fluide qui reste est l'accélération de la pesanteur (g).

Ainsi, le débit qui transite par le Pkweir est dépendant des paramètres géométriques et de l'accélération de la pesanteur. Le débit peut être exprimé par une relation de la forme :

$$Q = f(P, D, B, a, b, c, d, L, H, t, L_g, \gamma, l_g) W \sqrt{2g} h^{*3/2} \quad (\text{IV.2})$$

Où, h^* : charge totale sur le seuil du Pkweir ; P : hauteur maximale amont du Pkweir ; D : hauteur maximale aval du Pkweir ; B : longueur des parois latérales ; 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 ; H : hauteur maximale des parois ($H=2P/3$) ; t : épaisseur des parois ; L_g : longueur des guideaux et α : L'angle d'inclinaison des guideaux.

Il est à remarquer que la fonction qui exprime le débit du Pkweir est dépendante de douze paramètres géométriques ce qui rend son analyse difficile, Pour réduire le nombre des paramètres, l'épaisseur des parois a été gardée constante et la hauteur amont du Pkweir P égale à la hauteur aval D . Le paramètre géométrique (B) qui exprime la longueur de la paroi latérale peut être éliminé de l'équation (I) puisque il est inclus dans le paramètre qui exprime la longueur développée (L). Étant donnée que cette étude concerne le Pkweir de type B qui ne comporte pas de porte-à-faux aval, ainsi, le paramètre (d) sera éliminé, aussi le paramètre (c) sera éliminé puisque il est inclus dans le paramètre qui exprime la longueur des parois latérales (B). Le paramètre géométrique (H) qui exprime la hauteur maximale des parois peut être aussi éliminé de l'équation (I) puisque il est inclus dans le paramètre qui exprime la hauteur maximale amont du Pkweir (P), l'angle d'inclinaison des guideaux γ n'est pas constant, il peut être exprimé par l_g et L_g , Ainsi, le nombre de paramètres sera de neuf.

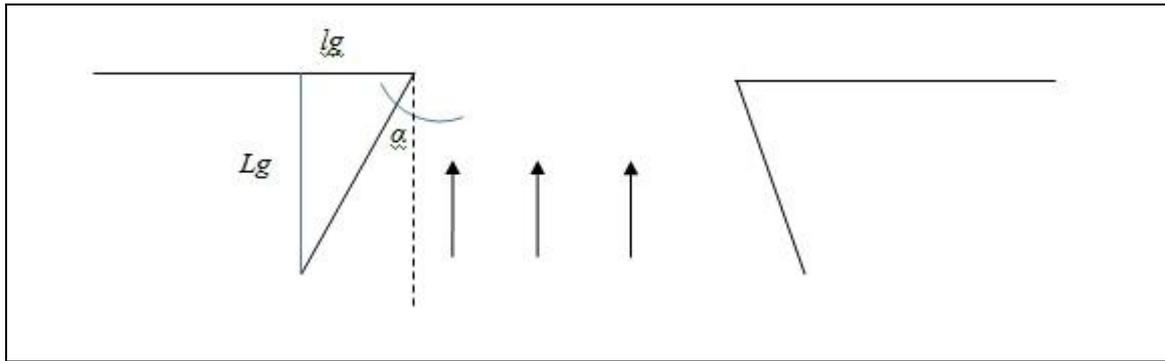


Figure IV.03 : Vue en plan des guideaux

En utilisant les paramètres restants, la relation de débit peut être exprimée par :

$$Q = f(L, W, a, b, P, g, h^*, L_g, l_g) \quad (\text{IV.3})$$

Le débit qui transite sur un déversoir à écoulement libre est généralement exprimé par la relation universelle de Poleni :

$$Q = C_W W \sqrt{2gh^*}^{3/2} \quad (\text{IV.4})$$

En considérant cette dernière relation, le coefficient de débit peut être exprimé par une équation liée étroitement aux paramètres géométriques du déversoir :

$$C_W = f(L, W, a, b, P, g, h^*, L_g, l_g) \quad (\text{IV.5})$$

où, la charge totale h^* correspond à la somme de la charge piézométrique et la charge cinétique.

D'après le tableau IV.1 on peut avoir les dimensions des paramètres suivantes :

Tableau IV.02 : liste des paramètres et leurs dimensions

Paramètres	Q	L	P	h^*	g	A	b	W	L_g	l_g
Dimension	$L^3 t^{-1}$	L	L	L	$L t^{-2}$	L	L	L	L	L

- Le nombre de dimensions de base (L, t) , $j' = 2$

- Choisir $j = j' = 2$ et les paramètres répétés comme g, h^* . Ces paramètres ne peuvent pas former un produit Π sans dimension.

Donc, $k = n - j = 10 - 2 = 8$. Nous allons trouver 8 Π indépendants.

- Obtenir les Π

$$\Pi_1 = g^a h^{*b} Q^1 = (L t^{-2})^a (L)^b (L^3 t^{-1})^1$$

Pour que la dimension de Π_1 soit sans dimension, il faut que la puissance de chaque dimension de base soit zéro. Donc, en prenant la somme des puissances de chaque dimension de base, nous pouvons écrire :

$$t : -2a - 1 = 0, \quad a = -1/2$$

$$L : a + b + 3 = 0, \quad b = -5/2$$

Nous avons donc :

$$\Pi_1 = Q / \sqrt{g} h^{*5/2}$$

Nous constatons bien que cette formule est semblable avec la formule de C_w :

$$\Pi_1 = Q / \sqrt{g} h^{*5/2} \approx C_w = Q / W \sqrt{2gh}^{*3/2}$$

Donc : $\Pi_1 = C_w$ (coefficient de débit)

❖ Paramètre L

Nous pouvons répéter la même opération pour le paramètre L :

$$\Pi_2 = g^a h^{*b} L^1 = (L t^{-2})^a (L)^b (L)^1$$

Nous aurons :

$$t : -2a = 0, a=0$$

$$L : a + b + 1 = 0, b = -1$$

Donc :

$\Pi_2 = L/h^*$ (le rapport de longueur développée à la charge totale)

❖ Paramètre W

Maintenant, nous faisons pour W :

$$\Pi_3 = g^a h^{*b} W^1 = (L t^{-2})^a (L)^b (W)^1$$

Nous aurons :

$$t : -2a = 0, a=0$$

$$L : a + b + 1 = 0, b = -1$$

Donc :

$\Pi_3 = W/h^*$ (le rapport de largeur à la charge totale)

❖ Paramètre P

Ensuite, nous faisons pour P :

$$\Pi_4 = g^a h^{*b} P^1 = (L t^{-2})^a (L)^b (P)^1$$

Nous aurons :

$$t : -2a = 0, a=0$$

$$L : a + b + 1 = 0, b = -1$$

Donc :

$$\Pi_4 = P/h^*$$

Le produit Π_4 peut être réécrit de la manière suivante : $\Pi_2 = h^*/P$

Le produit Π_2 exprime physiquement la grandeur de la charge d'eau sur le déversoir par rapport à sa hauteur qui est souvent appelée la charge relative.

❖ Paramètre a

Ensuite, nous faisons pour la largeur d'alvéole amont a :

$$\Pi_5 = g^a h^{*b} P^1 = (L t^{-2})^a (L)^b (a)^1$$

Nous aurons :

$$t : -2a = 0, a=0$$

$$L : a + b + 1 = 0, b = -1$$

Donc :

$$\Pi_5 = a/h^* \text{ (le rapport de largeur de l'alvéole amont à la charge totale)}$$

❖ Paramètre b

Et bien sur, pour largeur de l'alvéole aval b :

$$\Pi_6 = g^a h^{*b} P^1 = (L t^{-2})^a (L)^b (b)^1$$

Nous aurons :

$$t : -2a = 0, a=0$$

$$L : a + b + 1 = 0, b = -1$$

Donc :

$$\Pi_6 = b/h^* \text{ (le rapport de largeur de l'alvéole avale à charge totale)}$$

❖ Paramètre L_g

Ensuite, nous faisons pour L_g :

$$\Pi_7 = g^a h^{*b} L_g^1 = (L t^{-2})^a (L)^b (L_g)^1$$

Nous aurons :

$$t : -2a = 0, a=0$$

$$L : a + b + 1 = 0, b = -1$$

Donc :

$$\Pi_7 = L_g / h^*$$

❖ Paramètre l_g

Ensuite, nous faisons pour l_g :

$$\Pi_8 = g^a h^{*b} l_g^1 = (L t^{-2})^a (L)^b (l_g)^1$$

Nous aurons :

$$t : -2a = 0, a=0$$

$$L : a + b + 1 = 0, b = -1$$

Donc :

$$\Pi_8 = l_g / h^*$$

le rapport fonctionnel peut s'écrire :

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8) \quad (IV.6)$$

$$\text{Soit: } C_W = f(L/h^*, a/h^*, b/h^*, W/h^*, h^*/P, L_g/h^*, l_g/h^*) \quad (IV.7)$$

A l'exception du produit Π_4 les cinq produits restants n'ont aucune signification physique ($L/h^*, a/h^*, b/h^*, W/h^*, L_g/h^*, l_g/h^*$), donc ils sont éliminés de la relation précédente qui devient :

$$C_W = f(h^*/P) \quad (IV.8)$$

Il y a plusieurs combinaisons possibles des paramètres pour former les termes Π_i sans dimensions. Le terme Π_1 , développé en utilisant g et H comme des paramètres à répétition est $Q / (H^{5/2} g^{1/2})$ qui est une forme du nombre de Froude. Si un paramètre géométrique différent est employé comme un paramètre à répétition, donc il se termine dans le dénominateur des termes sans dimensions Π_2 jusqu'à Π_8 . Dans la discussion des options dont les combinaisons des paramètres peuvent être employées comme des termes Π_i , *Murphy* (1950, p. 37) expose "... Les seules restrictions placées sur les termes de Π_i sont qu'ils soient sans dimensions et indépendants." La qualité d'indépendance signifie qu'un paramètre Π_i considéré dans un problème ne peut pas être formé par la combinaison des autres paramètres du problème par la multiplication ou la division. Par exemple, le paramètre L/T ne pouvait pas être employé avec les paramètres T/H et L/H parce que $L/T = (L/H)/(T/H)$. Cependant, on permet des transformations, des combinaisons et des substitutions par les conditions d'être sans dimensions et indépendant des autres paramètres considérés dans le problème. Donc, L/T pourrait remplacer L/H et les paramètres L/T et T/H serait indépendant parce que L/H n'est plus inclus dans le problème.

❖ Paramètres répétés (g, P)

- En considérant (g, P) comme des paramètres répétés, les produits Π_i qui peuvent être obtenus sont les suivants :

$$\Pi_1 = Q/g^{1/2} p^{5/2}$$

$$\Pi_2 = L/P$$

$$\Pi_3 = h^*/P$$

$$\Pi_4 = a/P$$

$$\Pi_5 = b/P$$

$$\Pi_6 = W/P$$

$$\Pi_7 = L_g/P$$

$$\Pi_8 = l_g/P$$

Alors, l'équation de C_w est en fonction des paramètres suivants:

$$C_w = f(L/P, h^*/P, a/P, b/P, W/P, L_g/P, l_g/P) \quad (IV.9)$$

On remarque que les paramètres de cette dernière relation n'ont aucune signification physique à l'exception des deux paramètres adimensionnels W/P qui exprime le rapport de l'aspect vertical et h^*/P qui désigne la charge relative, ainsi la relation (IV.9) devient :

$$C_w = f(h^*/P, W/P) \quad (IV.10)$$

❖ Paramètres répétés (g, L)

- En considérant (g, L) comme paramètres répétés, les produits Π_i qui peuvent être obtenus sont les suivants :

$$\Pi_1 = Q/g^{1/2}L^{5/2}$$

$$\Pi_2 = P/L$$

$$\Pi_3 = h^*/L$$

$$\Pi_4 = a/L$$

$$\Pi_5 = b/L$$

$$\Pi_6 = L/W$$

$$\Pi_7 = L_g/L$$

$$\Pi_8 = l_g/L$$

En introduisant les différents produits obtenus dans la relation (IV.6), on à :

$$C_w = f(P/L, h^*/L, a/L, b/L, L/W, L_g/L, l_g/L) \quad (IV.11)$$

Le seul paramètre de l'équation (IV.11) qui a une signification physique correspond au paramètre adimensionnel L/W qui exprime le taux d'accroissement de la longueur de la crête du déversoir en touche de piano par rapport à la largeur du déversoir. Par conséquent, les paramètres adimensionnels ($P/L, h^*/L, a/L, b/L, L_g/L, l_g/L$) sont donc éliminés de la relation (IV.10) qui devient :

$$C_w = f(L/W) \quad (IV.12)$$

❖ Paramètres répétés (g, a)

- En considérant (g, a) comme paramètres répétés, les produits Π_i qui peuvent être obtenus sont les suivants :

$$\Pi_1 = Q/g^{1/2}a^{5/2}$$

$$\Pi_2 = L/a$$

$$\Pi_3 = P/a$$

$$\Pi_4 = h^*/a$$

$$\Pi_5 = b/a \quad \text{par conséquence} \quad \Pi_6 = a/b \quad \text{qui représente le rapport de la largeur des alvéoles.}$$

$$\Pi_6 = W/a$$

$$\Pi_7 = L_g/a$$

$$\Pi_8 = l_g/a$$

Par conséquent la relation (IV.6) devient :

$$C_W = f(L/a, P/a, h^*/a, b/a, W/a, L_g/a, l_g/a) \quad (\text{IV.13})$$

Cette dernière équation ne contient qu'un seul paramètre adimensionnel qui a une signification physique, celui qui correspond au rapport entre la largeur de l'alvéole amont et celle de l'alvéole aval. Par conséquent, les paramètres adimensionnels (L/a , P/a , h^*/a , W/a , L_g/a , l_g/a) ne seront pas considérés.

$$C_W = f(a/b) \quad (\text{IV.14})$$

Dans le cas des paramètres répètent g , a , le coefficient de débit est dépend de rapport de la largeur des alvéoles amont et aval.

❖ Paramètres répétés (g, b)

- Le choix de (g, b) comme paramètres répétés permet d'obtenir les produits Π_i suivants :

$$\Pi_1 = Q/g^{1/2} b^{5/2}$$

$$\Pi_2 = L/b$$

$$\Pi_3 = P/b$$

$$\Pi_4 = h^*/b$$

$$\Pi_5 = a/b$$

$$\Pi_6 = W/b$$

$$\Pi_7 = L_g/b$$

$$\Pi_8 = l_g/b$$

En introduisant les différents produits obtenus dans la relation (IV.6), on à :

$$C_W = f(L/b, P/b, h^*/b, a/b, W/b, L_g/b, l_g/b) \quad (\text{IV.15})$$

Sur les sept paramètres adimensionnels obtenus, seul le paramètre a/b a une signification physique qui est définie dans l'étape précédente.

$$C_W = f(a/b) \quad (\text{IV.16})$$

❖ Paramètres répétés (g, W)

- En fixant (g, W) comme paramètres répétés, les produits Π_i qu'on peut déterminer sont les suivants :

$$\Pi_1 = Q/g^{1/2} W^{5/2}$$

$$\Pi_2 = L/W$$

$$\Pi_3 = P/W$$

$$\Pi_4 = h^*/W$$

$$\Pi_5 = a/W$$

$$\Pi_6 = b/W$$

$$\Pi_7 = L_g/W$$

$$\Pi_8 = l_g/W$$

En se rapportant à la relation (IV.6), cette dernière peut être exprimée comme suit :

$$C_W = f(L/W, h^*/W, a/W, W/P, b/W, W/L_g, l_g/W) \quad (IV.17)$$

Les paramètres adimensionnels (h^*/W , a/W et b/W) n'ont aucune signification physique, tandis que le paramètre L/W représente l'accroissement de la crête, W/P exprime le rapport de l'aspect vertical et W/L_g correspond au rapport entre la largeur du déversoir et la longueur des guideaux. Ainsi la relation de C_W devient :

$$C_W = f(L/W, W/P, W/L_g) \quad (IV.18)$$

❖ Paramètres répétés (g, L_g)

- en fixant (g, L_g), en utilisant les différentes combinaisons possibles avec les paramètres géométriques, on obtient les produits Π_i suivants :

$$\Pi_1 = Q/g^{1/2} L_g^{5/2}$$

$$\Pi_2 = L/L_g$$

$$\Pi_3 = P/L_g$$

$$\Pi_4 = h^*/L_g$$

$$\Pi_5 = a/L_g$$

$$\Pi_6 = b/L_g$$

$$\Pi_7 = W/L_g$$

$$\Pi_8 = l_g/L_g$$

Le seul paramètre qui a une signification physique correspond au rapport par conséquent le coefficient de débit peut être dépendant de ce paramètre.

$$C_W = f(l_g/L_g) \quad (IV.19)$$

❖ Paramètres répétés (g, l_g)

- Les derniers paramètres répétés sont (g, l_g), en utilisant les différentes combinaisons possibles avec les paramètres géométriques, on obtient les produits Π_i suivants :

$$\Pi_1 = Q/g^{1/2} l_g^{5/2}$$

$$\Pi_2 = L/l_g$$

$$\Pi_3 = P/l_g$$

$$\Pi_4 = h^*/l_g$$

$$\Pi_5 = a/l_g$$

$$\Pi_6 = b/l_g$$

$$\Pi_7 = W/l_g$$

$$\Pi_8 = L_g/l_g$$

Dans ce cas le seul paramètre qui a une signification physique est le rapport L_g/l_g qui exprime d'une manière indirecte l'angle d'inclinaison des parois des guideaux par rapport au sens de l'écoulement.

$$C_w = f(L_g/l_g) \quad (IV.20)$$

Finalement, la substitution des relations obtenues ((IV.5.1), (IV.5.2), (IV.8), (IV.10), (IV.12), (IV.14), (IV.16), (IV.18) et (IV.20) dans la relation (IV.5) permet d'exprimer le coefficient de débit d'un déversoir en touche de piano à la présence des guideaux avec les hypothèses définies précédemment.

$$C_w = f(L/W, W/P, a/b, h^*/P, L_g/l_g) \quad (IV.21)$$

Cette dernière relation définit le coefficient de débit comme étant en fonction de cinq paramètres adimensionnels et non répétitifs.

La forme réelle de cette fonction doit être déterminée par l'analyse statistique des données expérimentales.

4. Conclusion

L'analyse dimensionnelle appliquée au déversoir en en touche de piano a permis de déterminer la forme générale de l'équation du coefficient de débit en fonction des différents paramètres géométriques sous forme de six paramètres adimensionnels. Cette relation est valable pour le cas d'existence des guideaux. Cette analyse dimensionnelle a permis aussi de limiter le nombre d'essais expérimentaux qui vont être réalisés en fonction du nombre de paramètres adimensionnels au lieu du nombre de paramètres géométriques. Il est à remarqué que selon la bibliographie les quatre premiers paramètres adimensionnels de l'équation (IV.21) ont fait l'objet d'analyses expérimentales (A.Ouamane et al. 2006). Cependant, le dernier paramètre qui exprime la géométrie des guideaux n'a pas fait l'objet d'étude, ainsi, la première partie de cette étude expérimentale sera consacrée à ce paramètre.

Chapitre V

Étude expérimentale

Chapitre V

Étude expérimentale sur modèles réduits du déversoir PK-Weir

1. Introduction

Notre étude expérimentale a été réalisée au Laboratoire d'Aménagement hydraulique et Environnement de l'Université de Biskra. Nous avons effectué trois séries d'essais. Dans un premier temps, une série d'essais expérimentaux a été réalisée pour étudier l'influence de l'inclinaison des guideaux sur la performance d'un déversoir en touches de piano (Pk-Weir). Dans un second temps, des essais ont été effectués pour analyser l'effet des corps flottants sur la performance des modèles : A standard et A1 (avec rehausses en amont et en aval). Pour comparer les performances d'un Pk- Weir de forme trapézoïdale et un Pk-Weir de forme rectangulaire, une troisième série d'essais a été effectuée.

2. Description de l'organisation expérimentale

2.1. Description de la station d'expérimentation

Le dispositif expérimental est constitué d'un ensemble de canaux à ciel ouvert permettant de simuler les écoulements dans les cours d'eau en amont et en aval des ouvrages hydrauliques. Cette station a été dimensionnée dans le but de permettre la réalisation des essais sur des modèles réduits des évacuateurs de crues et autres ouvrages hydrauliques à une échelle suffisamment acceptable.

La station d'expérimentation est équipée d'une station de pompage regroupant deux pompes qui débitent 180l/s, raccordées par l'intermédiaire de deux conduites de diamètre 200mm à un bassin de tranquillisation de l'écoulement, qui est raccordé à son tour à un canal d'amenée de longueur 5m, de hauteur 1,2m et de largeur 0,95m. L'une des parois de ce canal est conçue en verre afin de permettre la visualisation de l'écoulement. L'eau qui transite par le canal d'amenée passe dans un bassin de simulation de retenue de section 5x4m et de hauteur 1,5m, des vitres en verre sont insérées dans l'une des parois latérale du bassin permettant ainsi la visualisation de l'écoulement.



Photo V.01 : Vue d'ensemble de la station d'expérimentation des modèles réduits

Le bassin de simulation de retenue est équipé d'un réseau de prise de pression permettant de déterminer les profondeurs d'eau aux différents endroits du bassin. Ces prises de pression sont raccordées à un tableau manométrique qui permet la lecture directe de la profondeur d'eau en chaque point. Le débit qui transite par le dispositif expérimental est mesuré par un débitmètre à ultrason installé sur les deux conduites d'adduction.

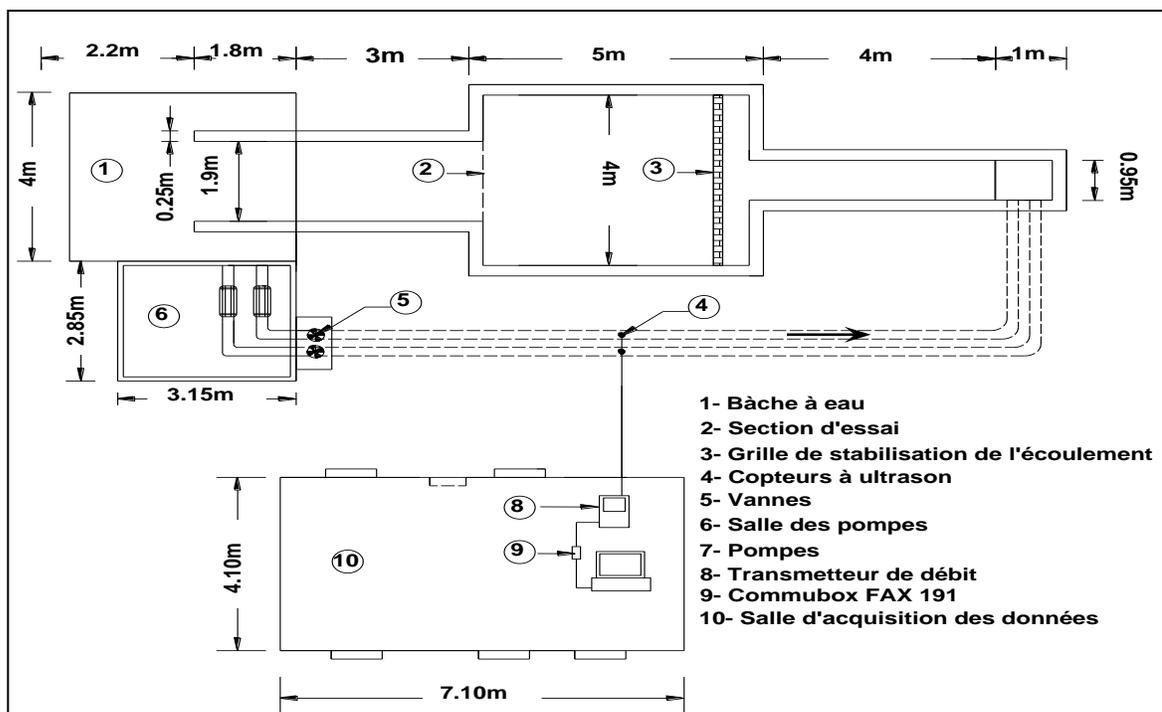


Figure V.02 : Schéma de station d'expérimentation. (Vue en plan).

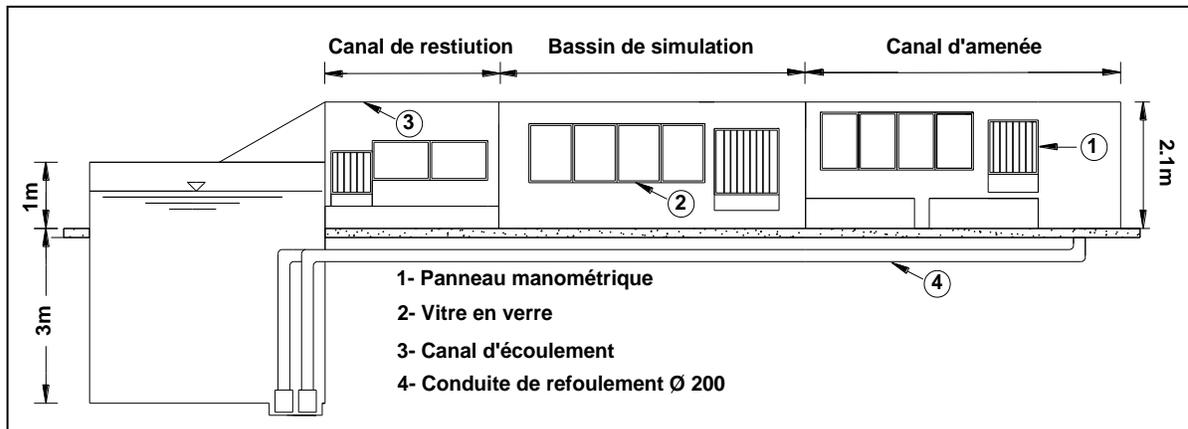


Figure V.03 : Schéma du dispositif expérimental (Vue de profil).

À la sortie aval du bassin de simulation se situe l'endroit d'emplacement des modèles de déversoir et les guideaux qui est raccordé à un canal de restitution de largeur 1,90m qui joue le rôle de coursier d'un évacuateur de crues. Le canal de restitution est équipé d'un réseau de prise de pression et d'une vanne de réglage du niveau d'eau.

Le réglage des débits se fait par le biais de deux vannes qui permettent ainsi d'effectuer des essais avec une large gamme de débit.



Photo V.02 : Vue de l'aval de la station d'expérimentation

Le débit transitant par le canal de restitution se déverse dans une bêche à eau d'une capacité de 48m³ et qui sert comme bassin de puisage pour les pompes. Le système fonctionne en circuit fermé.

2.2. Protocol expérimental

L'objectif principal de cette étude est l'analyse par voie expérimentale l'effet des paramètres géométriques des Pk-Weir sur l'écoulement. Il s'agit donc de tester une gamme de Pk –Weir.

Pour ce faire une série de Pkweir de différentes dimensions a été confectionnée. Les parois de ces déversoirs sont en tôle d'épaisseur 2mm.

Pour chaque expérimentation, le modèle de PK-Weir est installé à la sortie du bassin de simulation tout en respectant le même niveau le long de la crête du déversoir. Après vérification de la bonne installation du modèle, une vérification des paramètres du débitmètre et des tableaux manométriques est nécessaire.

Une fois que tous le système d'expérimentation est vérifié, on fait amorcer la pompe pour remplir le bassin de simulation de retenue jusqu'au déversement le long de la crête du déversoir à expérimenter. Après on arrête la pompe, et quand l'eau ne s'écoule plus par-dessus la crête du déversoir, on opère à la détermination du niveau du seuil, h_o .

Après cette première étape, on fait fonctionner la première pompe à un débit d'environ 30 l/s par manipulation de la première vanne de réglage de débit. Après que l'écoulement soit totalement stabilisé, on procède aux mesures de la profondeur d'eau à l'amont du déversoir testé, par le biais de tubes manométriques (indicateurs de niveau). Le débit est directement enregistré sur PC par l'intermédiaire du logiciel COMMUWIN II.

On augmente au fur et à mesure le débit jusqu'à atteindre le débit maximum qui est de l'ordre de 170l/s. Le pas de débit est de 7l/s. Pour chaque débit, on prend la valeur de l'épaisseur de la lame déversante. On obtient ainsi, une série de couple de valeurs de (Q et h).

Pour un même déversoir testé, on a un échantillon de valeurs des profondeurs mesurées à l'amont du déversoir ainsi que les valeurs des débits qui leurs correspondent.

Pour chaque modèle testé, deux séries d'essai sont réalisées pour confirmer les résultats obtenus.

3. Différentes parties de l'étude expérimentale sur les déversoirs PK-Weir

3.1. Première série d'essais



Cette première série d'essais a été réalisée sur un déversoir en touches de piano en présence de guideaux (photo V.3). Ces guideaux ont une longueur 60cm, une hauteur 40cm et une épaisseur égale à 0,03 cm. La jonction de ces derniers avec les parois latérales du déversoir Pk-Weir est faite à l'aide des paumelles de telle façon qu'ils puissent pivoter lors du changement de l'angle d'ouverture (photo V.04) et (photo V.05).

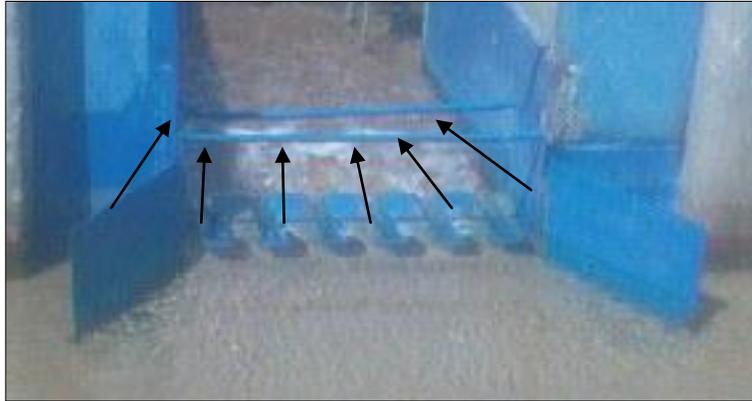


Photo V.03 : Vue de l'amont du déversoir avec des guideaux.



Photo V.04 : Vue de profil de guideaux.

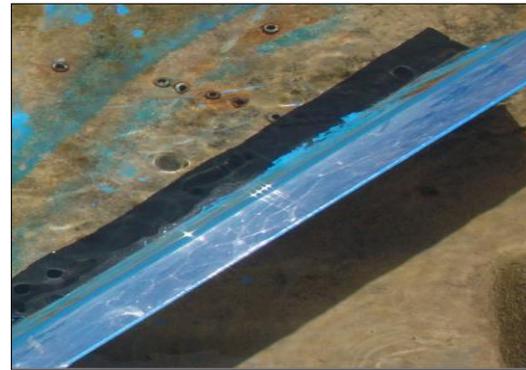


Photo V.05 : Vue de haut des guideaux.

Cette série d'essais nous permettra d'analyser l'influence de l'inclinaison des guideaux sur l'écoulement. Sept (07) angles d'inclinaison des guideaux (0° , 15° , 27° , 30° , 33° , 45° , 60°) ont été considérés.

3.2. Deuxième série d'essais

La deuxième série d'essais a été réalisée pour voir l'effet des corps flottants (photo V-6) sur les modèles A (type A standard), et type A1 avec rehausses en amont et en aval).

Les modèles réduits physiques A et A1 ont été placés sur socle (photo V-7), (photo V-8). Les caractéristiques géométriques de ces modèles sont mentionnées dans le tableau V.01.

Ces corps flottants sont de géométries différentes, leur longueur est de l'ordre de (10 à 20) cm.

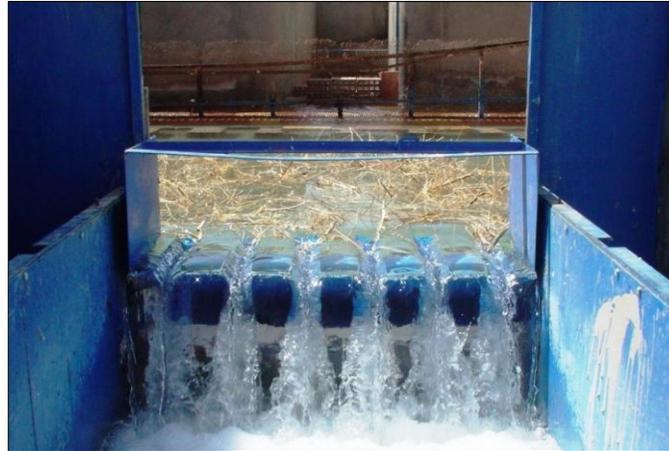


Photo V.06 : Fonctionnement du PK-Weir en présence des corps flottants



Photo V.07: PK-Weir type A standard.



Photo V.08: PK-Weir type A1.

TABLEAU V.01 : Caractéristiques géométriques des modèles réduits

Modèles des déversoirs en touches de piano	n	L	W_t	P	B	W	a	b	C	d	a/b	OBS
A standard	6	594	102,5	15,0	41	17,08	9,0	8,5	10	10	1,05	Sur socle
A1	6	597	102,0	15,5	41	17,00	9,5	8,0	10	10	1,18	Sur socle

3.3. Troisième série d'essais

Cette partie expérimentale a été faite pour comparer la performance entre deux nouveaux modèles proposés à savoir le PK-Weir triangulaire (photo V.09) et le PK-Weir trapézoïdal (photo V.10).

Ces deux modèles ont été réalisés sur socle.

Les caractéristiques géométriques de ces modèles sont mentionnées dans le tableau (V.02)

Tableau V.02: Caractéristiques géométriques des modèles réduits

Modèles des déversoirs en touches de piano	n	L	W_i	P	B	W	a	b	c	d	a/b	OBS
Trapézoïdal	6	539,9	105,5	14,6	42,0	17,58	8,5	6,9	11,2	10,2	1,23	Sur socle
Triangulaire	6	574,0	104,3	15	49,5	17,38	0	0	14	14	/	Sur socle



Photo V.09 : PK-Weir de la forme en plan Triangulaire.



Photo V.10 : PK-Weir de la forme Trapézoïdale.

4. Instrumentation de mesure

4.1. Mesure des hauteurs d'eau

Les hauteurs d'eau dans les différents canaux du dispositif sont mesurées à l'aide de trois séries de tubes piézométriques raccordés aux prises de pressions installées au fond des canaux et du bassin de simulation. Chaque série de piézomètres est raccordée à un tableau piézométrique contenant des tubes en plexiglas de faibles diamètres est des règles graduées permettant la lecture des différents niveaux d'eau dans les canaux.



Photo V.11 : Tableaux manométriques de mesure des niveaux d'eau.

4.2. Mesure des débits

Les débits qui transitent par le modèle sont mesurés par un débitmètre à ultrason de type Flowmeter, raccordé à un PC par le biais de Commubox FXA 191, le logiciel Commuwin II permet l'enregistrement et le traitement des données des débits mesurés.

Le débitmètre fonctionne selon le principe de la différence de temps de parcours d'un signal acoustique (ultrason) envoyé dans les deux sens d'un capteur l'autre. Étant donné que la vitesse de propagation de l'onde sonore est inférieure si le signal est émis contre le sens d'écoulement, on est en présence d'une différence de temps de parcours. Cette différence est directement proportionnelle à la vitesse d'écoulement.

Le débitmètre à ultrason calcule le débit à partir de la section de la conduite et de la différence du temps de parcours mesurée, il transmette les lectures des débits directement au transmetteur et au PC par le biais d'un adaptateur de type Commubox FXA 191 et du logiciel COMMUWIN II.

$$Q = v \cdot A \quad (V-01)$$

Où, v : vitesse d'écoulement et A : section de conduite



Photo V.12 : Débitmètre à ultrason Flowmeter 93W2.

Le débitmètre à ultrason est constitué de deux parties distinctes :

- sondes identiques (transducteurs), fixées par une chaînette sur la conduite d'alimentation du système, les deux sondes jouent le rôle d'émetteur et de récepteur des ondes ultrasonores.
- Un transmetteur à écran en cristaux liquides qui permet l'affichage de débit passant dans la conduite d'alimentation. L'appareil permet aussi l'affichage de la vitesse moyenne de l'écoulement dans la conduite d'alimentation.

5. Interprétation et discussion des résultats expérimentaux

L'interprétation des résultats obtenus sur les différents modèles testés nécessite l'utilisation d'un certain nombre de relations théoriques régissant l'écoulement sur les déversoirs.

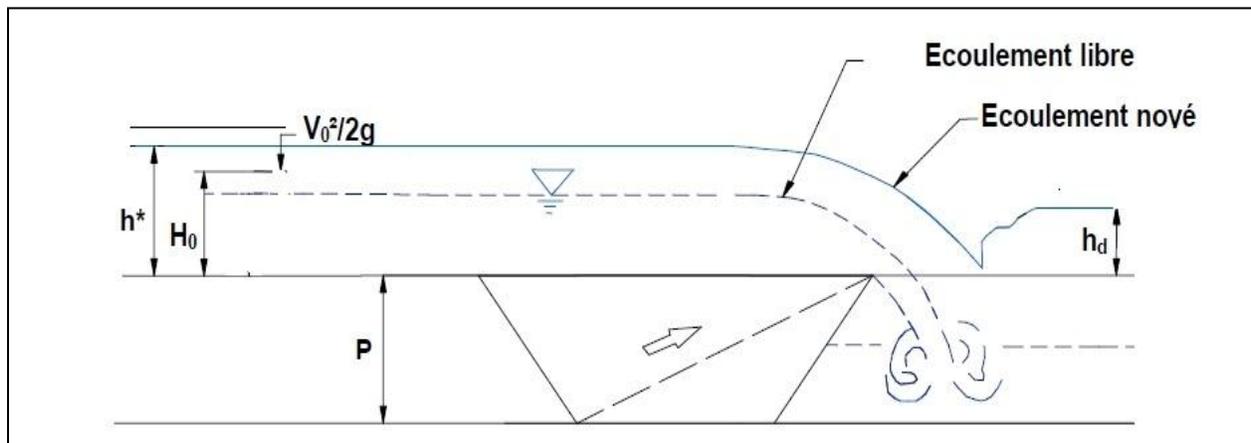


Figure V.04 : Définition des paramètres du déversoir à écoulement libre et noyé.

La charge totale sur le seuil du déversoir (h^*) correspond à la somme de la charge piézométrique (h) et la charge cinétique (h_c) :

$$h^* = h + h_c \quad (V-02)$$

$$h_c = \frac{Q^2}{2gA_b^2} = \frac{Q^2}{2g(l_b(P+h))^2} \quad (V-03)$$

où, Q : Débit mesuré ; A_b : Section de l'écoulement dans le bassin de simulation ; l_b : Largeur du bassin de simulation ; P : Hauteur du déversoir et h : profondeur d'eau sur le seuil du déversoir mesurée à une distance de deux mètres de ce dernier.

Le coefficient de débit peut être déterminé à partir de la relation de **Poleni** :

$$C_w = \frac{Q}{W\sqrt{2gh^{*3/2}}} \quad (V-04)$$

Où, C_w : Coefficient de débit du déversoir testé ; W : Largeur totale du déversoir et h^* : Charge totale sur le seuil du déversoir.

La performance représente le rendement du PK-Weir par rapport au déversoir Creager. Elle est exprimée par le rapport entre le débit qui transite par le PK-Weir et celui d'un déversoir Creager de même largeur et sous la même charge.

$$q = \frac{Q_{P.K.Weir}}{Q_{cr}} \quad (V-05)$$

Où, q : Performance du déversoir expérimenté (Pk - Weir) ; Q_{pkweir} : Débit mesuré ; Q_{cr} : Débit calculé pour un déversoir Creager.

Le débit qui transite par le déversoir rectiligne standard est déterminé par la relation de **Poleni** :

$$Q_{Cr} = \mu W \sqrt{2g} h^{*3/2} \quad (V-06)$$

où, μ : Coefficient de débit d'un déversoir standard de type Creager ($\mu = 0,49$) ; W : Largeur du déversoir et h^* : Charge totale sur le déversoir.

D'après l'analyse dimensionnelle appliquée sur le déversoir PK-Weir (chapitre IV), on a trouvé la relation (IV.21) :

$$C_w = f(L/W, W/P, a/b, h^*/P, L_g/l_g)$$

Et comme les paramètres L, W, P, L_g , a, b, l_g sont constants alors on a :

$$C_w = F(h^*/P) \quad (V-07)$$

5.1. Étude de l'effet d'angle d'inclinaison des guideaux sur le rendement du déversoir PK-Weir

5.1.1. Angles d'ouvertures des guideaux 0° et 15°

La figure (V.05) donne la variation du débit en fonction de la charge totale au dessus du seuil du déversoir h_* pour des angles d'ouverture des guideaux de 0° et 15°.

La représentation graphique des courbes de débits en fonction de la charge totale sur le seuil du déversoir montre que le modèle (A) avec une ouverture des guideaux de 15° fait évacuer des débits supérieurs à ceux du même modèle avec une ouverture des guideaux de 0° (annexe 01 et 02).

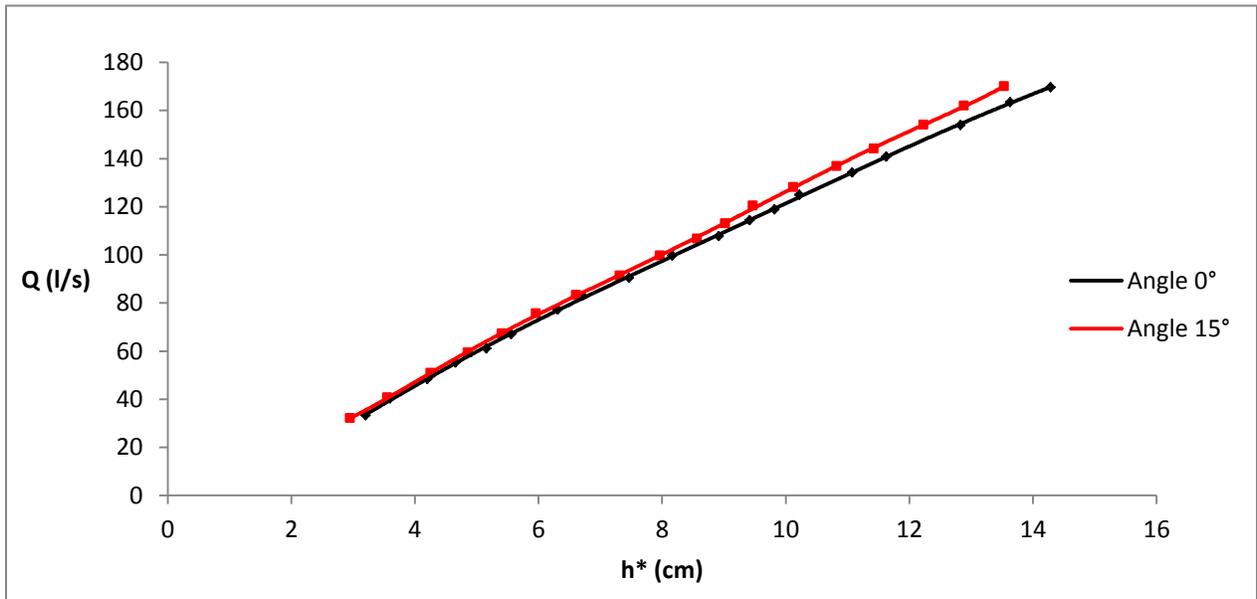


Figure V.05 : Variation du débit en fonction de la charge totale au dessus du seuil du déversoir h_* pour des angles d'ouverture des guideaux de 0° et 15°.

La figure (V.06) montre que l'ouverture des guideaux de 15° permet de croître le rendement du déversoir PK-Weir. Cet accroissement est de l'ordre de 3% à 4% pour les faibles et moyennes charges relatives.

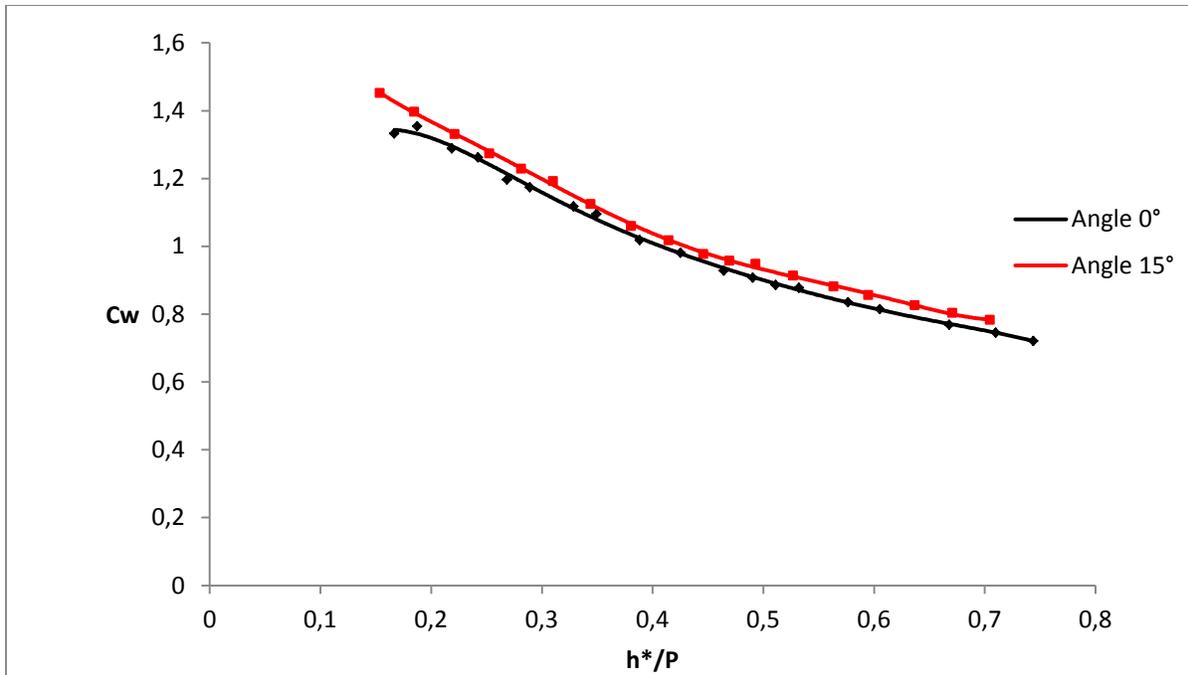


Figure V.06: Variation du coefficient C_w en fonction de h^*/P pour des angles d'ouverture des guideaux de 0° et 15° .

5.1.2. Angles d'ouvertures des guideaux 27° , 30° et 33°

La figure (V.07) montre la variation du débit en fonction de la charge totale au dessus de le la crête du déversoir h_* pour des angles d'ouverture des guideaux de 27° , 30° et 33° .

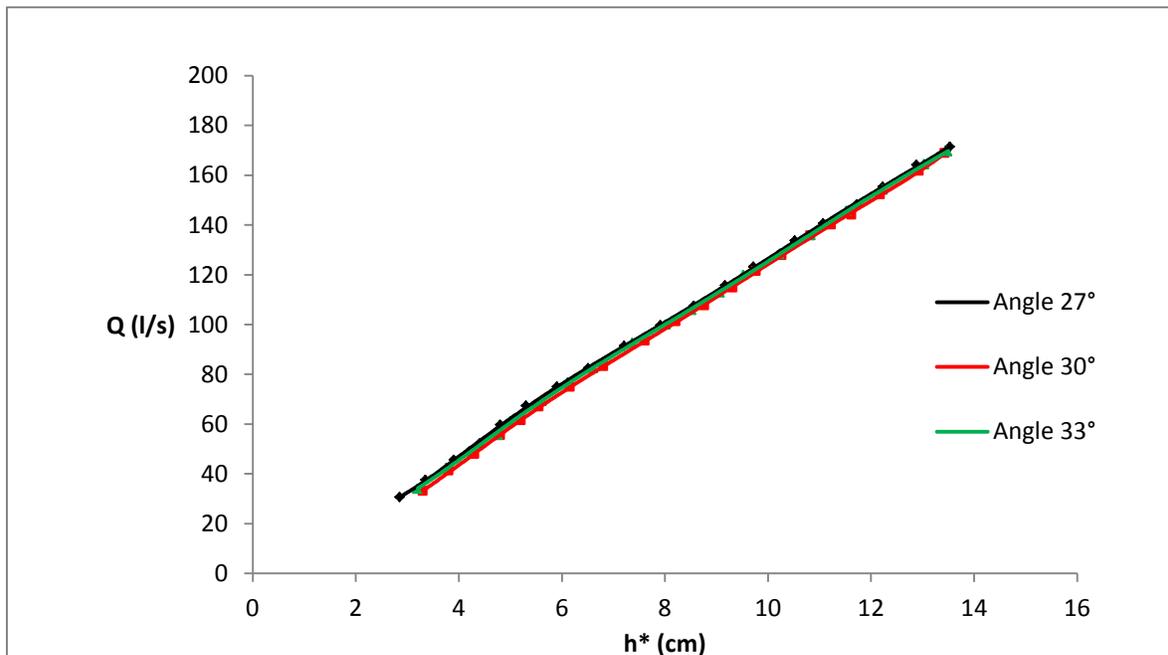


Figure V.07 : Variation du débit en fonction de la charge totale au dessus du seuil du déversoir h_* pour des angles d'ouverture des guideaux de 27° , 30° et 33° .

L'évaluation de l'importance de l'effet d'ouverture des guideaux peut être tirée directement du graphique (V.07). Le premier modèle avec une ouverture de 27° est plus performant du fait puisqu'il évacue de grands de débit pour de petites charges. Le modèle avec une ouverture de 33° a des petites charges plus petites que celles de 30° (annexes 03, 05 et 06).

Dans la figure (V.08) est donnée la variation du coefficient C_w en fonction de h^*/P pour des angles d'ouverture des guideaux de 27° , 30° et 33°

La comparaison entre les coefficients des débits des trois modèles fait apparaître que l'ouverture des guideaux d'un angle 27° fait croître le rendement d'environ 9 % par rapport au modèle avec un angle de 30° , et une capacité d'évacuation d'environ 3 % par rapport au modèle avec un angle de 33° pour les faibles charges relatives et d'environ 1% pour des grandes valeurs de la charge relative.

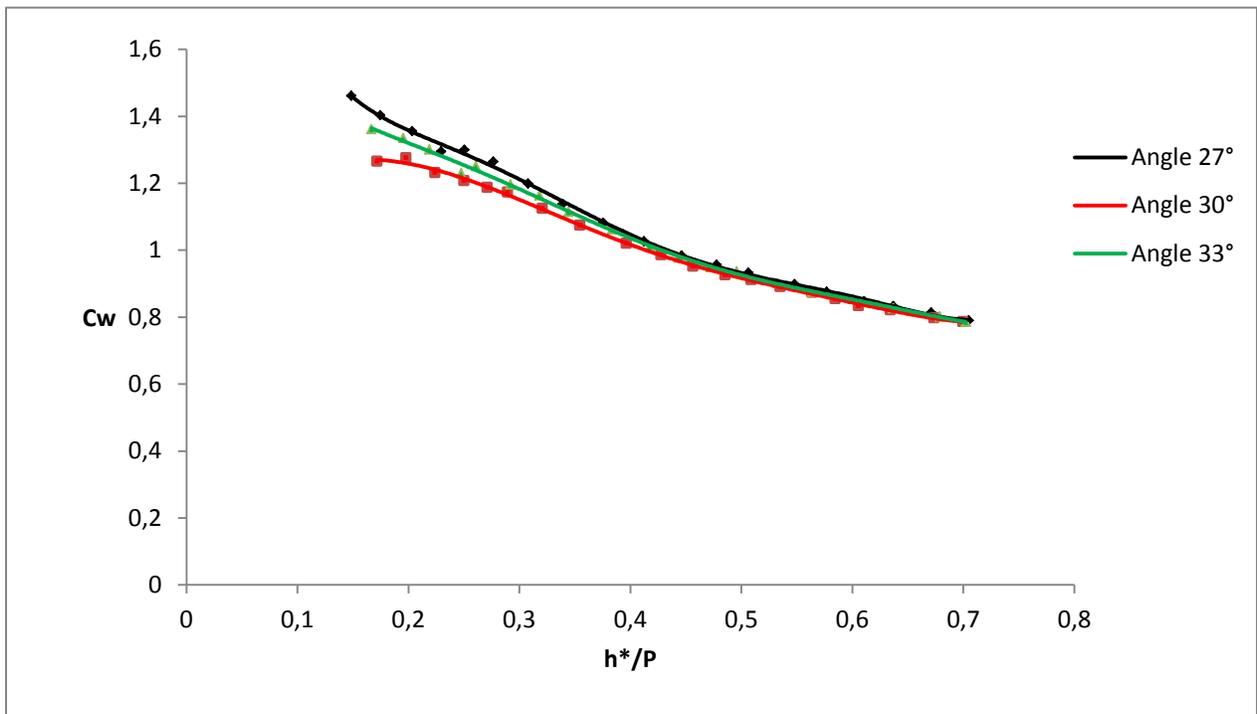


Figure V.08 : Variation du coefficient C_w en fonction de h^*/P pour des angles d'ouverture des guideaux de 27° , 30° et 33°

5.1.3. Ouverture des angles angle 60° et 45°

La différence entre les deux cas d'essais correspond au changement de l'ouverture des guideaux. A cet effet, on peut dire que pour des ouvertures des guideaux égales à 45° il n'y a aucun effet sur le rendement du PK-Weir. Donc, il est recommandé de choisir une ouverture des guideaux égale à 60° .

La figure (V.09) montre qu'effectivement qu'une ouverture des guideaux de 60° permet de croître le rendement d'une manière étroite. Cet accroissement est de l'ordre de 1% pour une charge relative $h^*/P = 0,2$ (annexe 04 et 07).

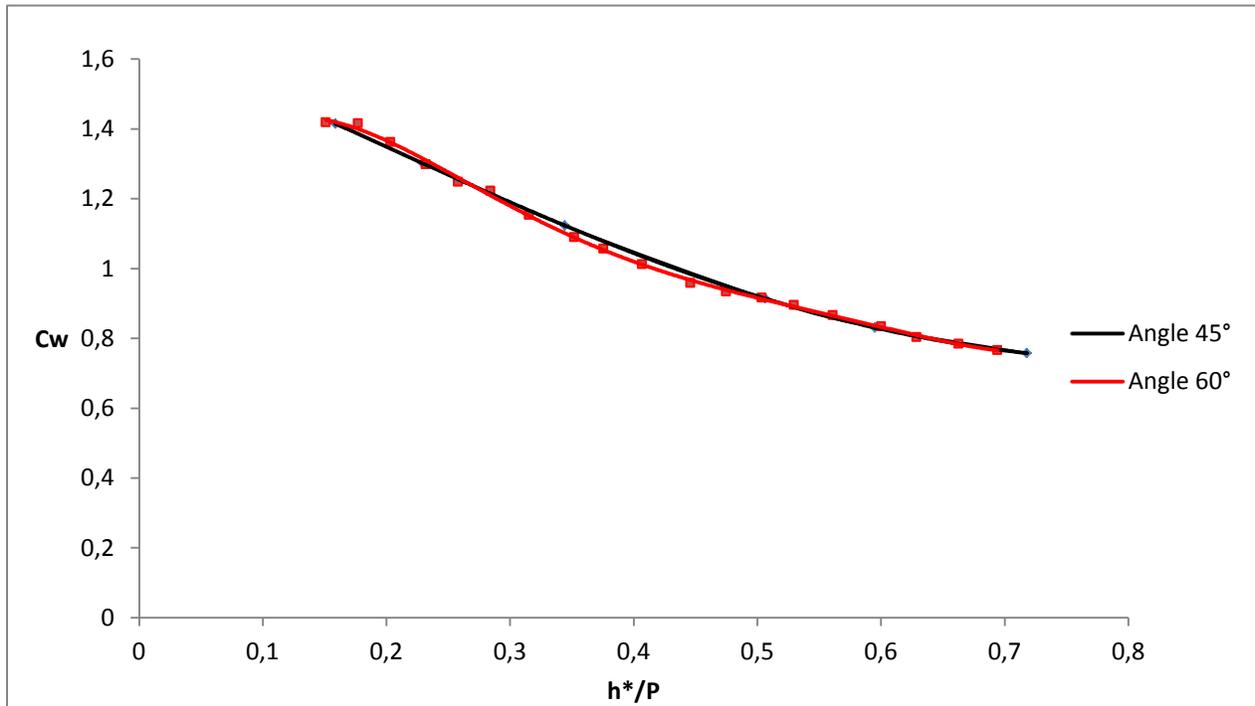


Figure V.09 : Variation du coefficient C_w en fonction de h^*/P pour des angles d'ouverture des guideaux de 45° et 60° .

5.1.4. Choix du meilleur angle d'ouverture des guideaux du déversoir PK-Weir

La comparaison entre les coefficients des débits des trois modèles (figure V.10) fait apparaître que l'angle d'ouverture de 27° est le meilleur parce qu'il a une influence sur l'accroissement du rendement d'environ 2% par rapport au celui d'angle d'ouverture des guideaux de 60° pour les grandes et moyennes charges relatives, et d'un rendement d'environ 1% par rapport au celui d'un angle d'ouverture des guideaux égale à 15° cela est remarqué pour les moyennes charges relatives.

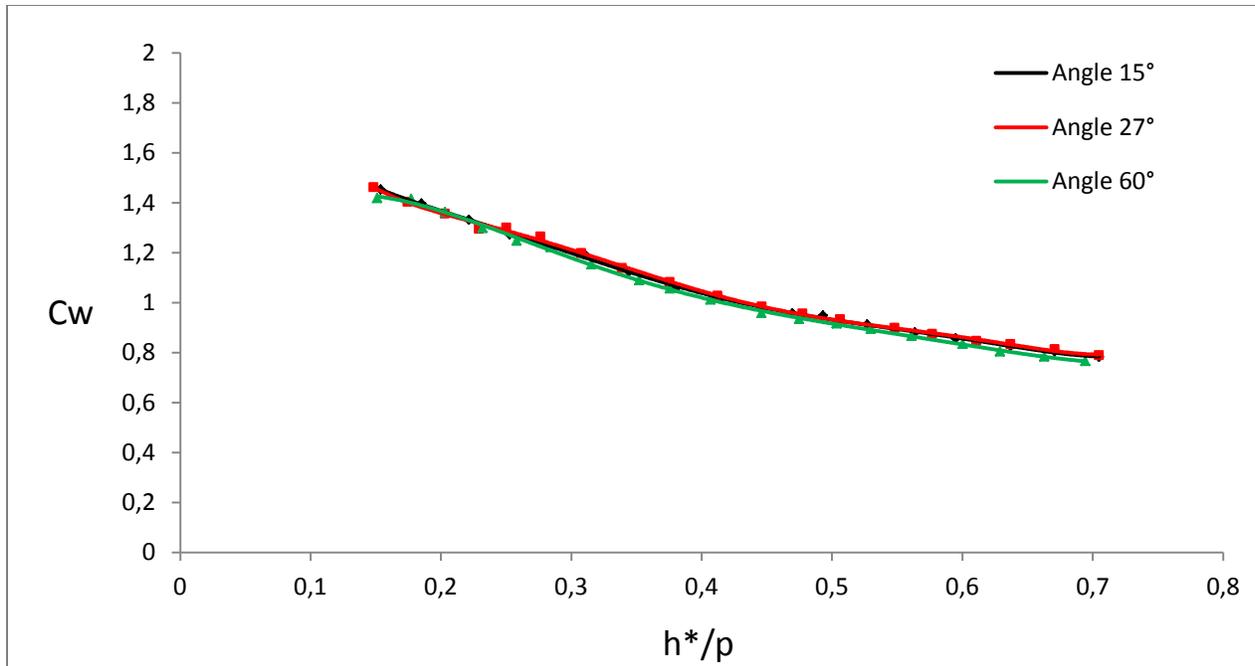


Figure V.10 : Variation du coefficient C_w en fonction de h^*/P pour des angles d'ouverture des guideaux de 15°, 27° et 60°.

5.2. Effet de la forme en plan du PK-Weir sur la capacité d'évacuation

La forme en plan du PK-Weir a été choisie rectangulaire lors de sa conception initiale, cependant, il a été remarqué que les formes en plan trapézoïdale et triangulaire sont les plus rentables du point de vue hydraulique pour le déversoir en labyrinthe. Par conséquent, il serait intéressant de vérifier le rendement du PK-Weir pour ces deux formes en plan.

Pour ce faire, trois modèles de PK-Weir de type A ont fait l'objet d'essais sur modèles réduits. Ces trois modèles ont les mêmes dimensions et la même configuration géométrique à l'exception de la forme en plan qui est, triangulaire ou trapézoïdale (photo V.13) ou rectangulaire photo V.14).

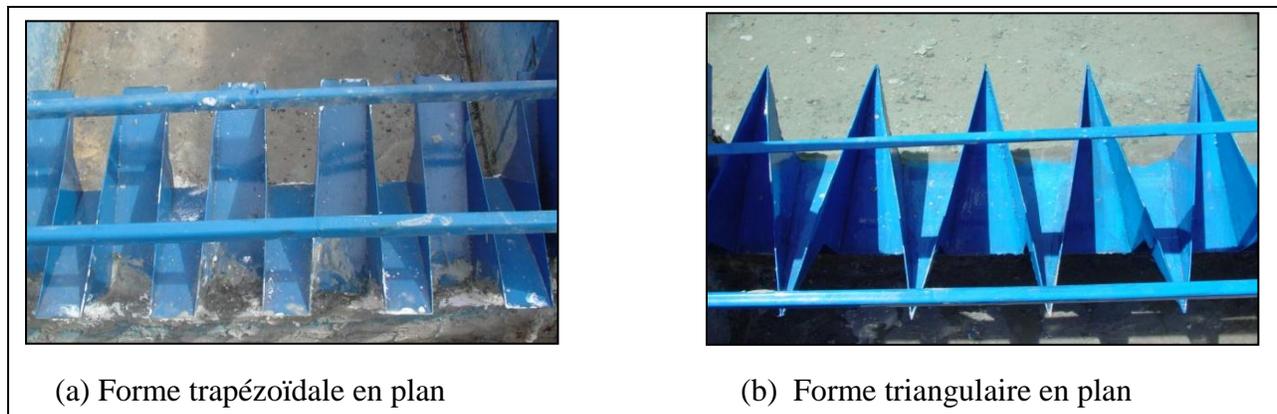


Photo V.13: PK-Weir type A.



Photo V.14 : PK-Weir rectangulaire (A standard) ;

Les résultats obtenus sur les trois modèles de PK-Weir ont bien montré l'effet de la forme en plan sur le rendement du déversoir.

La représentation graphique de la variation du débit en fonction de la charge totale au dessus du seuil du déversoir h_* pour différentes forme en plan (Trapézoïdal, Triangulaire & A standard) montre que :

- Pour les faibles débits [30-80] l/s : le modèle du PK-Weir de type A de la forme trapézoïdale en plan évacue des charges plus grandes que celui de la forme triangulaire en plan a cause de sa section d'entrée réduite ;
- Pour les moyennes et grandes valeurs de débit de [80 à 170] l/s : le modèle du PK-Weir de type A de la forme trapézoïdale en plan évacue des faibles charges contrairement au celui de la forme triangulaire en plan puisque la forme trapézoïdale est proche de la forme triangulaire, celle qui fait évacuer les plus petites charges pour toute la gamme de débit. (voir annexe 08) (voir annexe 09) (voir annexe 10).

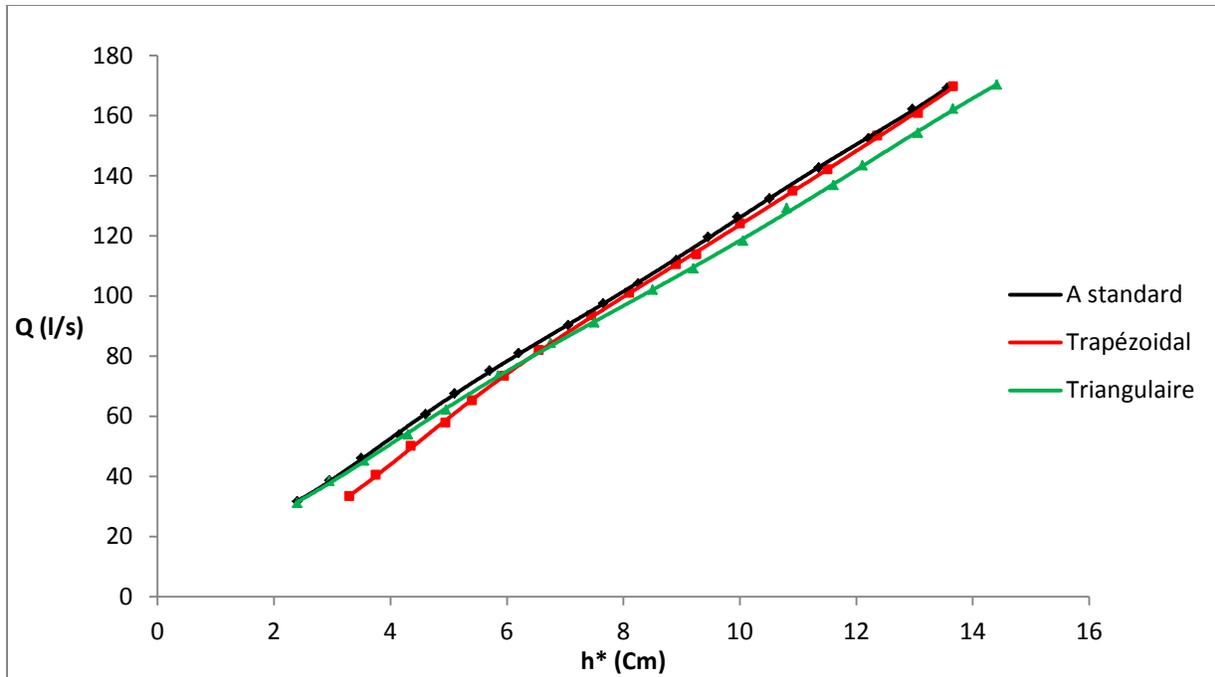


Figure V.11: Variation du débit en fonction de la charge totale au dessus du seuil du déversoir h^* pour différentes forme en plan (Trapézoïdal, Triangulaire & A standard).

La représentation graphique des courbes des coefficients de débits obtenus sur ces modèles en fonction de la charge relative h^*/P montre que

- le modèle A standard se caractérise par un rendement plus élevé que les deux autres modèles des formes trapézoïdale et triangulaire en plan.
- Pour les faibles charges relatives le modèle du PK-Weir de la forme triangulaire en plan a fait accroître le rendement d'une manière significative par rapport à celui de la forme trapézoïdal en plan, l'accroissement est de l'ordre de 28% pour une charge relative h^*/P de 0,2.
- Pour les moyennes et grandes charges relatives le rendement du modèle du PK-Weir de la forme triangulaire en plan est inférieur à celui de la forme trapézoïdal en plan. Cette différence de rendement est de l'ordre de 12,5% à cause de sa forme proche du modèle triangulaire.

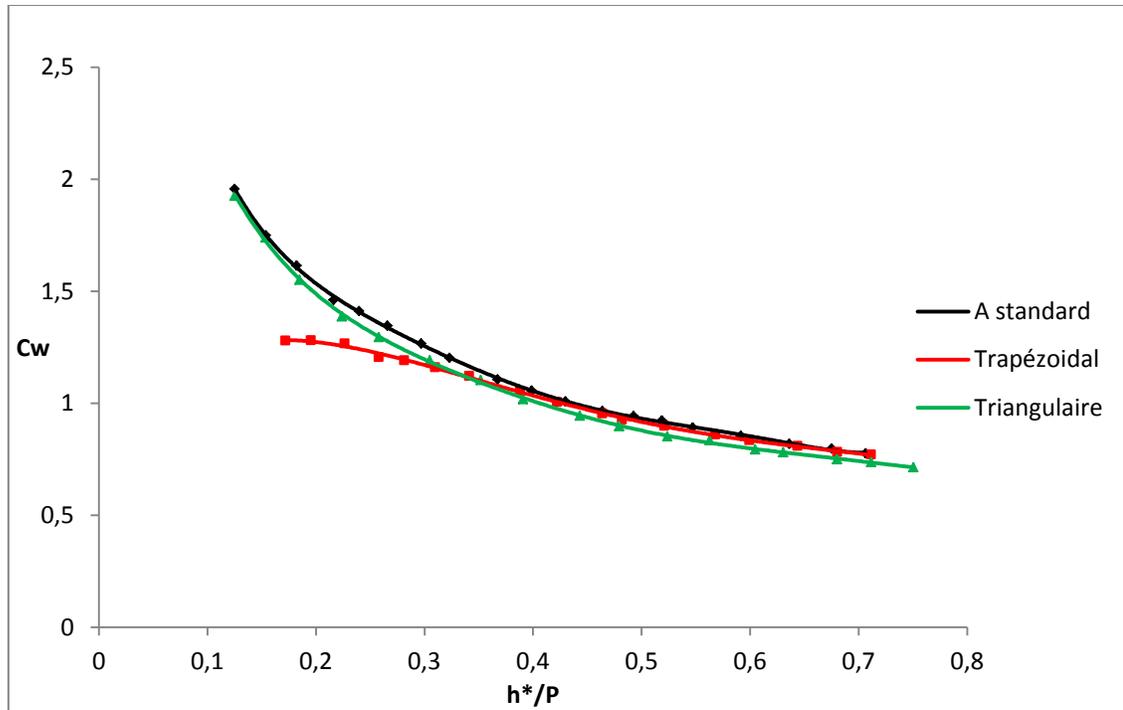


Figure V.12: Variation du coefficient de débit en fonction de la charge relative h^*/P pour les trois formes en plan du PK-Weir triangulaire, trapézoïdale, et triangulaire.

5.3. Effet des corps flottants sur l'écoulement des déversoirs PK-Weir (A standard, A1)

La représentation graphique de la variation du débit en fonction de la charge totale au dessus du seuil déversoir, h^* , pour le type A1 avec et sans corps flottants (figure V.13) montre que :

Pour les faibles débits, mêmes courbes pour l'écoulement avec et sans corps flottants ce qui signifie que l'écoulement est libre.

Dans l'intervalle de débit [90 à 165] l/s, on remarque que la charge a augmenté à cause de ce qu'on appelle encombrement hydraulique au niveau du déversoir puisque les corps flottants sont situés à l'entrée du déversoir PK-Weir.

Dés que le débit atteint ses dernières grandes valeurs [165 à 170] l/s, on remarque que l'écoulement est redevenu libre ce qui signifie l'évacuation de tout les corps flottants (voir annexe 11).

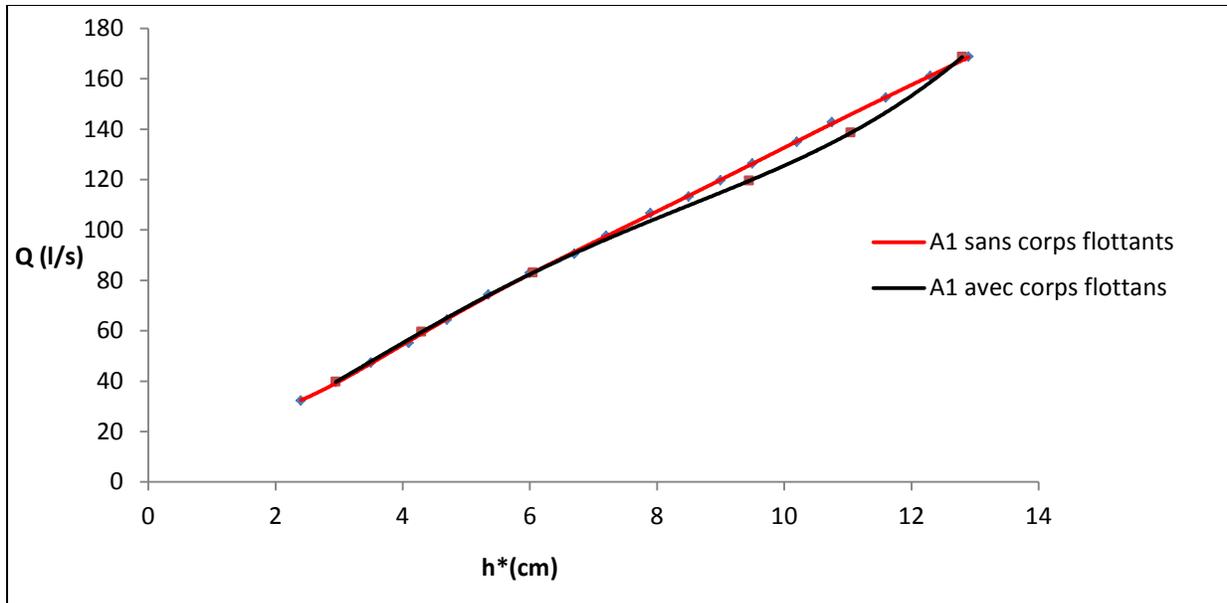


Figure V.13 : Variation du débit en fonction de la charge totale au dessus du seuil du déversoir h^* pour le type A1 avec et sans corps flottants.

La représentation graphique de la variation du débit en fonction de la charge totale au dessus du seuil du déversoir, h^* , pour le type A avec et sans corps flottants (figure V.14) montre que :

- Dans l'intervalle de débit [40 à 120] l/s, on remarque que la charge a augmenté à cause de ce qu'on appelle encombrement au niveau du déversoir. Les corps flottants sont situés au déversoir. La forme du déversoir (A) standard ne comporte pas de rehausses alors les corps flottants se dirigent facilement vers le déversoir et ceci même pour des faibles débits.
- Dès que le débit atteint l'intervalle de débit [130 à 170] l/s, on remarque que l'écoulement est devenu libre donc tout les corps flottants ont été évacués.

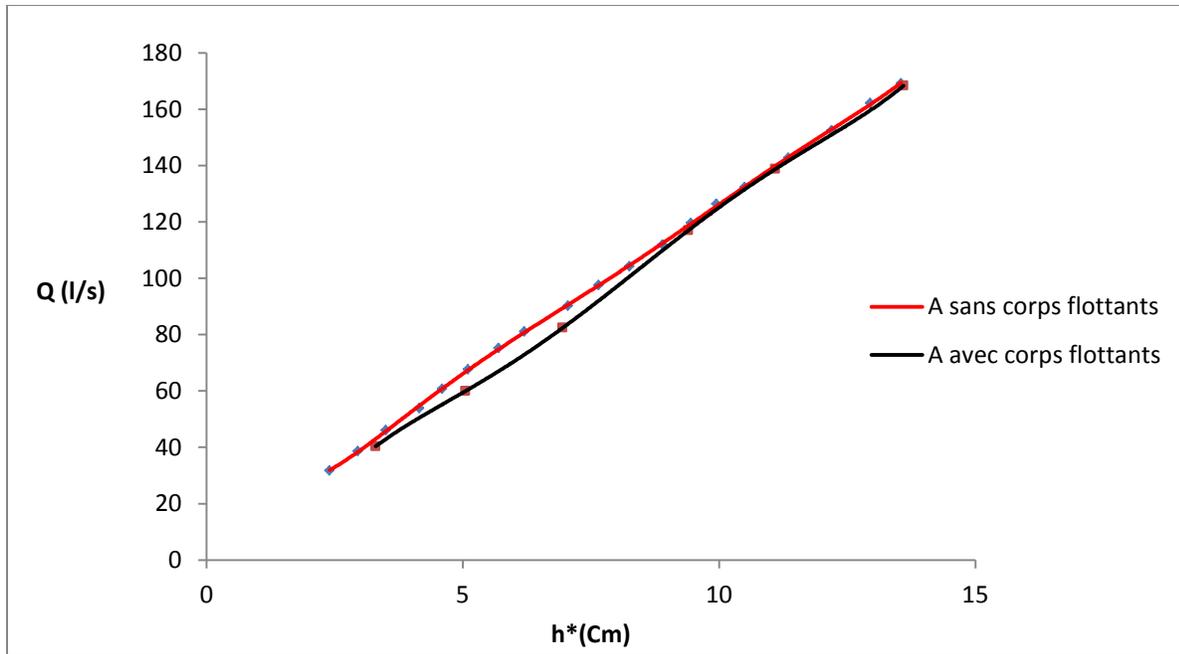


Figure V.14 : Variation du débit en fonction de la charge totale au dessus du seuil du déversoir h^* pour le type A1 avec et sans corps flottants.

6. Conclusion

Cette investigation expérimentale avait comme objectif l'étude de l'influence de quelques paramètres géométrique du PK-Weir sur son fonctionnement hydraulique. Pour ce faire, il était nécessaire de scinder cette analyse expérimentale en trois phases. La première phase a été réalisée sur sept angles d'inclinaison des guideaux, la deuxième a été réalisée pour voir l'effet des corps flottants. La troisième a été faite pour comparer la performance des deux modèles (trapézoïdal et triangulaire).

Les résultats obtenus ont montré que :

- L'ouverture des guideaux de 15° permet de croître le rendement du déversoir PK-Weir par rapport à celle de 0° avec l'accroissement de l'ordre de 3% à 4% pour les faibles et moyennes charges relatives.
- Le choix du modèle d'angle d'ouverture des guideaux de 27° fait croître le rendement d'environ 9 % par rapport au celui d'angle d'ouverture des guideaux de 30° , et d'environ 3 % par rapport au modèle avec l'angle d'ouverture des guideaux de 33° pour les faibles charges relatives et d'environ 1% pour des grandes valeurs de la charge relative.
- Après la comparaison de tous les graphes, on a trouvé que la performance du déversoir muni des guideaux avec une ouverture de 27° est le plus performant.

- Pour les faibles charges relatives, le rendement du modèle du PK-Weir de la forme triangulaire en plan est plus important et d'une manière significative par rapport à celui de la forme trapézoïdal en plan. Cet accroissement est de l'ordre de 28% ;
- Le rendement du modèle du PK-Weir de la forme triangulaire en plan est inférieur à celui de la forme trapézoïdal en plan pour les moyennes et grandes charges relatives;
- Les corps flottants ne sont pas arrêtés sous les porte-à-faux du PK-Weir pour les faibles charges mais par contre, un blocage partiel des alvéoles est observé au niveau du modèle A standard pour les moyennes charges, et du modèle A1 pour les grandes charges;
- Le blocage n'a qu'un impact mineur sur la valeur de la débitance des déversoirs A standard, et A1 pour les moyennes charges relatives (réduction d'environ 10 % du débit).
- L'encombrement hydraulique au niveau du déversoir PK-Weir type A standard dans l'intervalle de débit [90 à 165] l/s;
- L'encombrement hydraulique au niveau du déversoir PK-Weir type A1 dans l'intervalle de débit [40 à 120] l/s à cause des rehausses.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le déversoir en touche de piano a fait l'objet de plusieurs travaux de recherches dans le but de mieux comprendre son fonctionnement hydraulique et d'optimiser sa configuration géométrique.

La bibliographie a montré que ce type de déversoir se caractérise par une forme de crête non rectiligne permettant d'augmenter la longueur du seuil d'une manière significative pour une largeur donnée. Par conséquent, la capacité d'évacuation augmente proportionnellement avec l'augmentation de la longueur du seuil. Cette configuration du seuil non rectiligne engendre un écoulement différent de celui d'un déversoir rectiligne. Ainsi, l'écoulement sur un déversoir en touche de piano se caractérise par deux nappes déversante, 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.

Le déversoir en touche de piano est caractérisé par plusieurs paramètres géométriques se qui ne permet pas une analyse mathématique directe de l'écoulement sur ce type de déversoir. Ainsi, une combinaison d'analyse dimensionnelle et expérimentale a été réalisée dans le but de mieux comprendre l'impact des différents paramètres géométriques sur l'écoulement et de contribuer en conséquence à l'optimisation de la forme du déversoir en touche de piano.

L'étude d'analyse dimensionnelle a permis de définir les différents paramètres adimensionnels qui régissent l'écoulement sur le déversoir en touche de piano. Ceci a permis de limiter le nombre d'essais à réaliser et de connaître la forme générale de la relation qui exprime le coefficient de débit de déversoir en touche de piano à la présence des guideaux.

La première phase de l'expérimentation a été réalisée sur sept angles d'inclinaison des guideaux (0° , 15° , 27° , 30° , 33° , 45° , 60°). Les résultats obtenus ont montré que :

- Pour les faibles charges relatives l'angle d'inclinaison des guideaux n'influe pas sur la capacité d'évacuation (performance) du déversoir.
- Pour les moyennes et fortes charges relatives on a remarqué une différence entre les capacités d'évacuation des différents angles des guideaux mais elle n'est pas importante elle est de l'ordre de 1 à 2%.
- Après la comparaison de tous les graphes on a trouvé que la performance du déversoir muni des guideaux avec l'angle de 27° est meilleur ou plus performant que les autres.

La deuxième phase de l'expérimentation s'est intéressée essentiellement à l'effet des corps flottants. Les essais effectués sur deux modèles de Pkweir (Type A et A1) avec diverses dispositions ont montré que pour des faibles charges, les corps flottants ne sont pas arrêtés sous les porte-à-faux du PK-Weir mais que par contre, un blocage partiel des alvéoles est observé. Il faut alors noter que ce blocage a qu'un impact mineur sur la valeur de la débitance du déversoir pour les moyennes charges relatives (réduction d'environ 10 % du débit).

La troisième phase de l'expérimentation avait pour but de vérifier l'impact de la forme en plan du déversoir sur sa capacité d'évacuation ensuite de déterminer la configuration géométrique la plus efficace. Deux différentes formes en plan ont été testées (forme trapézoïdale et forme triangulaire). Et comparées avec le modèle de référence A standard, on peut dire que la

différence entre les trois modèles est plus significative pour les faibles charges relatives, ceci est logique, puisque la plus grande partie de l'écoulement sous les faibles charges transite à travers les alvéoles amont. Tandis que pour les grandes et moyennes charges, la contribution des alvéoles amont dans l'écoulement est modérée. Donc on peut dire que l'effet de la forme d'entrée se manifeste essentiellement quand la charge sur le déversoir est faible.

Ce travail représente une modeste contribution à l'étude du PK-Weir qui reste un vaste domaine de recherche.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Barcoud, M., Cazaillet, O., Cochet, P., Jones, B.A., Lacroix, S., Laugier, F., Odeyer, C., Vigny, J.P., 2006, « Cost Effective Increase or Storage and Safety of Most Dams using Fusegates or PK-Weirs, Commission International Des Grand Barrages, Vint Deuxième Congrès Des Grand Barrages Barcelona.
- Belaabed F., Ouamane A., février 9-10 2011. Contribution to the study of the Piano Key Weirs submerged by the downstream level, Séminaire International sur Labyrinth et Piano Key Weirs, Université de Liège, Belgique
- Ben Said M., Ouamane A., février 9-10 2011. Study of optimization of labyrinth weir, Séminaire International sur Labyrinth et Piano Key Weirs, Université de Liège, Belgique.
- Ben Said M., 2007. Mémoire Magister en Hydraulique, Étude de l'optimisation des évacuateurs de crues en labyrinthe, Biskra, pp. 78-86.
- Benouniche, N., 2006, « Etude des rehausses fusibles sur un déversoir », Projet de fin d'étude en vue de l'obtention d'un diplôme d'ingénieur, page : 06.
- Carlier M., 1980. Hydraulique générale et appliquée, Eyrolles, pp. 189-215.
- Degoutte G., Royet P., 1992. Hausses fusibles sur déversoirs de barrages, Augmentation de la capacité utile des retenues ou de la sécurité des évacuateurs de crues. CEMAGREF, n° 15, note 1.
- Kharagpur, « Module 4, Hydraulic structures for Flow Diversion and Storage, Lesson 8, Spillways and Energy Dissipators », Version 2 CEIIT.
- Khatsuria, R.M., « Hydraulics of Spillways and Energy Dissipator ».
- Lempérière F., Ouamane A., 2003. The Piano Keys Weir: a new cost-effective solution for spillways, The International Journal on Hydropower & Dams, Issue Four.
- Lempérière F., Vigny J., 2005. International symposium on Dam safety. Analysis and low cost mitigation of the flood risk of Asian dams, Xian
- Lempérière F., Vigny J., 2006. Économie et sécurité des déversoirs du Burkina faso. 1^{er} congrès national des barrages Burkina faso.
- Noui A., 2007. Mémoire Magister en Hydraulique, Etude de l'optimisation de l'évacuateur de crues en touches de piano (PK-Weir), Biskra, pp. 74-79.
- Noui A., Ouamane A., février 9-10 2011. Study optimizing the piano key weir spillways, Séminaire International sur Labyrinth et Piano Key Weirs, Université de Liège, Belgique.

- Ouamane A., février 9-10 2011. Nine years of study of the Piano Key Weir in the university laboratory of Biskra " Lessons and reflections", Séminaire International sur Labyrinth et Piano Key Weirs, Université de Liège, Belgique.
- Ouamane A., Lempérière F., 2006. Amélioration de la forme des déversoirs en labyrinthe pour l'évacuation des grands débits, Séminaire National sur les ressources en eaux et leurs utilisations, Centre Universitaire Khemis Meliana.
- Ouamane A., Lempérière 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.
- 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.
- Ouamane A., Lempérière F., 2010. Study of various alternatives of shape of piano key weirs, HYDRO 2010 - Meeting Demands in a Changing World, Congress Centre, Lisbon, Portugal.
- Ouamane A., 2006. Hydraulic and Costs data for various Labyrinth Weirs, 22th Congress on Large Dams, ICOLD, Q84, Barcelona.
- 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.

Annexes

Annexes

Annexe 01 : Tableau de calcul pour une ouverture d'angle de 0°

Q(l/s)	$h_{\text{mesurée}}(\text{cm})$	$h_p(\text{cm})$	$V^2/2g$	$h^*(\text{cm})$	h^*/P	Cw
33.284	22.4	3.2	0.00203923	3.20203923	0.16677288	1.3323608
40.363	22.8	3.6	0.00294204	3.60294204	0.18765323	1.35370436
48.404	23.4	4.2	0.00411267	4.20411267	0.2189642	1.2879412
55.277	23.85	4.65	0.00525199	4.65525199	0.24246104	1.26228081
61.053	24.35	5.15	0.00626064	5.15626064	0.26855524	1.19599956
67.053	24.75	5.55	0.0074148	5.5574148	0.28944869	1.17391134
77.245	25.5	6.3	0.00951276	6.30951276	0.32862046	1.11789998
83.033	25.9	6.7	0.01079765	6.71079765	0.34952071	1.09550867
90.475	26.65	7.45	0.01240394	7.46240394	0.38866687	1.01797419
99.737	27.35	8.15	0.0146236	8.1646236	0.42524081	0.98056944
107.74	28.1	8.9	0.01652771	8.91652771	0.46440248	0.92813175
114.346	28.6	9.4	0.01822918	9.41822918	0.49053277	0.90738877
118.879	29	9.8	0.01937748	9.81937748	0.51142591	0.88614648
125.015	29.4	10.2	0.02107816	10.2210782	0.53234782	0.8774924
134.22	30.25	11.05	0.02346837	11.0734684	0.57674314	0.83544533
140.847	30.8	11.6	0.02527762	11.6252776	0.60548321	0.8150212
153.971	32	12.8	0.02880839	12.8288084	0.6681671	0.76857412
163.483	32.8	13.6	0.03148615	13.6314861	0.70997324	0.74504773
169.655	33.45	14.25	0.03307635	14.2830764	0.74391023	0.72087561

Tel que : $h_p = h_{\text{mesurée}} - h_0$

Annexe 02 : Tableau de calcul pour une ouverture d'angle de 15°

Q(l/s)	$h_{\text{mesurée}}(\text{cm})$	$h_p(\text{cm})$	$V^2/2g$	$h^*(\text{cm})$	h^*/P	Cw
32.109	22.15	2.95	0.00192081	2.95192081	0.15374588	1.45209835
40.77	22.75	3.55	0.00300884	3.55300884	0.18505254	1.39628022
50.926	23.45	4.25	0.00454174	4.25454174	0.22159072	1.33102646
59.388	24.05	4.85	0.00600629	4.85600629	0.25291699	1.27293475
67.352	24.6	5.4	0.00753241	5.40753241	0.28164231	1.22850833
75.606	25.15	5.95	0.00925777	5.95925777	0.31037801	1.19204956
83.304	25.8	6.6	0.01091661	6.61091661	0.34431857	1.12408627
91.328	26.5	7.3	0.01272203	7.31272203	0.38087094	1.05928215
99.653	27.15	7.95	0.01472524	7.96472524	0.41482944	1.01685841
106.767	27.75	8.55	0.01647342	8.56647342	0.44617049	0.97669786
112.987	28.2	9	0.01810011	9.01810011	0.46969271	0.95693448
120.43	28.65	9.45	0.02017839	9.47017839	0.49323846	0.94781538
128.187	29.3	10.1	0.02225284	10.1222528	0.52720067	0.91296582
136.794	30	10.8	0.02462549	10.8246255	0.56378258	0.8809962
144.129	30.6	11.4	0.02668241	11.4266824	0.59513971	0.85584958
154.036	31.4	12.2	0.02952055	12.2295206	0.6369542	0.82610336
162.013	32.05	12.85	0.03183413	12.8818341	0.67092886	0.80372896

169.979

32.7

13.5

0.03416936

13.5341694

0.70490465

0.78302236

Annexe 03 : Tableau de calcul pour une ouverture d'angle de 30°

Q(l/s)	$h_{\text{mesurée}}(\text{cm})$	$h_p(\text{cm})$	$V^2/2g$	$h^*(\text{cm})$	h^*/P	Cw
33.1002245	22.5	3.3	0.00200711	3.30200711	0.17197954	1.26529048
41.2350122	23	3.8	0.0030415	3.8030415	0.19807508	1.27525147
47.9177608	23.5	4.3	0.00401161	4.30401161	0.22416727	1.23087137
55.4229747	24	4.8	0.00524316	4.80524316	0.25027308	1.20682162
61.4723974	24.4	5.2	0.0063324	5.2063324	0.27116315	1.18688493
67.0143177	24.75	5.55	0.00740625	5.55740625	0.28944824	1.17323683
74.9373106	25.35	6.15	0.00901326	6.15901326	0.32078194	1.12449544
83.2569265	26	6.8	0.01080799	6.81080799	0.35472958	1.07435726
93.400069	26.8	7.6	0.01313287	7.61313287	0.39651734	1.01983142
101.216596	27.4	8.2	0.0150284	8.2150284	0.42786606	0.98597165
107.664282	27.95	8.75	0.01660967	8.76660967	0.45659425	0.95137218
114.813211	28.5	9.3	0.01845559	9.31845559	0.48533623	0.9257682
121.416672	28.95	9.75	0.0202556	9.7702556	0.50886748	0.9118969
127.81281	29.45	10.25	0.0219869	10.2719869	0.53499932	0.8904694
135.667732	30	10.8	0.02422166	10.8242217	0.56376154	0.87379157
140.099604	30.4	11.2	0.02541508	11.2254151	0.58465704	0.85439677
144.058905	30.8	11.6	0.02644364	11.6264436	0.60554394	0.83348172
152.162553	31.35	12.15	0.02886385	12.1788639	0.63431583	0.82115271
161.637554	32.1	12.9	0.03162502	12.931625	0.67352214	0.79723971
168.768554	32.6	13.4	0.03381462	13.4338146	0.69967784	0.78617424

Annexe 04 : Tableau de calcul pour une ouverture d'angle de 60°

Q(l/s)	$h_{\text{mesurée}}(\text{cm})$	$h_p(\text{cm})$	$V^2/2g$	$h^*(\text{cm})$	h^*/P	Cw
30.561	22.1	2.9	0.00174428	2.90174428	0.15113251	1.41809446
38.728	22.6	3.4	0.0027345	3.4027345	0.17722576	1.41517216
45.79	23.1	3.9	0.00373286	3.90373286	0.20331942	1.3616855
53.222	23.65	4.45	0.0049143	4.4549143	0.23202679	1.2982504
60.01	24.15	4.95	0.0061045	4.9561045	0.25813044	1.24749625
67.937	24.65	5.45	0.00764636	5.45764636	0.28425241	1.2221502
75.001	25.25	6.05	0.00906925	6.05906925	0.31557652	1.15341205
83.474	25.95	6.75	0.0108885	6.7608885	0.35212961	1.08911031
89.237	26.4	7.2	0.01219948	7.21219948	0.37563539	1.05674371
96.366	27	7.8	0.01385941	7.81385941	0.40697184	1.01193297
104.709	27.75	8.55	0.01584447	8.56584447	0.44613773	0.95797691
112.081	28.3	9.1	0.01773609	9.11773609	0.47488209	0.9337439
120.126	28.85	9.65	0.01990986	9.66990986	0.50364114	0.91628311
126.565	29.35	10.15	0.0216486	10.1716486	0.52977336	0.89485549
133.573	29.95	10.75	0.02352726	10.7735273	0.56112121	0.86637939
142.388	30.7	11.5	0.02593742	11.5259374	0.60030924	0.83461332
147.061	31.25	12.05	0.02706785	12.0770678	0.62901395	0.80367704

155.256	31.9	12.7	0.029406	12.729406	0.6629899	0.78408382
162.544	32.5	13.3	0.03148776	13.3314878	0.69434832	0.76591279

Annexe 05 : Tableau de calcul pour une ouverture d'angle de 27°

Q(l/s)	$h_{\text{mesurée}}(\text{cm})$	$h_p(\text{cm})$	$V^2/2g$	$h^*(\text{cm})$	h^*/P	Cw
30.676	22.05	2.85	0.00176169	2.85176169	0.14852925	1.46101672
37.545	22.55	3.35	0.00257616	3.35257616	0.17461334	1.40284741
45.585	23.1	3.9	0.00369951	3.90369951	0.20331768	1.35560666
52.184	23.6	4.4	0.00473553	4.40473553	0.22941331	1.29474402
59.686	24	4.8	0.00608077	4.80608077	0.25031671	1.29930821
67.378	24.5	5.3	0.00757276	5.30757276	0.27643608	1.26386441
75.031	25.1	5.9	0.00913808	5.90913808	0.30776761	1.19806624
82.423	25.7	6.5	0.01073458	6.51073458	0.33910076	1.13796718
91.371	26.4	7.2	0.01278993	7.21278993	0.37566614	1.08188166
99.69	27.1	7.9	0.01476802	7.91476802	0.4122275	1.02688218
107.542	27.75	8.55	0.01671345	8.56671345	0.44618299	0.98374617
115.693	28.35	9.15	0.01885794	9.16885794	0.47754468	0.95578569
123.257	28.9	9.7	0.02091771	9.72091771	0.5062978	0.93277522
133.691	29.7	10.5	0.02381045	10.5238105	0.54811513	0.89819152
140.596	30.25	11.05	0.02575102	11.075751	0.57686203	0.87486188
148.235	30.9	11.7	0.02788734	11.7278873	0.61082747	0.84653981
155.332	31.4	12.2	0.03001939	12.2300194	0.63698018	0.83300291
164.045	32.05	12.85	0.03263768	12.8826377	0.67097071	0.81373335
171.359	32.7	13.5	0.03472643	13.5347264	0.70493367	0.78933071

Annexe 06 : Tableau de calcul pour une ouverture d'angle de 33°

Q(l/s)	$h_{\text{mesurée}}(\text{cm})$	$h_p(\text{cm})$	$V^2/2g$	$h^*(\text{cm})$	h^*/P	Cw
34.002	22.4	3.2	0.00212816	3.20212816	0.16677751	1.36104569
42.316	22.95	3.75	0.00321067	3.75321067	0.19547972	1.33483167
48.885	23.4	4.2	0.00419482	4.20419482	0.21896848	1.3007016
55.574	23.95	4.75	0.005284	4.755284	0.24767104	1.22923034
61.109	24.2	5	0.00631556	5.00631556	0.2607456	1.25127898
69.223	24.8	5.6	0.00788454	5.60788454	0.29207732	1.19557858
76.578	25.3	6.1	0.00943342	6.10943342	0.31819966	1.16313178
82.534	25.8	6.6	0.01071573	6.61071573	0.34430811	1.11374681
92.473	26.55	7.35	0.01301454	7.36301454	0.38349034	1.06159231
99.946	27.2	8	0.01478005	8.01478005	0.41743646	1.0103092
105.879	27.7	8.5	0.0162351	8.5162351	0.44355391	0.97715773
112.907	28.25	9.05	0.01803642	9.06803642	0.47229356	0.94836887
119.897	28.7	9.5	0.01995844	9.51995844	0.49583117	0.9362289
128.341	29.4	10.2	0.02221464	10.2222146	0.53240701	0.9006877

135.911	30	10.8	0.0243086	10.8243086	0.56376607	0.87534784
145.62	30.7	11.5	0.02712826	11.5271283	0.60037126	0.85342556
154.086	31.4	12.2	0.02953972	12.2295397	0.63695519	0.82636957
164.317	32.2	13	0.03255516	13.0325552	0.67877891	0.80105889
169.546	32.65	13.45	0.03406109	13.4840611	0.70229485	0.78538533

Annexe 07 : Tableau de calcul pour une ouverture d'angle de 45°

angle 45°

Q(l/s)	$h_{\text{mesurée}}(\text{cm})$	$h_p(\text{cm})$	$V^2/2g$	$h^*(\text{cm})$	h^*/P	Cw
32.883	22.25	3.05	0.00200482	3.05200482	0.15895858	1.41455525
52.45	23.6	4.4	0.00478393	4.40478393	0.22941583	1.30132233
83.235	25.8	6.6	0.01089853	6.61089853	0.34431763	1.1231598
120.765	28.9	9.7	0.02008043	9.72008043	0.50625419	0.91403453
139.871	30.6	11.4	0.02512914	11.4251291	0.59505881	0.83073462
169.015	32.95	13.75	0.03345977	13.7834598	0.71788853	0.75755504

Annexe 08 : Tableau de calcul pour la forme en plan trapézoïdale

Q(l/s)	$h_{\text{mesurée}}(\text{cm})$	$h_p(\text{cm})$	$V^2/2g$	$h^*(\text{cm})$	h^*/P	Cw
33.432	49.6	3.3	0.00075219	3.30075219	0.17191418	1.27870182
40.543	50.05	3.75	0.00109188	3.75109188	0.19536937	1.27998722
50.12	50.65	4.35	0.0016401	4.3516401	0.22664792	1.26636212
57.893	51.25	4.95	0.00215115	4.95215115	0.25792454	1.20492918
65.238	51.7	5.4	0.00269706	5.40269706	0.28139047	1.19154657
73.451	52.25	5.95	0.00336645	5.95336645	0.31007117	1.15979196
82.034	52.85	6.55	0.00412953	6.55412953	0.34136091	1.12136672
93.543	53.75	7.45	0.00523785	7.45523785	0.38829364	1.05401149
101.08	54.4	8.1	0.00600836	8.10600836	0.42218794	1.00457176
110.51	55.2	8.9	0.00702811	8.90702811	0.46390771	0.95351746
113.87	55.55	9.25	0.00739226	9.25739226	0.48215585	0.92726235
124.134	56.3	10	0.0086113	10.0086113	0.52128184	0.89920005
135.055	57.2	10.9	0.00995441	10.9099544	0.56822679	0.85961122
142.1	57.8	11.5	0.01084895	11.510849	0.59952338	0.83456343
153.37	58.65	12.35	0.01236359	12.3623636	0.6438731	0.80930916
160.87	59.35	13.05	0.01336099	13.063361	0.68038339	0.78148199
169.75	59.95	13.65	0.01465206	13.6646521	0.71170063	0.77079381

Annexe 09 : Tableau de calcul pour la forme en plan triangulaire

Q(l/s)	$h_{\text{mesurée}}(\text{cm})$	$h_p(\text{cm})$	$V^2/2g$	$h^*(\text{cm})$	h^*/P	Cw
31.22	49.8	2.4	0.00065215	2.40065215	0.12503397	1.92515344
38.45	50.35	2.95	0.0009736	2.9509736	0.15369654	1.7397012
45.25	50.95	3.55	0.00132545	3.55132545	0.18496487	1.55081209
53.96	51.7	4.3	0.00184515	4.30184515	0.22405444	1.38712655
62.22	52.35	4.95	0.00240892	4.95240892	0.25793796	1.29488609
73.56	53.25	5.85	0.00328388	5.85328388	0.30485854	1.19143031
84.46	54.15	6.75	0.0042236	6.7542236	0.35178248	1.10360645
91.21	54.9	7.5	0.00482647	7.50482647	0.39087638	1.01755473
102.06	55.9	8.5	0.00588318	8.50588318	0.44301475	0.94363219
109.19	56.6	9.2	0.0066101	9.2066101	0.47951094	0.89651909
118.44	57.45	10.05	0.00760595	10.057606	0.52383364	0.85169241
129.27	58.2	10.8	0.00888576	10.8088858	0.5629628	0.83435844
136.86	59	11.6	0.0097571	11.6097571	0.60467485	0.79353875
143.45	59.5	12.1	0.01058358	12.1105836	0.63075956	0.78069114
154.28	60.45	13.05	0.01195167	13.0619517	0.68030998	0.74959007
162.31	61.05	13.65	0.01303111	13.6630311	0.7116162	0.73714173
170.36	61.8	14.4	0.01409114	14.4140911	0.75073391	0.71402438

Annexe 10 : Tableau de calcul pour le type A standard

Q(l/s)	$h_{\text{mesurée}}(\text{cm})$	$h_p(\text{cm})$	$V^2/2g$	$h^*(\text{cm})$	h^*/P	Cw
31.74	48.15	2.40	0.00070749	2.40070749	0.12503685	1.9571511
38.67	48.7	2.95	0.00103321	2.95103321	0.15369965	1.74960226
46.12	49.25	3.50	0.00144615	3.50144615	0.18236699	1.61452371
53.88	49.9	4.15	0.00193678	4.15193678	0.21624671	1.46075639
60.73	50.35	4.60	0.00242881	4.60242881	0.23970983	1.41074645
67.62	50.85	5.10	0.00296835	5.10296835	0.2657796	1.34544875
75.19	51.45	5.70	0.00360809	5.70360809	0.29706292	1.26608212
81.05	51.95	6.20	0.00413368	6.20413368	0.32313196	1.20297777
90.31	52.8	7.05	0.00501173	7.05501173	0.36744853	1.10539001
97.58	53.4	7.65	0.00575479	7.65575479	0.39873723	1.0565866
104.24	54	8.25	0.00645993	8.25645993	0.43002395	1.00778964
111.95	54.65	8.90	0.00732029	8.90732029	0.46392293	0.96589474
119.62	55.2	9.45	0.0082346	9.4582346	0.49261639	0.9432243
126.37	55.7	9.95	0.00906787	9.95906787	0.51870145	0.92223638
132.42	56.25	10.50	0.00981227	10.5098123	0.54738606	0.89143042
142.74	57.1	11.35	0.0114868	11.3611487	0.59172649	0.8549459
152.49	57.95	12.20	0.01244491	12.2124449	0.63606484	0.8195279
162.22	58.7	12.95	0.01381386	12.9638139	0.67519864	0.79713435
169.23	59.3	13.55	0.01480459	13.5648046	0.70650024	0.7769326

Annexe 11 : tableau de calcul pour le type de déversoir A1

Q(l/s)	Hp(cm)	hm(cm)	$V^2/2g$	h*(cm)
39.74	49.65	2.95	0.00106128	2.95106128
59.53	51	4.3	0.00229075	4.30229075
83.01	52.75	6.05	0.00424014	6.05424014
119.52	56.15	9.45	0.00801486	9.45801486
138.59	57.75	11.05	0.01033303	11.060333
168.65	59.5	12.8	0.01462865	12.8146286