

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie Civil et d'Hydraulique
Ref:...../2011



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة المدنية و الري
2011/..... المرجع:

Mémoire présenté en vue de l'obtention
Du diplôme de
Magister en hydraulique

Option : Ouvrages hydrotechniques

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

Présenté par :
Belaabed Faris

Soutenu publiquement le : 13/10/2011
Devant le jury composé de :

Dr. Debabeche mahmoud.	Professeur.	Président.	Université de biskra
Dr. Ouamane ahmed.	Maître de conférences.	Directeur de mémoire.	Université de biskra
Dr. Benmebarek naima.	Professeur.	Examinatrice.	Université de biskra
Dr. Bouziane mohamed Toufik.	Maître de conférences.	Examinateur.	Université de biskra

Promotion 2010-2011

Résumé

Les barrages réservoirs sont confrontés à deux problèmes fondamentaux. Le premier est la maîtrise des inondations et le deuxième problème est lié à la perte de la capacité de stockage due à l'envasement du barrage. Une de solutions possibles pour ces problèmes est le niveau augmentant le seuil du déversoir existant, par sa rénovation dans le PK-Weir.

Le PK-Weir est construit à travers les fleuves et dans les réservoirs des barrages quand la limitation d'un débit ou d'un niveau d'eau doit être assurée en états d'écoulement libre ou noyé. Les diverses études et recherche effectuée sur le PK-Weir se sont focalisées seulement sur les conditions d'écoulement libre. Le travail actuel présente une étude de l'effet de la noyade par aval sur la performance des déversoirs en touche de piano (PK-Weir).

Cette étude est basée principalement sur l'expérimentation sur modèles physiques complétée par une analyse mathématique basée sur les résultats obtenus expérimentalement.

Abstract

Dam reservoirs are confronted with two fundamental problems. The first is the mastery of floods and the second problem is related to the loss of the storage capacity due to the silting of the dam. One of possible solutions for these problems is the raising level of the sill of the existing weir by its renovation in PK-Weir.

The PK-Weir is built across the rivers and in the reservoirs of dams when the limitation of a discharge or water level must be assured in normal or submerged flow conditions. Various studies and researches carried out on the PK-Weir have focused only in the normal flow conditions. The present paper presents a study on the effect of the downstream level on the performance of the PK-Weir.

This study will be based primarily on physical model experiments and completed by a mathematical analysis based in the experimental results.

ملخص

إن السدود تواجه مشكلتين أساسيتين. الأولى تتمثل في احتواء الفيضانات والثانية مرطبة بضياح سعة التخزين بسبب الطمي. أحد الحلول لهذه المشاكل هي زيادة في علو الهدارات الحالية وذلك بالاستعانة بالهدار ذو شكل مفاتيح البيانو (PK-Weir).

الهدار PK-Weir يوضع على الأنهار وفي السدود وذلك من أجل تحديد كمية التفريغ الزائدة وهذا لضمان جريان العادي أو المغمور. هناك عدة دراسات مطبقة على الهدار PK-Weir قد أجريت إلا في إطار الجريان العادي. وعلى هذا الأساس قدم هذا العمل لدراسة تأثير الجريان المغمور على مرد ودية الهدار PK-Weir.

هذه الدراسة اعتمدت أساسا على تجارب النماذج المخبرية واكتملت بالتحليل الرياضي مرتكزا على نتائج التجارب.

Remerciement

Au terme de cette étude, je tiens à remercier mon promoteur Monsieur OUAMANE Ahmed pour son aide appréciable, son soutien et ses conseils fructueux qui m'ont facilité la réalisation de ce travail.

Je remercie également tous mes professeurs et particulièrement, M^r : ACHOUR Bachir, M^r : BOUZIANE Mohamed Toufik, M^r : BOUAZIZI Amor, M^r : GUELLOUL Mohamed et BENAÏSSA Sahraoui pour l'aide précieuse, qu'ils m'ont apportée durant l'élaboration de ce modeste travail.

Aussi, je me permets d'exprimer tout mon respect aux membres de jury qui me feront l'honneur d'apprécier notre travail.

Je remercie encore tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans l'élaboration de cette étude.

Merci à tous.

BELAABED FARIS

Dédicace

Je rends un grand hommage à travers ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance envers :

Ma mère qui a beaucoup sacrifiée pour moi et pour l'affection qu'elle m'a toujours portée.

Mon père qui m'a tout donné pour que j'atteigne mon but dans son sens spirituel.

A mon oncle Omar qui m'a orienté vers cette filière noble, encouragé et m'a beaucoup soutenu.

Je le dédie également à :

Mes frères et mes sœurs : Sahraoui, Mounir, Hakim Farida et Soria.

En un mot, à toute ma famille, mes amis de l'université Biskra et l'E.N.S.H et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.

Pour vous je présente ce travail

BELAABED FARIS

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Première Partie

Etude bibliographique

CHAPITRE I : Déversoir rectiligne

I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition du déversoir.....	3
I.3 Déversoirs rectiligne.....	4
I.3.1 Déversoir en mince paroi.....	4
I.3.1.1 Déversoir à crête mince en écoulement dénoyé.....	6
I.3.1.2 Déversoir à crête mince en écoulement noyé.....	6
I.3.2 Déversoir à seuil épais.....	8
I.3.2.1 Déversoir à crête épaisse en écoulement dénoyé.....	8
I.3.2.2 Déversoir à crête épaisse en écoulement noyé.....	9

CHAPITRE II : Déversoir non rectiligne

II.1 Introduction.....	10
II.2 Différentes formes des déversoirs non rectilignes	10
II.2.1 Déversoir en Labyrinthe.....	10
II.2.1.1 Définition.....	10
II.2.1.2 Géométrie du déversoir en labyrinthe.....	11
II.2.1.3 Description de l'écoulement sur un déversoir en labyrinthe.....	12
a- Phase complètement aérée.....	12
b- Phase partiellement aérée.....	12
c- Phase de transition.....	13
d- Phase déprimée.....	13
II.2.1.4 Effet des paramètres géométriques sur la performance.....	13
II.2.1.4.1 Charge relative, h/P	14
II.2.1.4.2 Accroissement de la longueur, L/W	14
II.2.1.4.3 Rapport d'aspect vertical, W/P	15
II.2.1.4.4 Forme de la crête.....	15
II.2.1.4.5 Impact du nombre de cycles, n	16
II.2.1.4.6 Impact de la profondeur d'eau en aval h_d/P	17
II.2.1.5 Analyse numérique du débit du déversoir en labyrinthe	17
II.2.1.6 Effet de la noyade sur l'écoulement des déversoirs en Labyrinthe.....	22
II.2.2 Déversoir en labyrinthe fusible.....	28

II.2.2.1 Définition.....	28
II.2.2.2 Principe de fonctionnement des hausses fusibles.....	30
II.2.2.3 Caractéristiques de débit des hausses fusibles.....	31
II.2.3 Blocs fusibles.....	33
II.2.3.1 Définition.....	33
II.2.3.2 Blocs fusibles permettant le déversement avant renversement...	34
II.2.4 Déversoirs en touches de Piano (PK-Weir).....	37
II.2.4.1 Définition.....	37
II.2.4.2 Configuration géométrique du PK-Weir.....	37
1)- PK-Weir Type A.....	38
2)- PK-Weir Type B.....	39
II.2.4.3 Mode d'écoulement sur le PK-Weir.....	40
II.2.4.4 Performance hydraulique.....	40
II.2.4.4.1 Rapport d'aspect vertical, W/P.....	41
II.2.4.4.2 Longueur relative, L/W.....	41
II.2.4.4.3 Impact de la largeur des alvéoles a et b.....	42
II.2.4.4.4 Impact des corps flottants.....	43
II.2.4.4.5 Impact de la longueur des porte-à-faux.....	44
III. Conclusion.....	46

Deuxième Partie

Etude expérimentale

CHAPITRE I : Description du dispositif et protocole expérimentaux

I.1 Introduction.....	48
I.2 Modèles expérimentaux.....	48
I.3 Description de l'organisation expérimentale.....	51
I.3.1 Description de la station d'expérimentation.....	51
I.3.2 Instrumentation de mesure.....	54
I.3.2.1 Mesure des profondeurs d'eau.....	54
I-3-2-2 Mesure des débits.....	55
I-3-3 Procédure expérimentale.....	55

CHAPITRE II : Résultats expérimentaux

II.1 Introduction.....	57
II.2 Interprétation et discussion des résultats expérimentaux réalisés dans des conditions d'écoulement libre.....	57
II.2.1 Effet de l'emplacement du déversoir.....	59
a- PK-Weir type A1m.....	59
b- PK-Weir type A.....	60

c- Labyrinthe arrondi.....	61
II.2.2 Effet de la forme d'entrée au pied du déversoir.....	62
II.2.3 Effet de la forme du radier des alvéoles de sortie et d'entrée.....	63
II.2.3.1 Effet de la forme de radier des alvéoles de sortie.....	64
a- Cas du PK-Weir type Alm.....	64
b- Cas du labyrinthe arrondi.....	65
II.2.3.2 Effet de la forme de radier des alvéoles d'entrée.....	66
II.2.3.3 Effet de l'importance de l'inclinaison du radier amont.....	68
II.3 Interprétation et discussion des resultants expérimentaux réalisés dans des conditions d'écoulement noyé.....	69
II.3.1 Effet de la forme du radier aval (encombrement aval).....	71
II.3.2 Effet du débit de transit sur la noyade.....	71
II.3.3 Effet du type d'obstacle en aval du déversoir	72
II.3.4 Effet du ratio L/W.....	74
II.3.5 Effet de la contraction latérale.....	74
II.3.6 Effet de la submersion sur le coefficient de debit.....	76
II.3.7 La comparaison de l'effet de la noyade entre le PK-Weir et le déversoir en labyrinthe.....	79
II.4 Analyse des resultants expérimentaux pour la representation du coefficient de noyade.....	80
II.4.1 Expression du coefficient de noyade par l'analyse statistique.....	81
II.5 Conclusion.....	84
Conclusion générale.....	87
Liste des notations.....	91
Références bibliographique.....	92

Liste des figures

Première Partie

Etude bibliographique

Figure I.01 : Déversoir dénoyé (A) et déversoir noyé (B) (Vazquez J, 2000).....	4
Figure I.02 : Schéma d'un déversoir rectiligne.....	4
Figure I.03 : Déversoir en mince paroi standard (Vazquez J, 2000).....	5
Figure I.04 : Schéma de l'écoulement sur un déversoir à crête mince dans la condition dénoyé.....	6
Figure I.05 : Coupe longitudinale d'un déversoir à crête mince en écoulement noyé.....	6
Figure I.06 : Abaque donnant la valeur du coefficient de noyade K en fonction de h_1/h_2 pour un déversoir à crête mince en écoulement noyé. (D'après King).....	7
Figure. I.07 : Déversoirs à seuil épais, géométrie polygonale.....	8
Figure I.08 : Coupe longitudinale d'un déversoir à crête épaisse en écoulement dénoyé ($Z_2 < Z_{seuil}$).....	9
Figure I.09 : Coupe longitudinale d'un déversoir à crête épaisse en écoulement noyé avec $Z_2 > Z_{seuil}$	9
Figure I.10 : Transition entre l'écoulement noyé et celui dénoyé pour un déversoir rectangulaire à crête épaisse et arête amont arrondie, à paroi aval verticale ou inclinée de pente $1/4$	9
Figure II.01 : Déversoirs non rectiligne.....	10
Figure II.02 : Vue en perspective d'un déversoir labyrinthe.....	10
Figure II.03 : Forme en plan du déversoir en labyrinthe (a) triangulaire, (b) trapézoïdale et (c) rectangulaire.....	11
Figure II. 04 : Définition des paramètres du déversoir en labyrinthe (Lux et al. 1984).....	12
Figure II. 05 : Courbes de performance, en fonction de la charge relative (Hay et Taylor, 1970).....	14
Figure II. 06 : Courbes de performance en fonction des paramètres géométriques adimensionnels.....	15
Figure II. 07 : Différentes forme de crêtes.....	16
Figure II. 08 : Effet de la section de la crête sur la performance (Hay et Taylor, 1970).....	16
Figure II.09 : Effet de la noyade sur la performance.....	17
Figure II.10 : Coefficients de debit en fonction de L/W et W/P (Hinchliff, 1984) A- Triangulaire, B- Trapézoïdale.....	18
Figure II.11 : Disposition et details du déversoir en labyrinthe (Tullis, 1995).....	19
Figure II.12 : Coefficient de la crête pour le déversoir rectiligne.....	20
Figure II.13: Débit en fonction de largeur de alvéoles pour L/W=4 (Ben said .M ,2007).....	21
Figure.II.14: Coefficient de débit en fonction de l'emplacement de modèle (Ben said .M ,2007).....	21
Figure II.15 : Paramètres et nomenclature du déversoir à écoulement libre et	

noyé (Tullis, 2006).....	22
Figure II.16 : Paramètres géométriques typiques pour les déversoirs en labyrinthe.....	24
Figure. II.17 : Rapport sans dimensions décrivant l'influence de la noyade sur le niveau à l'amont du déversoir rectiligne (Tullis,2006)	25
Figure II.18: Rapport sans dimensions décrivant la performance de déversoir en labyrinthe noyé.....	25
Figure II.19 : Comparaison de l'effet de la noyade entre les déversoirs en labyrinthe et rectiligne.....	26
Figure II.20 : Paramètres et nomenclature du déversoir à écoulement libre et submergé (R. Lopes,Motos et J.F. Melo 2008).....	27
Figure.II.21 : Rapport sans dimensions, H^*/H en fonction H_d/H pour le déversoir labyrinthe noyé. La comparaison entre le labyrinthe expérimental submerge des données et formule de Tullis et al. (2007) : a) $\alpha = 30^\circ$ (EP1, EP2) ; b) $\alpha = 12^\circ$ (EP-3EP4).....	28
Figure II.22: Schéma des hausses fusibles.....	29
Figure II.23 : Disposition des hausses fusibles.....	29
Figure II.24 : Hausse fusible fonctionne comme un barrage.....	30
Figure II.25 : Hausse fusible fonctionne comme un déversoir.....	30
Figure II.26 : Alimentation de la chambre de mise en pression.....	31
Figure II.27 : L'eau bascule la hausse.....	31
Figure II.28 : Courbe des coefficients de débit obtenu expérimentalement (Falvey, 1995).....	32
Figure II.29 : Vue en perspective d'un déversoir Blocs fusibles.....	33
Figure II.30 : Les deux types de blocs fusibles(On notera les essais de murs séparateurs sur la photo de gauche).....	34
Figure II.31 : Bloc type.....	35
Figure II.32: Disposition générale et murs séparateurs.....	35
Figure II.33 : Diagramme de stabilité.....	36
Figure II.34 : Comparaison d'un seuil classique et d'un seuil équipé de blocs fusibles.....	37
Figure II.35 : Exemple de phases de construction.....	37
Figure II.36 : Schéma d'un élément du déversoir en clefs de Piano (P-KWeir)...	38
Figure II.37 : PK-Weir de type A.....	39
Figure II.38 : PK-Weir de type B.....	39
Figure II.39 : Ecoulement en deux nappes déversante sur un cycle de PKWeir (Ouamane,2006b).....	40
Figure II.40 : Coefficient de débit en fonction du rapport de l'aspect vertical W/P (Ouamane, 2006b).....	41
Figure II.41 : Coefficient de débit en fonction du ratio L/W (Ouamane, 2006b)	42
Figure II.42 : Coefficient de débit en fonction de la largeur des alvéoles (Ouamane, 2006b).....	42
Figure II.43: Fonctionnement du PK-Weir avec encombrement de l'entrée par des corps flottants.....	43
Figure II.44 : Coefficient de débit en fonction de la présence des corps flottants	43
Figure II.45: Coefficient de débit en fonction de la longueur des porte-à-faux (Ouamane, 2006b).....	44
Figure II.46: Comparaison de débit entre le PK-Weir et le déversoir Creager (Ouamane 2006c).....	44

Figure II.47: Courbe des débits en fonction du ratio L/W (Noui.A, 2007).....	45
Figure II.48: Coefficient de débit en fonction des largeurs des alvéoles amont et aval (Noui.A,2007).....	45

Deuxième Partie

Etude expérimentale

Figure I.01 : PK-Weir type A1m.....	49
Figure I.02 : PK-Weir type A2m.....	49
Figure I.03 : PK-Weir type A.....	49
Figure I.04 : Labyrinthe rect. arrondi en amont D.....	49
Figure I.05 : Schéma du modèle de PK-Weir type A1m.....	49
Figure I.06 : Schéma du modèle de PK-Weir type A2m.....	50
Figure I.07 : Schéma du modèle de PK-Weir type A.....	50
Figure I.08 : Schéma du modèle de déversoir en labyrinthe type D.....	50
Figure I.09 : Vue d'ensemble de la station d'expérimentation des modèles réduits.....	52
Figure I.10 : Schéma de station d'expérimentation. (Vue en plan).....	53
Figure I.11 : Schéma du dispositif expérimental (Vue de profil).....	53
Figure I.12 : Vue de l'aval de la station d'expérimentation.....	54
Figure I.13 : Tableaux manométriques de mesure des niveaux d'eau.....	54
Figure I.14 : Débitmètre à ultrason Flowmeter 93W2.....	55
Figure II.01 : Définition des paramètres du déversoir à écoulement libre et noyé.....	57
Figure II.02 : Modèle A1m sur socle.....	59
Figure II.03 : Modèle A1m sans socle.....	59
Figure II.04 : Coefficient de débit en fonction de la position du déversoir (PK-Weir A1m).....	60
Figure II.05 : PK-Weir sur socle arrondi en amont.....	60
Figure II.06 : PK-Weir placé sur le radier du canal.....	60
Figure II.09 : Emplacement sur radier du canal.....	61
Figure II.10 : Coefficients de débit du labyrinthe arrondi en amont en fonction de l'emplacement.....	62
Figure II.11 : a- Socle à parement arrondi. b- Socle à parement incliné. c- Socle à parement vertical.....	62
Figure II.12 : Coefficients de débit en fonction de la forme amont du Socle. (Modèle A1m).....	63
Figure II.13 : Avec hauteur de remplissage 3,5P/5.....	64
Figure II.14 : Avec une marche de hauteur 2P/5.....	64
Figure II.15 : Avec hauteur de remplissage 3P/5.....	64
Figure II.16 : Coefficients de débit du modèle A1m en fonction du nombre et de la hauteur des marches.....	65
Figure II.17 : Sans marche dans les alvéoles aval.....	65
Figure II.18 : Avec deux marche de hauteur 5 cm chacune.....	65
Figure II.19 : Performance du labyrinthe arrondi en amont en fonction de l'encombrement de l'alvéole aval.....	66

Figure II.20 : Socles arrondi en amont avec radier des alvéoles amont incline.....	66
Figure II.21 : Socles arrondi en amont avec des alvéoles amont horizontal.....	66
Figure II.22 : Courbes de debit du labyrinthe arrondi en fonction de la forme du radier des alvéoles amont.....	67
Figure II.23 : Coefficient de débit du labyrinthe arrondi en fonction de la forme du radier des alvéoles amont.....	68
Figure II.24 : Radier sur les 2/3de la hauteur de l'alvéole amont.....	68
Figure II.25 : Radier sur toute la hauteur de l'alvéole amont.....	68
Figure II.26 : Coefficient de débit du labyrinthe arrondi amont sur socle en fonction de l'inclinaison du radier des alvéoles amont.....	69
Figure II.27 : Différentes phases de l'écoulement sur le PK-Weir.....	70
Figure II.28 : Courbes de la charge relative amont en fonction de la charge relative aval.....	71
Figure II.29 : Courbes de la charge relative amont en fonction de la charge relative aval.....	72
Figure II.30 : Différents cas d'obstacle en aval du PK-Weir.....	73
Figure II.31 : Courbes de la charge relative amont en fonction de la charge relative aval.....	73
Figure II.32 : Courbes de la charge relative amont en fonction de la charge relative aval.....	74
Figure II.33 : Schémas du déversoir en PK-Weir avec et sans contraction latérale.....	75
Figure II.34 : Modèles de déversoir avec et sans contraction latérale.....	75
Figure II.35 : Courbes de la charge relative amont en fonction de la charge relative aval.....	76
Figure II.36 : Effet de la submersion sur le coefficient de debit.....	77
Figure II.37 : Variation de la profondeur d'eau amont en fonction de la surélévation du plan d'eau aval.....	78
Figure II.38 : Variation du coefficient de débit en fonction de la charge relative aval.....	79
Figure II.39 : Comparaison entre le PK-Weir et le déversoir en labyrinthe (selon les données de Tullis) fonctionnant dans des conditions noyées.....	80
Figure II.40 : Coefficient de noyade en fonction des termes adimensionnelle $((H_d-H_0)/H^*, H_0/P)$ du PK-Weir.....	81

Liste des tableaux

Tableau II-01 : Caractéristiques géométriques des modèles réduits.....	51
--	----

Introduction Générale

Introduction générale

L'évacuateur de crues constitue l'organe principal de sécurité des barrages, son rôle est d'assurer le passage des crues exceptionnelles dans des conditions favorables à la sécurité. Le bon fonctionnement de l'évacuateur de crues nécessite la construction d'un ouvrage de dimensions importantes ce qui influe sur le coût global du projet de construction du barrage. Il est possible de réduire les dimensions globales de l'évacuateur de crues et par conséquent réduire son coût tout en conservant son bon fonctionnement. Ceci est réalisable en adoptant une forme non rectiligne de la crête du déversoir. Cette forme de crête est la caractéristique principale des déversoirs appelés souvent déversoirs en labyrinthe.

Le déversoir en labyrinthe se caractérise par une longueur de crête discontinue largement plus longue que la largeur de l'emprise du déversoir, ceci permet d'évacuer un débit plus grand qu'un déversoir rectiligne de même largeur. En 2003, une nouvelle forme de déversoir baptisée PK-Weir quelque peu semblable au déversoir en labyrinthe a été développée par F. Lempérière et A. Ouamane. Cette nouvelle forme de déversoir, représente une alternative plus efficace que le déversoir en labyrinthe des points de vue économique et de performance hydraulique.

L'alternative du déversoir en touches de piano semble être une technique prometteuse par son faible coût, son rendement hydraulique et son impact limité sur les structures existantes. Le PK-Weir peut être réalisés à travers les cours d'eau artificiels ou naturels comme barrage déversoir et dans les retenues où la limitation d'un débit ou d'un niveau d'eau doit être assurée en fonctionnant dans des conditions dénoyés ou noyés.

Les différents travaux de recherche réalisés sur le PK-Weir, se sont intéressés à la recherche de la forme optimale du PK-Weir, aux différentes phases d'écoulement et à la performance hydraulique. Ces travaux ont été réalisés dans des conditions d'écoulement dénoyé.

L'étude de fonctionnement du PK-Weir dans des conditions d'écoulement noyé par l'aval n'a fait l'objet d'aucun travail de recherche jusqu'à ce jour. Cependant, le PK-Weir peut être une solution efficace comme barrage déversoir à travers les cours d'eau où l'écoulement peut être souvent noyé. Ainsi le présent travail se propose d'étudier l'effet de la variation du niveau aval sur l'écoulement en amont du PK-Weir et par conséquent son impact sur sa performance hydraulique. Ce travail est basé essentiellement sur l'expérimentation sur modèles réduits de PK-Weir avec différentes conditions d'écoulement en amont et en

aval. Une relation de prédiction du débit dans les conditions d'écoulement noyé est proposée suite à l'analyse des résultats obtenus expérimentalement.

Première Partie

Etude bibliographique

Chapitre I

Déversoir rectiligne

CHAPITRE I

Déversoir rectiligne

I.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 crée 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.

I.2 Définition du 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 déversant 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 ou 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.

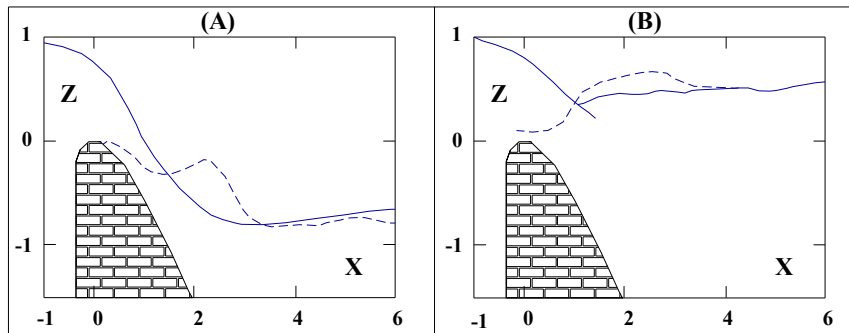


Figure I.01 : Déversoir dénoyé (A) et déversoir noyé (B) (Vazquez J, 2000)

I.3 Déversoirs rectiligne

Lorsque le seuil d'un déversoir est en alignement rectiligne, ce type de déversoir est appelé déversoir rectiligne. Le débit qui transite sur un déversoir rectiligne est étroitement lié à la largeur W et la charge sur le seuil H . Selon la géométrie de la crête ce type de déversoir peut être en mince paroi, seuil épais ou standard.

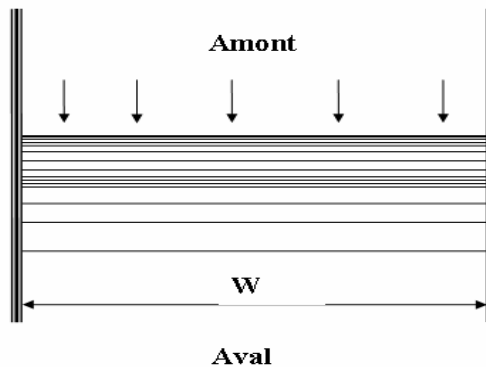


Figure I.02 : Schéma d'un déversoir rectiligne

I.3.1 Déversoir en mince paroi

Le déversoir en mince paroi de largeur b permet de déterminer le débit Q en connaissant uniquement la hauteur d'eau à l'amont de l'ouvrage \bar{h}_0 . Ce type de déversoir constitue donc une structure qui permet la mesure de 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 \bar{W} du fond du canal jusqu'à la crête, sa largeur b et sa hauteur d'eau amont \bar{h}_0 (Carlier, 1980).

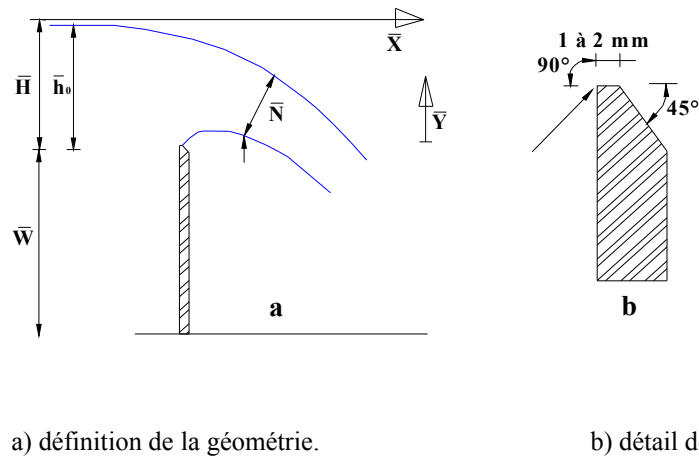


Figure I.03 : Déversoir en mince paroi standard (Vazquez J, 2000)

La charge totale amont sur le déversoir peut être exprimée par la relation de Bernoulli :

$$\bar{H} = \bar{h}_0 + \frac{Q^2}{2gb^2(\bar{h}_0 + \bar{w})^2} \quad (I.01)$$

- \bar{H} : Charge amont sur le déversoir (m) ;
- \bar{h}_0 : Hauteur d'eau amont (m) ;
- \bar{w} : Hauteur de déversoir du fond du canal jusqu' à la crête (m) ;
- Q : Débit qui transite sur le déversoir (m³/s) ;
- b : Largeur de la crête (m) ;
- g : Accélération de la pesanteur (m/s²).

Ce type de déversoir fut étudié avec grand intérêt, notamment par Poleni (1683-1761). En se basant sur diverses simplifications, le débit Q est corrélé avec la hauteur d'eau amont \bar{h}_0 par :

$$Q = C_d \sqrt{2g} \cdot \bar{h}_0^{3/2} \quad (I.02)$$

Cette équation indique que le débit croît linéairement avec la largeur b du déversoir, mais dépend plus fortement de la hauteur \bar{h}_0 sur le déversoir.

\overline{C}_d : désigne le coefficient de débit, qui peut être déterminé de la relation Rehbock qui est universellement acceptée.

$$\overline{C}_d = 0,4023 \left[1 + \frac{0,135 \overline{h}_0}{\overline{w}} \right] \left[1 + \frac{0,0011}{\overline{h}_0} \right]^{3/2} \quad (I.03)$$

I.3.1.1 Déversoir à crête mince en écoulement dénoyé

Un écoulement est dit dénoyé quand la hauteur d'eau à l'aval est inférieure à la hauteur du déversoir et le niveau aval n'influence pas l'écoulement à l'amont, ainsi la nappe est supposée libre.

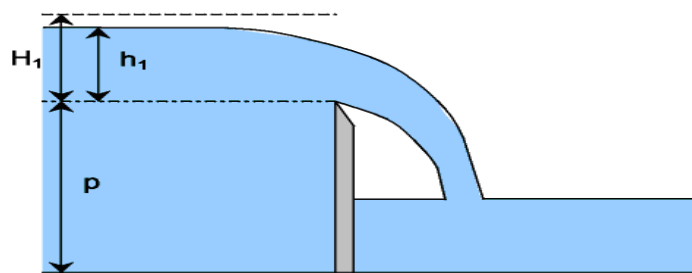


Figure I.04 : Schéma de l'écoulement sur un déversoir à crête mince dans la condition dénoyée

I.3.1.2 Déversoir à crête mince en écoulement noyé

S'il y a une influence du niveau d'eau aval sur le niveau d'eau amont, le déversoir est dit noyé. La ligne d'eau ne passe plus par une hauteur critique (section de contrôle). Il y a accélération des vitesses juste à l'aval du déversoir puis l'écoulement retrouve son état fluvial. Cette influence provoque une diminution du débit transitant par l'ouvrage, du fait du ralentissement provoqué par la masse d'eau aval qui devient plus importante.

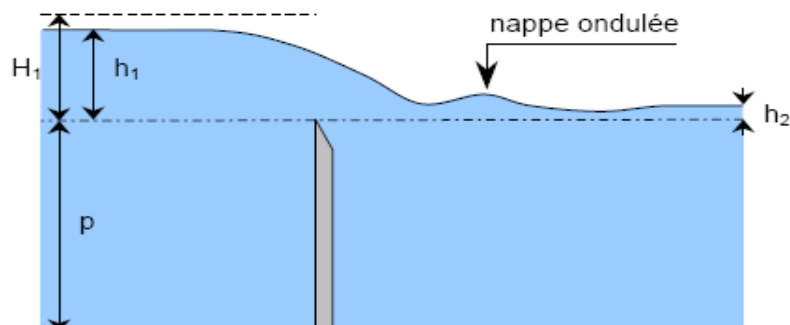


Figure I.05 : Coupe longitudinale d'un déversoir à crête mince en écoulement noyé

En 1947, Villemonte a présenté les résultats de différents essais sur des déversoirs de diverses formes de crêtes en écoulement noyé. Ces tests ont conduit à donner une relation générale qui exprime la noyade pour les déversoirs à crête mince :

$$K = \frac{Q_{Noye}}{Q_{Dénoy}} = \left[1 - \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^n \right]^{0.385} \quad (I.04)$$

Où n est l'exposant dans les relations d'écoulement dénoyé :

- déversoir proportionnel : n=1
- déversoir rectangulaire : n=1,5
- déversoir parabolique : n=2
- déversoir triangulaire : n=2,5

Dans ces conditions, un coefficient de réduction K doit être appliqué au débit obtenu par la formule en écoulement dénoyé, suivant le type de déversoir. Ce coefficient dépend du type de déversoir et ne peut être généralisé comme dans le cas d'un déversoir à crête mince.

La formulation en écoulement noyé se traduit donc par $Q_{noyé} = K.Q_{dénoyé}$ où K est le coefficient de noyade du déversoir.

King (1954) a développé un abaque qui rassemble les résultats de Villemonte et Mavis, cet abaque peut être utilisé de deux manières :

- a- En utilisant le rapport h_2/h_1 en échelle des abscisses : il faut alors utiliser la courbe (1) ou la courbe (2) selon la forme du déversoir (rectangulaire ou triangulaire).
- b- En utilisant le rapport $(h_2/h_1)^n$: il faut alors utiliser la courbe (3) quelle que soit la forme du déversoir (rectangulaire, triangulaire, proportionnel, parabolique) sachant que l'exposant n correspond à l'exposant de la formule de débit pour un écoulement dénoyé.

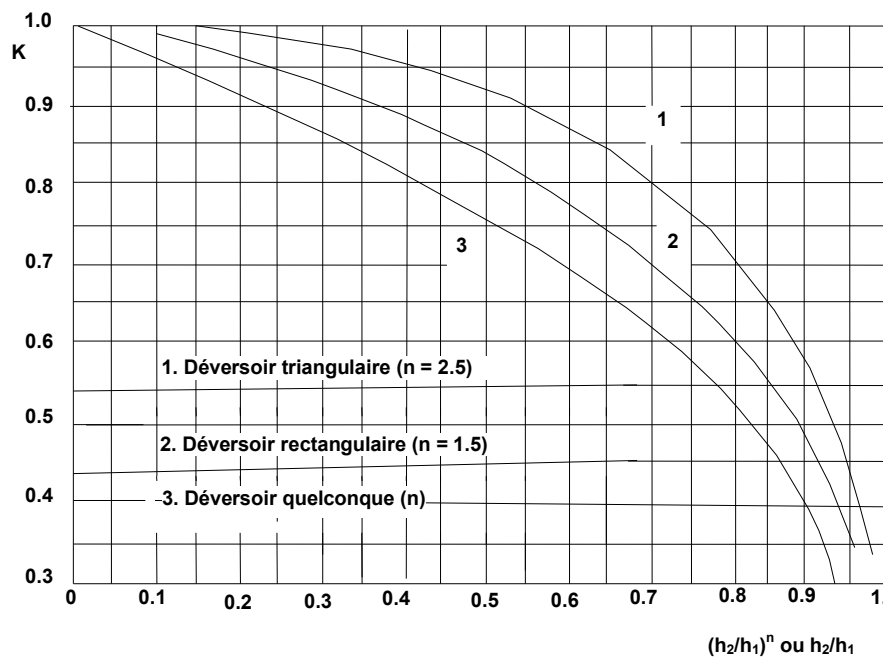


Figure I.06 : Abaque donnant la valeur du coefficient de noyade K en fonction de h_1/h_2 pour un déversoir à crête mince en écoulement noyé. (d'après King).

I.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, les filets liquides sont parallèles et horizontaux. Ce type de déversoir à angles vifs, représentés dans la figure (I.07), peut s'imposer notamment pour des phases de construction des barrages en béton. Comparés au déversoir en mince paroi, deux paramètres supplémentaires relatifs à la pente amont θ et la longueur de la crête L_e du déversoir doivent être considérés. Le calcul simplifié introduit un coefficient de correction C_e dans la formule générale du déversoir en mince paroi.

$$Q = C_d C_e \sqrt{2g} \bar{H}^{3/2} \quad (I-05)$$

- \bar{H} : Charge totale sur le déversoir (m) ;
- Q : Débit évacué (m^3/s) ;
- C_d : Coefficient de débit ;
- C_e : Coefficient de correction ;
- b : Largeur du déversoir (m) ;
- g : Accélération de la pesanteur (m/s^2).

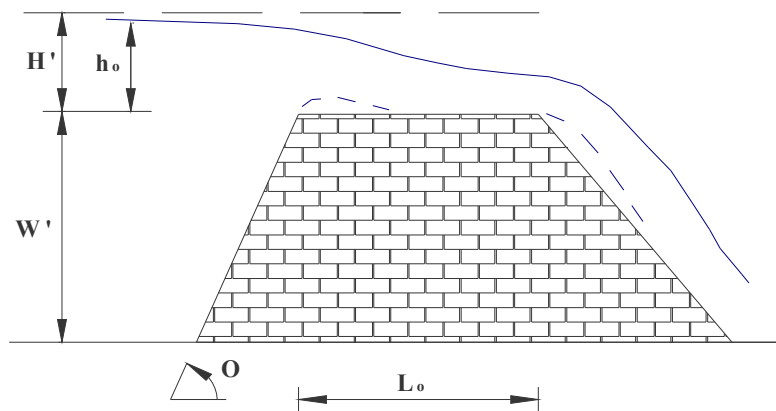


Figure. I.07 : Déversoirs à seuil épais, géométrie polygonale

I.3.2.1 Déversoir à crête épaisse en écoulement dénoyé

Dans les conditions optimales d'utilisation du déversoir en écoulement dénoyé, la ligne d'eau atteint sur une courte distance au moins, un parallélisme avec la crête du déversoir.

L'écoulement passe alors par une section de contrôle où la hauteur d'eau au-dessus du seuil est égale à la hauteur critique h_c . Sur une portion de la crête du seuil, les filets liquides sont parallèles et horizontaux, le champ de vitesses est uniforme. On admet qu'il existe une distribution hydrostatique des pressions.

Pour un seuil épais, l'écoulement est « dénoyé » tant que le niveau aval n'influe pas sur le niveau amont : $Z_2 < Z_{\text{seuil}}$

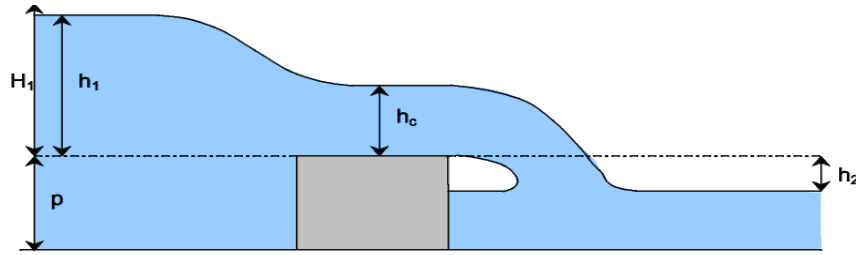


Figure I.08 : Coupe longitudinale d'un déversoir à crête épaisse en écoulement dénoyé ($Z_2 < Z_{\text{seuil}}$)

I.3.2.2 Déversoir à crête épaisse en écoulement noyé

Le déversoir à crête épaisse est dit « en écoulement noyé », lorsque $Z_2 > Z_{\text{seuil}}$. La ligne d'eau ne passe plus par une hauteur d'eau critique h_c au-dessus du seuil.

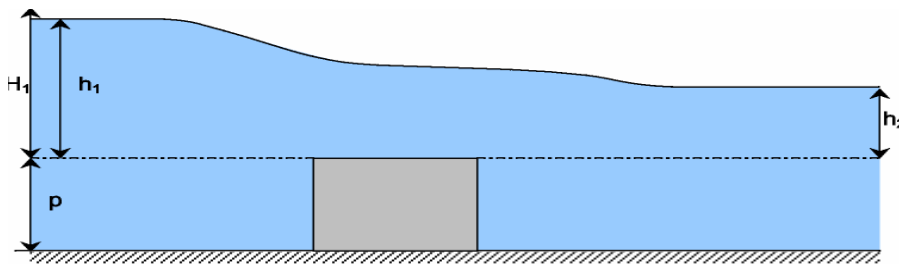


Figure I.09 : Coupe longitudinale d'un déversoir à crête épaisse en écoulement noyé avec $Z_2 > Z_{\text{seuil}}$

L'abaque ci-dessous permet de déterminer si l'écoulement est noyé ou dénoyé. En effet, pour garantir un écoulement dénoyé, la nappe doit passer par une hauteur critique, découplant l'interaction de l'aval sur l'amont. Pour les valeurs de h_2/h_1 plus faibles que la courbe donnée, l'écoulement est dénoyé.

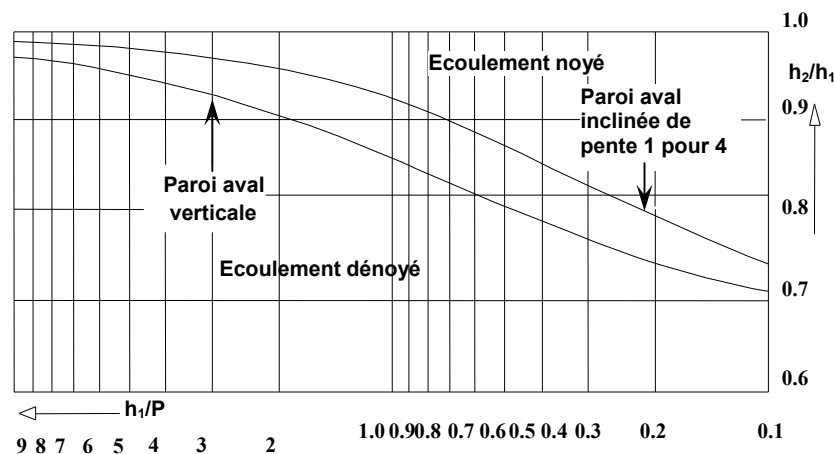


Figure I.10 : Transition entre l'écoulement noyé et celui dénoyé pour un déversoir rectangulaire à crête épaisse et arête amont arrondie, à paroi aval verticale ou inclinée de pente 1/4

Chapitre II

Déversoir non rectiligne

CHAPITRE II

Déversoir non rectiligne

II.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.

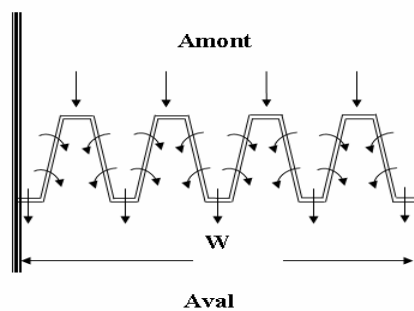


Figure II.01 : Déversoirs non rectiligne

II.2 Différentes formes des déversoirs non rectilignes

II.2.1 Déversoir en Labyrinthe

II.2.1.1 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.

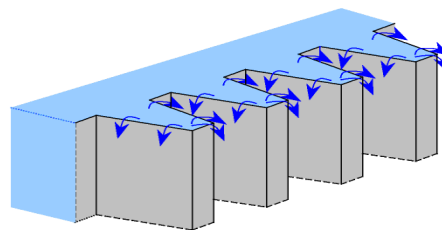


Figure II.02 : Vue en perspective d'un déversoir labyrinthe.

II.2.1.2 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.

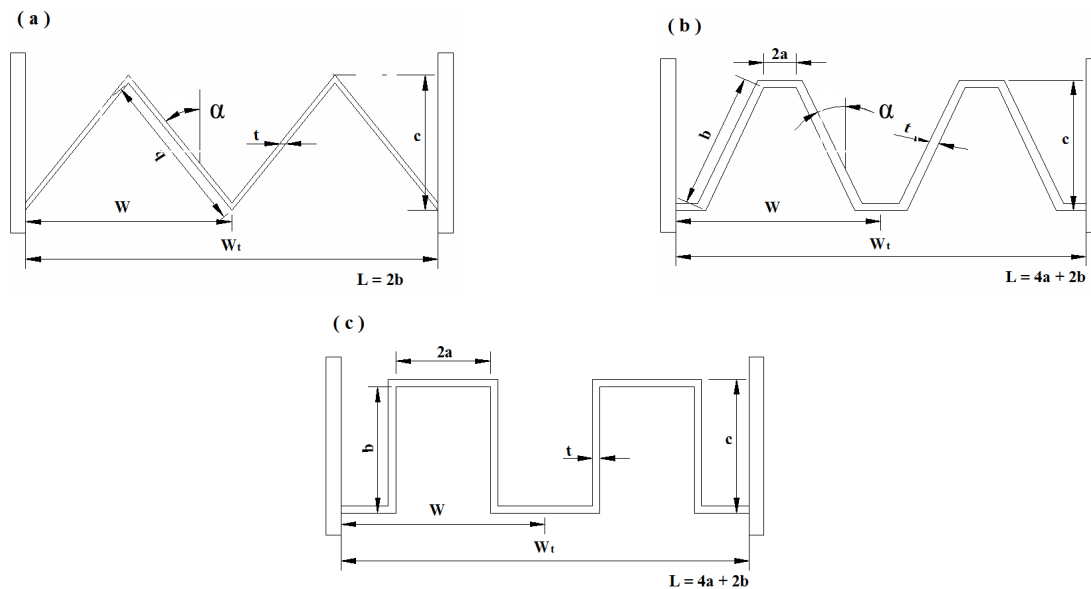


Figure II.03 : Forme en plan du déversoir en labyrinthe (a) - triangulaire, (b) - trapézoïdale (c) - rectangulaire.

La géométrie en plan du déversoir en labyrinthe est définie par la longueur de crête d'un cycle L , la largeur d'un cycle W , la hauteur amont des parois P , la hauteur aval des parois D , le nombre de cycles n et l'angle α formé par la paroi latérale et la direction de l'écoulement.

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.

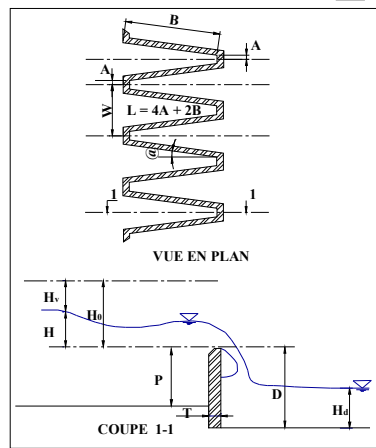


Figure II. 04 : Définition des paramètres du déversoir en labyrinthe (Lux et al. 1984).

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

II.2.1.3 Description de l'écoulement sur un 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.

a- 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.

b- 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.

c- 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.

d- 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.

II.2.1.4 Effet des paramètres géométriques sur la performance

La performance exprime le rendement du déversoir en labyrinthe par rapport au déversoir rectiligne. Elle peut être mieux présentée en termes du déversoir rectiligne défini comme le déversoir de référence occupant la même largeur du canal que le déversoir en labyrinthe.

La première analyse de la performance hydraulique d'un déversoir en labyrinthe est attribuée à Hay et Taylor (1970). Elle est considérée comme une base de conception des déversoirs en labyrinthe. La performance ou le rendement d'un déversoir en labyrinthe pour une géométrie donnée en plan peut être exprimé par :

$$q = Q_L/Q_N \quad (\text{II-01})$$

ou : Q_L , le débit qui transite sur un déversoir en labyrinthe de longueur de crête L , sous une charge H et Q_N , le débit qui passe sur un déversoir rectiligne de même largeur W que le déversoir en labyrinthe et sous la même charge H .

Le rendement Q_L/Q_N approche la grandeur de l'accroissement de la longueur L/W lorsque la charge H s'approche de zéro, pour des déversoirs en labyrinthe avec une largeur de cycle supérieure à $2,5P$. Réciproquement, la performance diminue quand la charge sur le déversoir augmente. Ceci montre que ce type de déversoir fonctionne efficacement à des faibles charges.

$$q = Q_L/Q_N \approx L/W \text{ quand } H \rightarrow 0$$

Etant donné que l'objectif du déversoir en labyrinthe est l'accroissement du débit au delà de celui du déversoir rectiligne, Ainsi, la performance correspond au rapport Q_L/Q_N .

La performance du déversoir en labyrinthe Q_L/Q_N est dépendante des paramètres sans dimensions suivants : W/P , L/W , H/P , α et n . Ces paramètres dérivent directement de la

géométrie du déversoir et de la charge d'exploitation, ils sont donc d'importance principale (Hay et al. 1970). La performance peut être aussi affectée par les paramètres d'importance secondaire résultant des détails de construction, comme la forme de la crête et la présence de tapis de réception, ou des conditions de fonctionnement qui peuvent s'étendre de l'écoulement libre aéré aux degrés divers d'interférence aval au fonctionnement complètement noyée (Hay et al. 1970).

II.2.1.4.1 Charge relative, h/P

Généralement la performance de déversoir en labyrinthe est exprimée en fonction du rapport adimensionnel h/P , les résultats d'essai expérimentaux effectués par Hay et Taylor ont montrés que pour les petites valeurs de h/P , le débit est faible et la vitesse de l'écoulement est négligeable. La charge est la même en chaque point le long de la crête, et elle est sensiblement égale à la charge dans le canal d'approche. Dans telles conditions, le débit par unité de longueur de la crête est le même le long du seuil de déversoir et peut être calculé par la formule de déversoir standard en employant la charge dans le canal d'approche. Ainsi, pour les petites valeurs de h/P la performance du déversoir en labyrinthe tend vers l'idéal

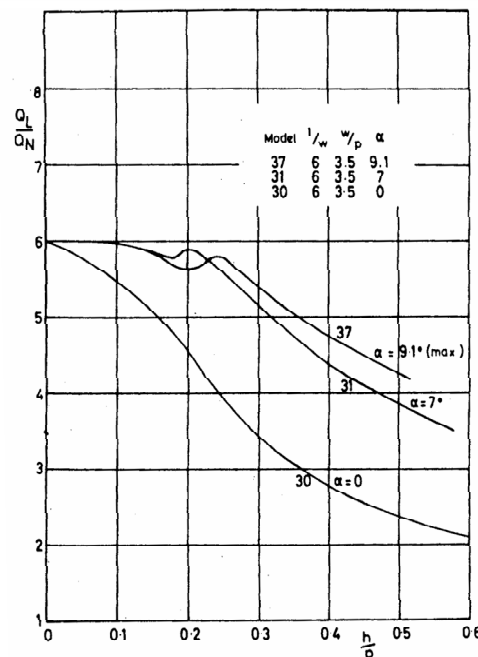


Figure II.05 : Courbes de performance, en fonction de la charge relative (Hay et Taylor, 1970)

II.2.1.4.2 Accroissement de la longueur, L/W

L'accroissement de la longueur d'un déversoir en labyrinthe augmente remarquablement le débit évacué, ceci n'est pas toujours vrai, pour les grande valeurs, il aboutit à une performance inférieure, en outre, le petit gain dans la performance obtenue quand $L/W > 8$

est peu probable qu'il justifie en pratique les dépenses structurelles supplémentaires impliquées.

Cependant, l'étude des déversoirs dont d'accroissement de la longueur $L/W=2$ a montrée que ces derniers se sont comportés presque idéalement pour toute la gamme des valeurs de h/P

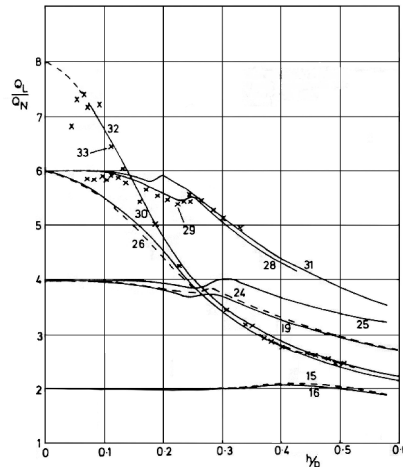


Figure II. 06 : Courbes de performance en fonction des paramètres géométriques adimensionnels

II.2.1.4.3 Rapport d'aspect vertical, W/P

La performance hydraulique du labyrinthe a été considéré par Hay et Taylor comme indépendante du rapport de l'aspect vertical W/P . Cependant, selon la littérature, ce paramètre est fortement significatif quand il est de faibles valeurs.

La variation de W/P varie réellement la taille des cycles de déversoir par rapport à la charge, ainsi, lorsque W/P diminue, la taille de cycle devient petite par rapport à la charge. Dans la limite lorsque W/P tend vers zéro, la forme en plan devient une ondulation infime en comparaison avec la charge, Ainsi, la performance approche celle d'un déversoir rectiligne.

II.2.1.4.4 Forme de la crête

Le passage de l'eau sur le seuil d'un déversoir est affecté par la forme de la crête. Cette section constitue la transition de l'écoulement fluvial en amont à l'écoulement torrentiel en aval. Les études effectuées par Hay et Taylor (1970), sur des déversoirs avec des formes de crête plate, en quart de cercle et en demi-cercle, ont montré que les déversoirs à crête mince et à crête plate se caractérisent par des coefficients de débit inférieurs à ceux des déversoirs à crête arrondie. La forme la plus efficace et pratique paraît être le quart de cercle (Tullis, 1995).

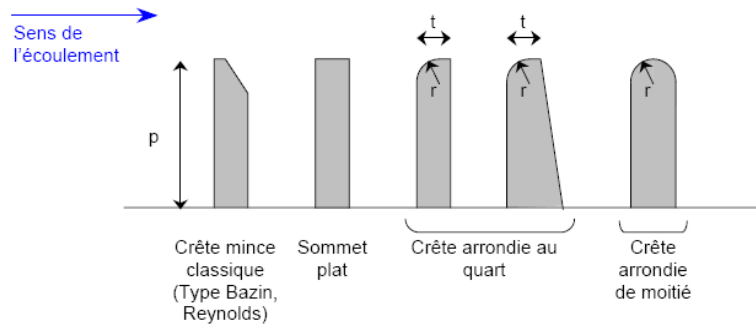


Figure II.07 : Différentes forme de crêtes

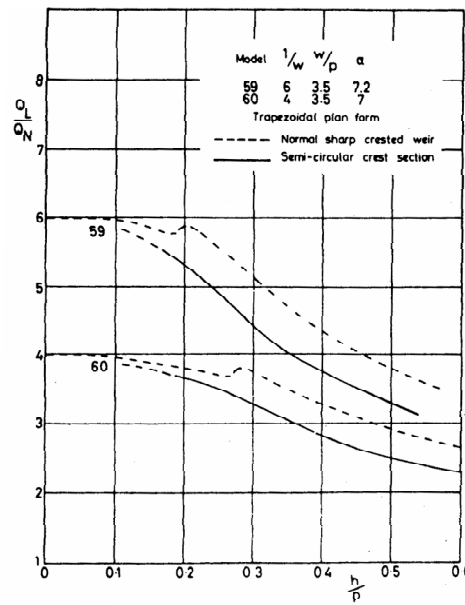


Figure II.08 : Effet de la section de la crête sur la performance (Hay et Taylor, 1970)

II.2.1.4.5 Impact du nombre de cycles, n

Souvent le déversoir en labyrinthe est composé de plusieurs cycles de même configuration géométrique, ainsi il était important de vérifier l'effet du nombre de cycles sur la performance hydraulique de ce type de déversoir. A cet effet, des modèles de déversoirs en labyrinthe identiques qui ne diffèrent que par le nombre de cycles ont été évalués par Hay et Taylor, les résultats obtenus ont montré qu'aucun changement significatif de la performance n'a été détecté. Ceci montre que la performance de déversoir en labyrinthe est indépendante du nombre de cycles n

II.2.1.4.6 Impact de la profondeur d'eau en aval h_d/P

Le déversoir en labyrinthe est considéré comme noyé quand la profondeur d'écoulement en aval du déversoir dépasse la hauteur de la crête, le degré de noyade est déterminé par le paramètre h_d/P , dans lequel h_d est la profondeur d'eau aval.

Selon l'étude effectuée par Hay et Taylor (1970), la performance du déversoir en labyrinthe n'est pas affectée par le niveau d'eau aval tant que ce dernier n'excède pas le niveau de la crête du déversoir.

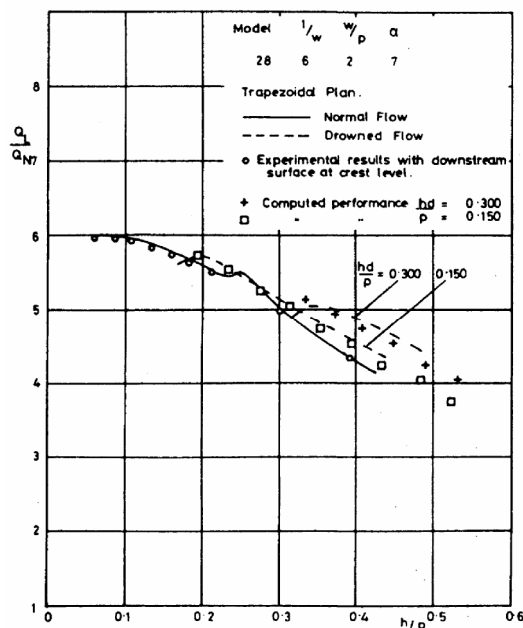


Figure II.09 : Effet de la noyade sur la performance

II.2.1.5 Analyse numérique du débit du déversoir en labyrinthe

La représentation numérique du débit qui transite par un déversoir en labyrinthe a été considérée comme un inconvénient pour la résolution d'un tel problème à cause de la complexité de l'écoulement sur ce type de déversoir. La première analyse numérique de débit du déversoir en labyrinthe est attribuée à Lux et Hinchliff (1984), qui considèrent que l'écoulement sur le déversoir en labyrinthe est tridimensionnel et ne se prête pas aisément à une description mathématique, la solution la plus directe pour l'expression de la fonction du débit correspond à la combinaison d'analyse dimensionnelle et expérimentale.

La combinaison d'analyse dimensionnelle et expérimentale a permis de représenter le débit en fonction des différents paramètres géométriques et d'écoulement sous la forme suivante :

$$Q = f(L, A, W, P, D, T, R, H_o, H_b, g) \quad (\text{II.02})$$

Les formes en plan du labyrinthe peuvent être définies en utilisant seulement la longueur de la crête L , la largeur du cycle W , et la demi-longueur de la paroi frontale A .

Pour former les rapports adimensionnels, il y a deux variables indépendantes ; les deux contiennent les dimensions de longueur et/ou de temps, et les paramètres utilisés sont l'accélération de la pesanteur, g , et la charge totale, H_0 .

En utilisant des techniques d'analyse dimensionnelle, l'équation (II.02), peut être exprimée par des paramètres adimensionnels :

$$\frac{Q}{WH_0\sqrt{gH_0}} = f\left[\frac{L}{W}, \frac{A}{W}, \frac{W}{P}, \frac{D}{P}, \frac{T}{P}, \frac{R}{P}, \frac{H_0}{P}, \frac{H_d}{P}\right] \quad (\text{II.03})$$

Le rapport dépendant dans l'équation (II.03) peut être reconnu comme une forme du coefficient du débit. Donc, l'équation (II.02) peut être réécrite comme suit :

$$Q = CWH_0\sqrt{gH_0} \quad (\text{II.04})$$

Ou :

$$C = f\left[\frac{L}{W}, \frac{A}{W}, \frac{W}{P}, \frac{D}{P}, \frac{T}{P}, \frac{R}{P}, \frac{H_0}{P}, \frac{H_d}{P}\right] \quad (\text{II.05})$$

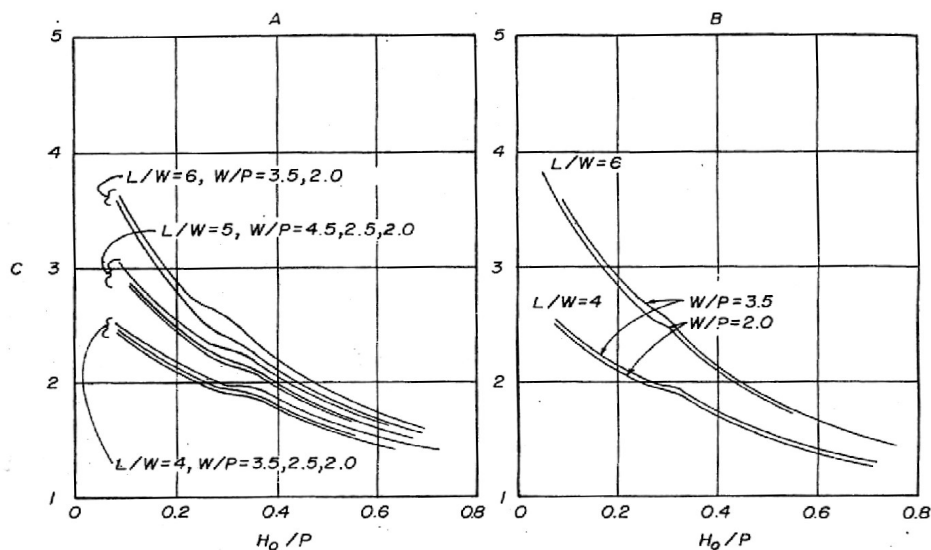


Figure II.10 : Coefficients de débit en fonction de L/W et W/P (Hinchliff, 1984)

A- Triangulaire, B- Trapézoïdale

La méthode proposée par Tullis pour la conception du déversoir en labyrinthe utilise l'équation de base développée pour les déversoirs rectilignes.

$$Q = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2gH_t}^{3/2} \quad (\text{II.06})$$

Ou C_d = coefficient de débit; g = accélération de pesanteur; L = longueur efficace du

déversoir; et H_t = la charge totale sur la crête. La charge totale considérée est égale à la profondeur d'eau mesurée au-dessus de la crête ajoutée à la charge cinétique de la vitesse d'approche de l'écoulement au point de mesure.

Le coefficient de débit est dépendant de la hauteur du déversoir P , de l'épaisseur de la paroi t , de la configuration de la crête, et de l'aération de la nappe. Pour un déversoir en labyrinthe, la longueur efficace utilisée dans l'équation (II.06) est définie dans la (Figure I.11).

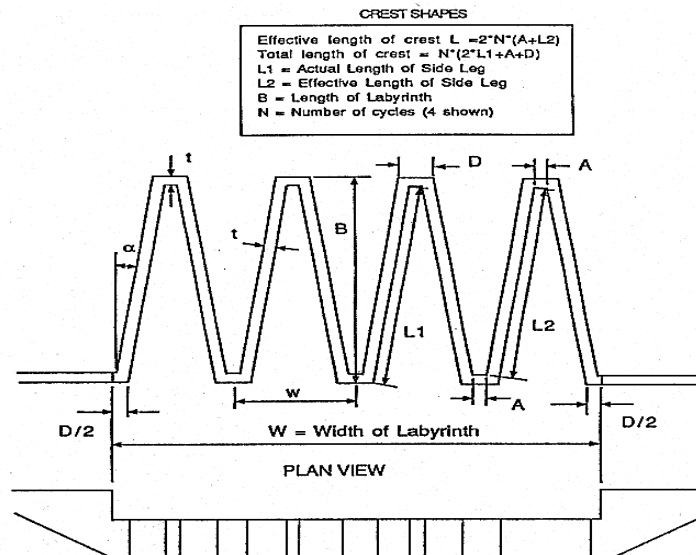


Figure II.11 : Disposition et détails du déversoir en labyrinthe (Tullis, 1995)

$$L = n(2L_1 + A + D) \quad (\text{II.07})$$

n : Nombre de cycle ; L_1 : Longueur d'une paroi latérale ;
 A : Largeur de la paroi frontale aval ; D : Largeur de la paroi frontale amont.

Pour déterminer la variation du coefficient de débit des déversoirs en labyrinthe, plusieurs modèles de déversoirs ont été testés pour des angles qui varient de 6° à 90° . La plupart des déversoirs avaient une hauteur de 152 mm et d'épaisseur 25.4 mm avec des formes de crête arrondies en quart de cercle et en demi-cercle.

Les différents résultats des travaux de recherche effectués dans le domaine des déversoirs en labyrinthe montrent que l'accroissement de coefficient de débit est plus intéressant lorsque la charge relative H/P est inférieure à 0,9. Par ce que quand la charge de fonctionnement augmente le coefficient de débit diminue et le déversoir en labyrinthe approche d'un déversoir rectiligne et le déversoir en labyrinthe peut encore fonctionner à des

grandes charges mais l'avantage de la conception du labyrinthe continue à diminuer lorsque la charge continue à augmenter. La dernière décision sera basée sur le critère économique.

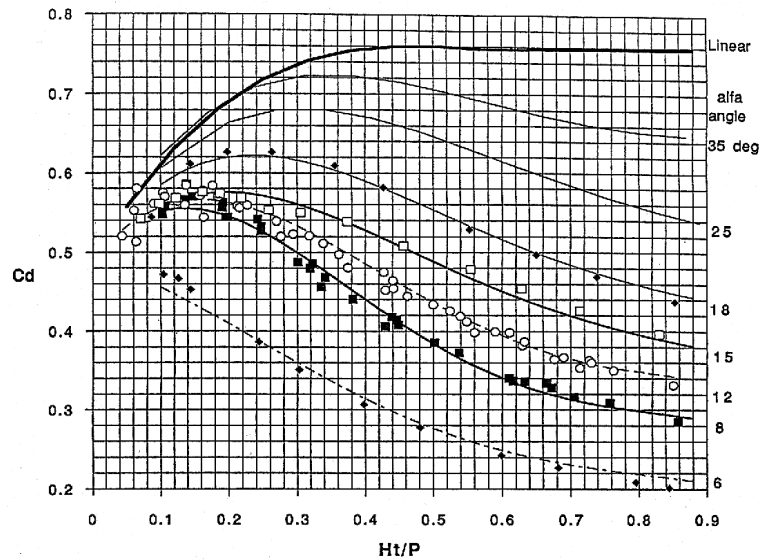


Figure II.12 : Coefficient de la crête pour le déversoir rectiligne

Pour déterminer le débit qui transite par un déversoir en labyrinthe, Tullis propose les équations (II.08) à (II.15) qui sont dépendante seulement du paramètre H_t/P .

Ces équations sont valables pour une largeur de la paroi frontale comprise entre $t < A < 2t$; pour $H/P < 0.9$ et $t = P/6$; la forme de la crête est en quart de cercle sur la face amont; et le rayon de courbure de la crête $R = P/12$.

$$C_d = 0.49 - 0.24 (H_t/P) - 1.20(H_t/P)^2 + 2.17 (H_t/P)^3 - 1.03 (H_t/P)^4; \quad \text{pour } \alpha = 6^\circ \quad (\text{II.08})$$

$$C_d = 0.49 + 1.08 (H_t/P) - 5.27 (H_t/P)^2 + 6.79 (H_t/P)^3 - 2.83 (H_t/P)^4; \quad \text{pour } \alpha = 8^\circ \quad (\text{II.09})$$

$$C_d = 0.49 + 1.06 (H_t/P) - 4.43 (H_t/P)^2 + 5.18 (H_t/P)^3 - 1.97 (H_t/P)^4; \quad \text{pour } \alpha = 12^\circ \quad (\text{II.10})$$

$$C_d = 0.49 + 1.00 (H_t/P) - 3.57 (H_t/P)^2 + 3.82 (H_t/P)^3 - 1.38 (H_t/P)^4; \quad \text{pour } \alpha = 15^\circ \quad (\text{II.11})$$

$$C_d = 0.49 + 1.32 (H_t/P) - 4.13 (H_t/P)^2 + 4.24 (H_t/P)^3 - 1.50 (H_t/P)^4; \quad \text{pour } \alpha = 18^\circ \quad (\text{II.12})$$

$$C_d = 0.49 + 1.51 (H_t/P) - 3.83 (H_t/P)^2 + 3.40 (H_t/P)^3 - 1.05 (H_t/P)^4; \quad \text{pour } \alpha = 25^\circ \quad (\text{II.13})$$

$$C_d = 0.49 + 1.69 (H_t/P) - 4.05 (H_t/P)^2 + 3.62 (H_t/P)^3 - 1.10 (H_t/P)^4; \quad \text{pour } \alpha = 35^\circ \quad (\text{II.14})$$

$$C_d = 0.49 + 1.46 (H_t/P) - 2.56 (H_t/P)^2 + 1.44 (H_t/P)^3; \quad \text{pour } H_t/P < 0.7 \text{ et } \alpha = 90^\circ \quad (\text{II.15})$$

Le travail de Magister réalisé par Ben Said en 2007 à l'université de Biskra a permis de déterminer par voie expérimentale l'impact des différents paramètres géométriques sur le rendement du déversoir en labyrinthe arrondi en amont.

Pour vérifier l'impact de la variation de la largeur des alvéoles entre l'amont et l'aval, un paramètre adimensionnel a été introduit. Ce paramètre correspond au rapport entre les deux largeurs des alvéoles amont et aval qui est exprimé par le ratio a/b .

Les résultats obtenus ont montré que l'augmentation de la largeur de l'alvéole amont et la réduction de la largeur de l'alvéole aval pour un rapport $a/b=1.5$, fait croître le débit d'environ 10% pour les faibles et moyennes charges, par contre la variation est presque négligeable (2%) pour les grandes charges. Ceci peut être intéressant de point de vue pratique et économique puisque le volume de béton reste le même et la modification ne demande que le déplacement des murs latéraux pendant la phase de conception.

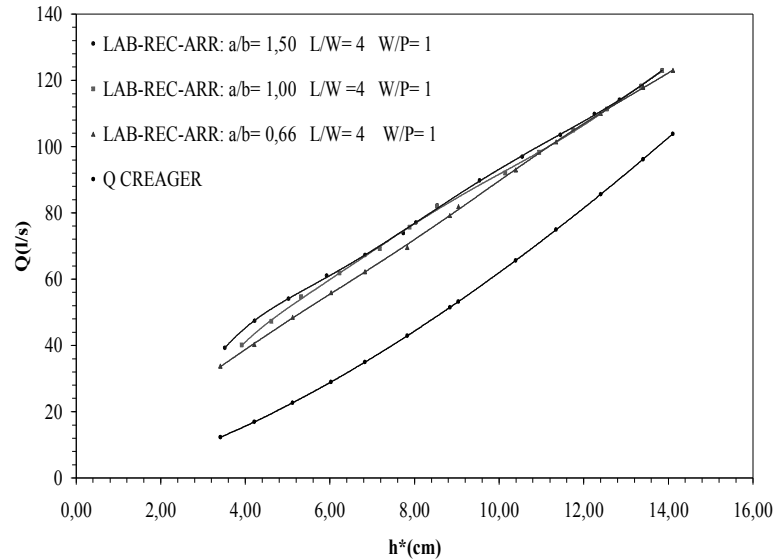


Figure II.13: Débit en fonction de largeur des alvéoles pour $L/W=4$ (Ben said .M ,2007)

L'étude de l'effet de la contraction latérale Wc/W sur le rendement hydraulique du déversoir en labyrinthe arrondi en amont a fait remarquer que la contraction latérale conduit à une réduction du rendement est plus élevé d'environ de 10% par rapport au déversoir sans contraction latérale.

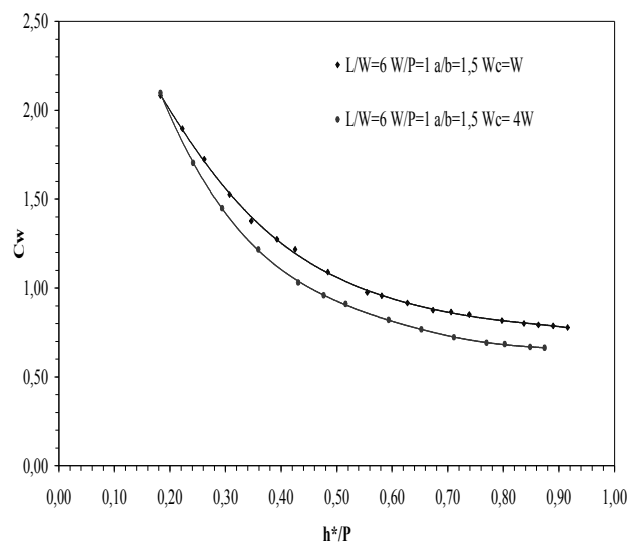


Figure.II.14: Coefficient de débit en fonction de l'emplacement de modèle (Ben said .M ,2007)

II.2.1.6 Effet de la noyade sur l'écoulement des déversoirs en Labyrinthe

Les premiers investigateurs dans le domaine des déversoirs en labyrinthe ont négligé l'étude détaillée des effets de la noyade en considérant que de telles structures ne doivent pas être conçues pour fonctionner dans de telles conditions (Taylor, 1968).

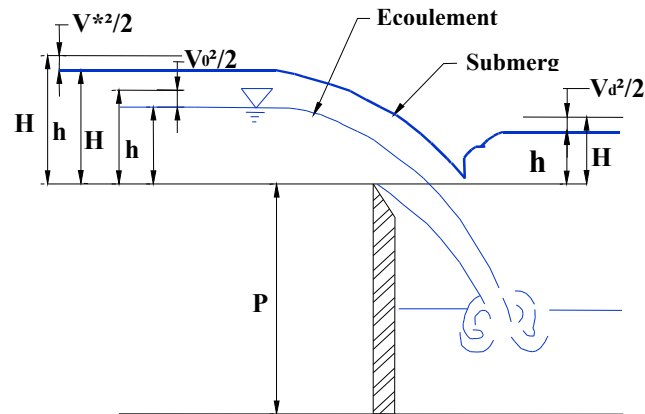


Figure II.15 : Paramètres et nomenclature du déversoir à écoulement libre et noyé (Tullis, 2006)

La relation entre le débit d'un déversoir et la charge amont est exprimée par la relation débit-charge. Pour les conditions d'écoulement libre, cette relation est influencée principalement par la forme de la crête, la charge d'eau amont, la hauteur et la longueur de déversoir (Falvey, 2003).

$$Q = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2g} H_0^{3/2} \quad (\text{II-16})$$

g : Accélération de la pesanteur;

L : Longueur de crête du déversoir;

H_0 : Charge amont totale, par rapport au niveau de la crête de déversoir;

C_d : Coefficient de débit.

La Figure II.15 illustre à la fois l'écoulement libre et les paramètres de déversoir noyé. Tous les paramètres sont définis par rapport au niveau de la crête. Pour les conditions d'écoulement noyé, H^* est la charge totale amont, h^* est la charge piézométrique amont, H_d et h_d sont respectivement la charge totale et la charge piézométrique aval à partir de niveau du seuil. H_0 et h_0 sont respectivement la charge totale et la charge piézométrique amont dans les conditions d'écoulement libre.

Les travaux de recherche effectués par Fteley et Stems (1883), Francis (1884), Bazin (1894), Cox (1928) et Villemonte (1947), ont abouti au développement des relations décrivant les effets de la noyade sur la performance hydraulique des déversoirs rectilignes.

Villemonte a développé une relation largement acceptée et généralement employée pour les déversoirs rectilignes à crête mince fonctionnant dans les conditions noyées. La relation de Villemonte détermine un facteur de réduction de l'écoulement, Q_s/Q_l , pour des déversoirs rectilignes à crête mince noyés comme une fonction du rapport de submersion, h_d/h^* . Q_s et Q_l sont respectivement le débit noyé et le débit à écoulement libre, associés à la charge h^* .

$$\frac{Q_s}{Q_l} = \left[1 - \frac{h_d^{3/2}}{h^{*3/2}} \right]^{0.385} \quad (\text{II-17})$$

L'exposant dans l'équation (II.17) a été déterminé sur la base des résultats expérimentaux.

Villemonte a annoncé que, par rapport aux données expérimentales obtenues sur des déversoirs rectilignes à crête mince fonctionnant dans les conditions noyées, l'écart des valeurs obtenues par l'équation (II.17) est de 3% pour la prévision du facteur de réduction d'écoulement Q_s/Q_l .

A travers l'expérimentation, Taylor (1968) a constaté que l'effet de submersion sur le débit de déversoir en labyrinthe était plus faible que celui constaté pour les déversoirs rectilignes et que le niveau d'eau aval n'affecte pas la performance de déversoir en labyrinthe tant qu'il n'atteint pas le niveau de la crête.

Pour évaluer l'applicabilité de l'équation (II-16) pour l'écoulement noyé du déversoir en labyrinthe, Falvey (2003) a procédé à une analyse des résultats expérimentaux de Taylor (1968). Cette analyse a confirmé qu'en termes de charge exigée pour passer un débit donné, l'utilisation de l'équation (II.17) fournit en effet des prédictions conservatrices; cependant, pour les petites valeurs de h/P qui correspondent aux charges relatives de conception des déversoirs en labyrinthe, un écart significatif des données est constaté.

L'opportunité d'appliquer un facteur de réduction, tel que l'équation (II.17), à un cas de déversoir noyé est dépendante du volume de stockage amont, par rapport au changement du volume associé à l'hydrographe d'écoulement d'entrée et de sortie.

Par exemple, le volume de stockage d'eau dans un canal d'irrigation en amont d'un déversoir est typiquement minimal. Si le déversoir devient noyé, au lieu de la réduction du débit sur le déversoir, la charge amont augmente à un niveau donné pour faire passer le débit exigé sans réduction. Si la capacité de stockage amont tend vers l'infini, le facteur de réduction d'écoulement devient plus approprié.

Pour déterminer l'effet de la noyade sur la performance d'un déversoir en labyrinthe, Tullis (2006) a expérimenté trois déversoirs en labyrinthe de géométrie différente et un déversoir rectiligne à crête mince, dans le but de procéder à une comparaison avec les travaux antérieurs.

La géométrie du labyrinthe a été déterminée en variant l'angle (α) compris entre chaque mur latéral et la direction de l'écoulement, tout en gardant une largeur de cycle constante. Les déversoirs en labyrinthe testés avaient des angles de mur latéral de 7° , 8° et 20° , avec des longueurs de crête (L) respectivement, de 7.97 m, 7.03 m et 3.07m. Tous les autres paramètres géométriques des trois déversoirs testés ont été gardés constants.

Les essais ont été menés dans un canal rectangulaire de 1.22m de large et 0.91m de profondeur avec une longueur de 7.3m. La figure II.16 montre un déversoir en labyrinthe à deux cycles similaires aux déversoirs expérimentés par Tullis. Le déversoir rectiligne à crête mince est de hauteur 0.32m, a été installé dans un canal rectangulaire ayant une largeur de 0.91 m et 0.61 m de profondeur et de longueur 7.3m.

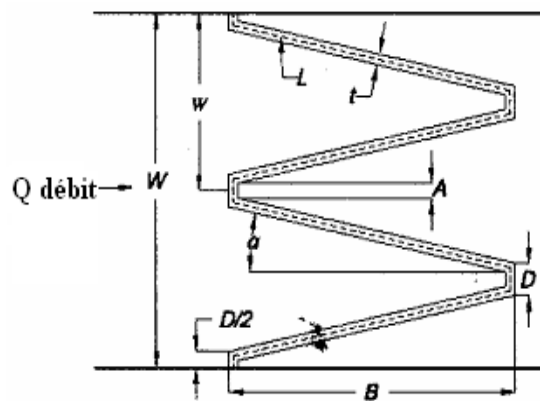


Figure II.16 : Paramètres géométriques typiques pour les déversoirs en labyrinthe.

Les résultats expérimentaux obtenus sur le déversoir rectiligne noyé ont montré ; quand le rapport adimensionnel H_d/H_o tend vers zéro, le niveau d'eau aval s'approche de niveau de crête de déversoir et la charge amont noyé s'approche de la condition d'écoulement libre (c'est-à-dire, $H^*/H_o = 1$). Par contre, si le niveau de submersion H_d/H_o , augmente, la valeur de H^*/H_o s'approche asymptotiquement de la ligne angulaire 45° , (figure II.17), ainsi, la charge amont H^* sera égale à la charge aval H_d et le déversoir noyé ne fonctionnera plus comme un organe de contrôle.

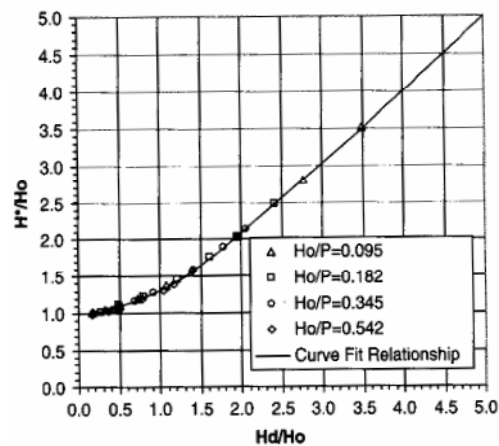


Figure. II.17 : Rapport sans dimensions décrivant l'influence de la noyade sur le niveau à l'amont du déversoir rectiligne (Tullis, 2006)

Les essais de l'effet de la noyade qui ont été réalisés sur trois déversoir en labyrinthe pour des divers débits et niveaux de noyade ont montré les mêmes conclusions que ceux du déversoir rectiligne noyé, dans lesquelles les charges amont de noyade approchent la charge d'écoulement libre quand le niveau de submersion, H_d/H_o , tend vers zéro (aucuns effets de la noyade) et la profondeur d'eau aval s'approche de la profondeur d'eau amont quand le niveau de noyade augmente. Avec un niveau suffisant de noyade, H_d égalera H^* et le déversoir en labyrinthe cessera de fonctionner comme un organe de contrôle.

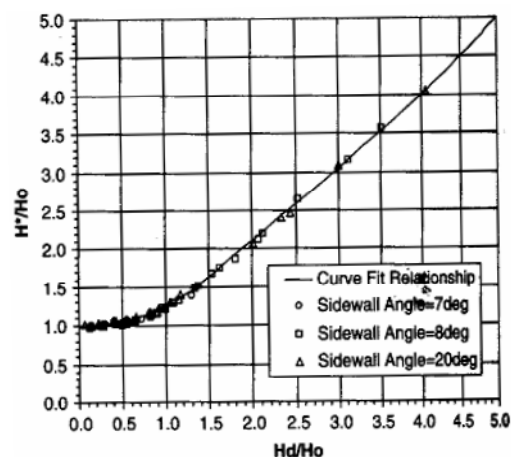


Figure II.18: Rapport sans dimensions décrivant la performance de déversoir en labyrinthe noyé.

L'équation (II.17) est considérée comme la seule méthode suggérée pour la prévision de performance du déversoir en labyrinthe noyé. A ce titre, pour des buts de comparaison, l'équation (II.17) a été employée pour calculer la charge amont correspondant au débit expérimental de déversoir en labyrinthe pour un niveau aval donné.

La figure II.19 montre les rapports adimensionnels de la charge noyée pour les déversoirs en labyrinthe et rectilignes. Ces rapports sont très semblables et compatibles avec ceux de Taylor

(1968). Les courbes de la Figure II.19 montrent que le déversoir en labyrinthe semble être moins influencé par la noyade que le déversoir rectiligne.

Les courbes de la figure II.18 montrent peu de variation de l'effet de la noyade entre les déversoirs en labyrinthe d'angle des murs latéraux $\alpha = 7^\circ$, 8° ; et 20° . Quand l'angle α s'approche de 90° , l'effet de la noyade s'approche de celui du déversoir rectiligne.

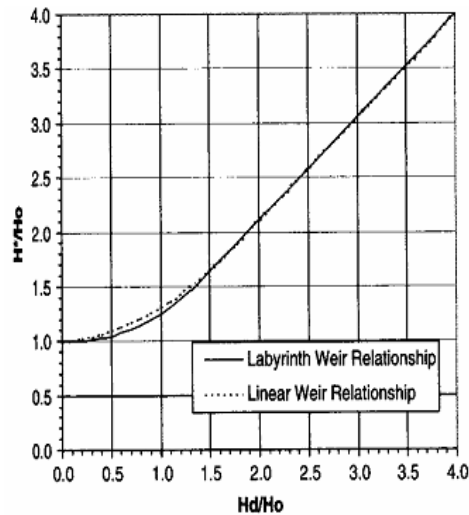


Figure II.19 : Comparaison de l'effet de la noyade entre les déversoirs en labyrinthe et rectiligne.

Une autre étude expérimentale de R. Lopes, J. Motos et J.F. Melo à déterminer l'effet de la noyade sur l'écoulement des déversoirs en labyrinthe a expérimenté deux déversoirs en labyrinthe avec les caractéristiques géométriques différents.

La géométrie du labyrinthe a été déterminée en variante l'angle (α) du mur latéral $\alpha = 30^\circ$ ($W/L = 1.8$) et $\alpha = 12^\circ$ ($W/L = 4$), nombre de cycle n égal à 4 pour $W = 2.1$ m et n égal à 2 pour $W = 1$ m et la forme de crêt quart arrondi.

Le déversoir de labyrinthe a été installé sur le canal comme suite :

1. Déversoir de labyrinthe avec angle $\alpha = 30^\circ$ ($L/W = 1.8$) installé dans un canal horizontal de la longueur 41 m et de largeur égal 2.1 m (EP1) ;
2. Déversoir de labyrinthe avec angle $\alpha = 30^\circ$ ($L/W = 1.8$) installé dans un canal horizontal de la longueur 41 m et de largeur égal 1.0 m (EP2) ;
3. Déversoir de labyrinthe avec angle $\alpha = 12^\circ$ ($L/W = 4.0$) installé dans un canal horizontal de la longueur 41 m et de largeur égal 1.0 m (EP-3) ;
4. Déversoir de labyrinthe avec angle $\alpha = 12^\circ$ ($L/W = 4.0$) installé dans un canal de la longueur 41 m et 1.0 m de largeur avec une pente 10° (EP4).

Les niveaux d'eau en amont et en aval de les déversoirs de labyrinthe acquis trois à la position différente Z , où Z est la distance du canal laissé la paroi latérale :

- a) $Z_1 = 0.525$ m (0.25 m pour le canal de 1.0 m de largeur) ;
- b) Z_2 (ligne centrale de canal) = 1.05 m (0.50 m pour le canal de 1.0 m de largeur) ;

a) $Z_3 = 1.575$ m (0.75 m pour le canal de 1.0 m de largeur).

En aval du déversoir de labyrinthe, le département d'écoulement a été contrôlé par une porte verticale. Le débit a été mesuré avec les compteurs de débit situés dans les canalisations d'alimentation. Des niveaux d'eau ont été mesurés avec des piézomètres situés à l'amont du déversoir et des piézomètres situés à l'aval du déversoir.

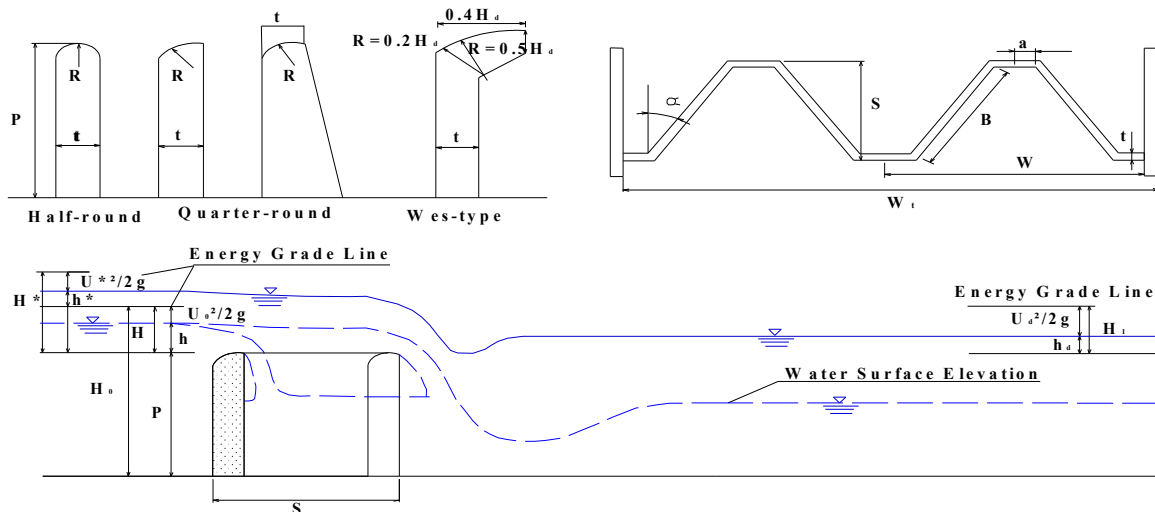


Figure II.20 : Paramètres et nomenclature du déversoir à écoulement libre et submergé (R. Lopes, J. Motos et J.F. Melo 2008)

Des valeurs du $H_d/H < 4.5$ ont été analysées. Dans la présente étude, des valeurs de $H_d/H < 1.3$ (valeur maximum permise dans l'installation expérimentale) et ≤ 0.8 de H/P ont été analysées.

La procédure d'essais de l'étude expérimentale actuelle était comme suit :

Le débit qui transite par ce canal, le niveau d'eau ascendant a été mesuré à z_1 , à z_2 et à z_3 , et la charge hydraulique ascendante au-dessus de la crête du déversoir de labyrinthe h a été estimée pour la condition l'écoulement à surface libre. Tout en maintenant un débit constant, le niveau d'eau descendant, h_d , a été augmenté progressivement pour créer une gamme des niveaux de submersion. Chaque état d'écoulement submergé en aval a été mesuré à z_1 , à z_2 et à z_3 .

La valeur moyenne des niveaux d'eau a mesurer à z_1 , z_2 et z_3 a été employée pour estimer H , H^* et H_d . Les résultats obtenus pour le rapport sans dimensions (H^*/H) pour des déversoirs de labyrinthe avec le $\alpha = 30^\circ$ (EP1, EP2) et le $\alpha = 12^\circ$ (EP3, EP4) sont indiqués sur la figure II.21 a) et II.21 b), respectivement. Par la fonction développée par Tullis et Al (2007) est également présentée sur la figure II.21. Les données sur la figure II.21 que le rapport sans dimensions (H^*/H) est semblable, indépendamment du canal descendant, pour des déversoirs

de labyrinthe avec le $\alpha = 12^\circ$ et avec le $\alpha = 30^\circ$. Les résultats prouvent également que le submerge ne commence pas jusqu'à ce que la profondeur d'eau aval dépasse de la profondeur d'eau amont ($H_d/H > 0$) et le rapport H_d/H dépasse 0.5 la courbe représentative donne une ligne angulaire 45° , indépendamment de la cornière de paroi latérale et de la caractéristique géométrique du canal descendant. Ces résultats sont compatibles à la conclusion de Tullis et al. (2007).

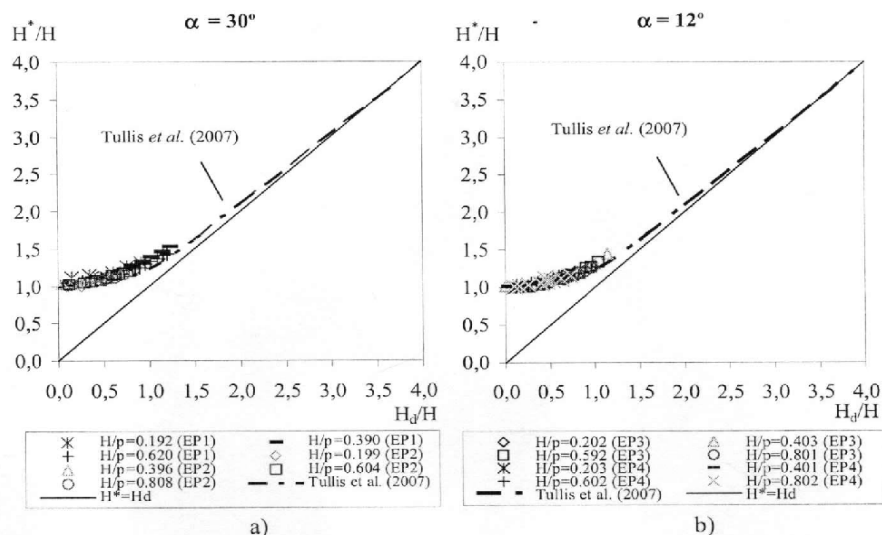


Figure.II.21 : Rapport sans dimensions, H^*/H en fonction H_d/H pour le déversoir labyrinthe noyé

La comparaison entre le labyrinthe expérimental submerge des données et formule de Tullis et al. (2007) : a) $\alpha = 30^\circ$ (EP1, EP2) ; b) $\alpha = 12^\circ$ (EP-3, EP4).

Les différences relatives entre les résultats obtenus en présente étude et la formule développée par Tullis et al. (2007) étaient inférieures à 6%, pour H_d/H . Ces résultats suggèrent que le rapport sans dimensions (H^*/H) n'est pas sensiblement influencé par la cornière de paroi latérale et de la caractéristique géométrique du canal descendant.

II.2.2 Déversoir en labyrinthe fusible

II.2.2.1 Définition

Le déversoir en labyrinthe fusible ou déversoir en hausses fusibles 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 de déversoir. Elles ont la forme d'un déversoir en labyrinthe dans lequel chaque hausse représente un cycle du labyrinthe.

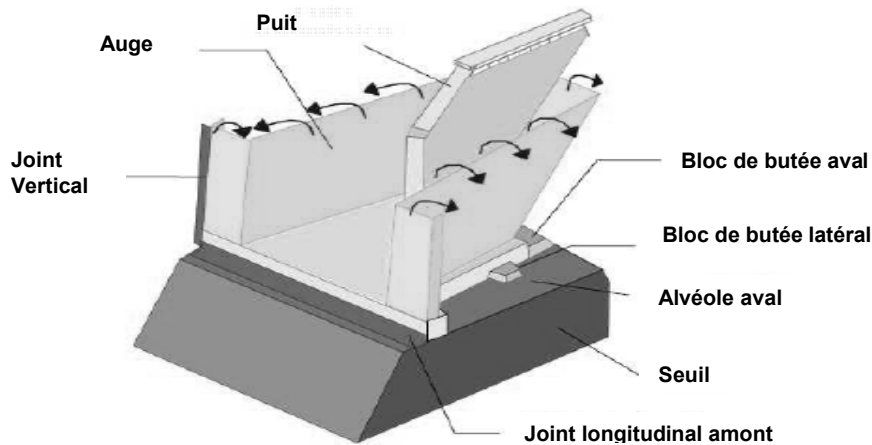


Figure II.22: Schéma des hausses fusibles

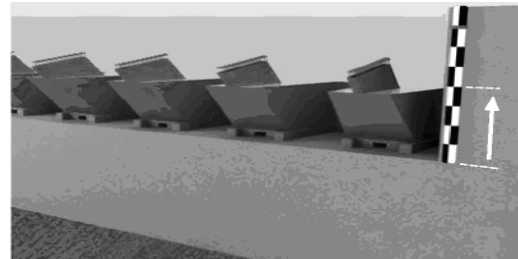
Ce dispositif est composé par des éléments sous forme de vannes, chacune d'elles se compose de trois parties fondamentales, un godet fabriqué en métal ou en béton armé, une base et un puits d'admission qui est connectée à une chambre dans la base. (Figure II.22).

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.22. 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.



A)- Déversoir d'origine



B)- Déversoir en hausses fusible

Figure II.23 : Disposition des hausses fusibles

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

Les crues de dimensionnements 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.

II.2.2.2 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.

a) 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.

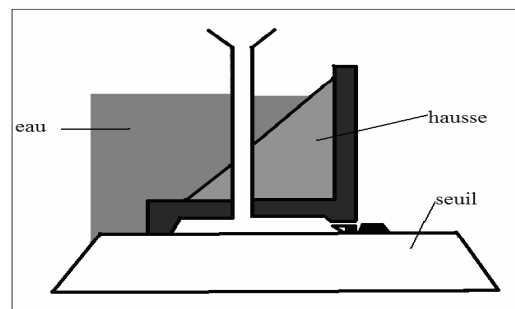


Figure II.24 : Hausse fusible fonctionne comme un barrage.

b) 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. La forme dite en labyrinthe de la partie supérieure des hausses permet d'allonger la longueur du seuil déversant qui peut être de l'ordre de quatre fois la longueur du seuil d'origine. Pendant cette phase de fonctionnement, chaque élément reste largement auto stable comme dans la phase précédente.

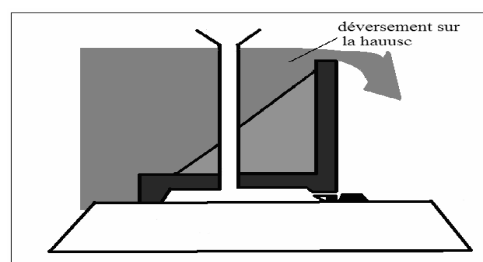


Figure II.25 : Hausse fusible fonctionne comme un déversoir.

c) En cas de forte crue, au-delà d'une choisi, 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.

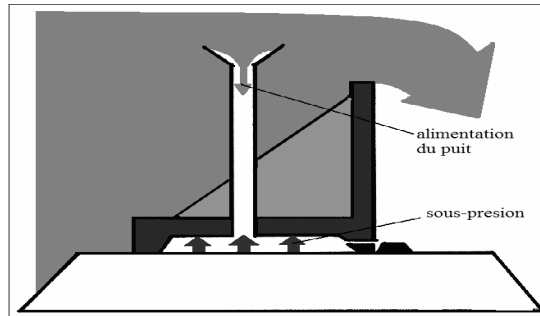


Figure II.26 : Alimentation de la chambre de mise en pression.

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.

d) 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.

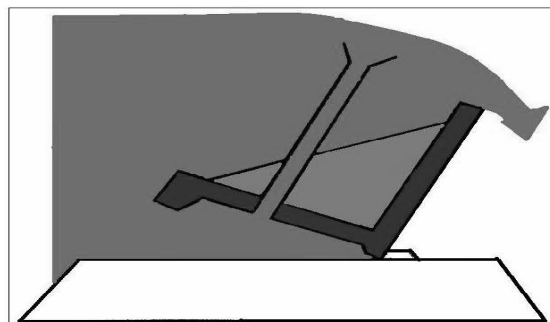


Figure II.27 : L'eau bascule la hausse.

II.2.2.3 Caractéristiques de débit des hausses fusibles

Les caractéristiques de débit qui transite par les hausses fusibles ont fait l'objet des études hydrauliques au Laboratoire National d'Hydraulique à Chatou (France) et au laboratoire Tennessee Valley Authority à Norris (USA). Plusieurs configurations de hausses ont été évaluées par le LNH, tandis que seulement la largeur et la configuration à basse charge ont été évaluées par le TVA. Les différences entre les deux résultats étaient de 4%.

Les caractéristiques de débit ont été exprimées employant le coefficient de débit C_d pour les déversoirs définis par Rouse (1960) comme :

$$Q = \frac{2}{3} C_d L_c \sqrt{2gh}^{3/2} \quad (\text{II.18})$$

Où Q = débit; g = accélération de l'apesanteur L_c = longueur de la crête de la hausse fusible; et h = différence entre le niveau d'eau dans le réservoir et le niveau de la crête.

Le coefficient de débit est une fonction de la longueur de la crête de la hausse et la hauteur d'eau amont h rapportée à la profondeur totale de l'écoulement sur le seuil (Falvey, 1995).

Le coefficient de débit diminue quand la charge sur la hausse fusible augmente. La meilleure équation convenable pour le coefficient de débit suit une loi de puissance donnée par :

$$C_d = C_1 \left(\frac{h}{H} C_2 \right)^{C_3} \quad (\text{II.19})$$

Où H = la hauteur de la hausse et C_1 , C_2 et C_3 sont des constantes pour les valeurs de h/H supérieures à 0.1. Le coefficient C_2 est un facteur de la tension superficielle qui devient négligeable quand la profondeur d'écoulement sur la hausse augmente. Théoriquement, pour un débit nul la valeur du coefficient de débit doit être 0.611. Une extrapolation linéaire des données empiriques s'approche de cette limite pour les valeurs de h/H moins de 0.1.

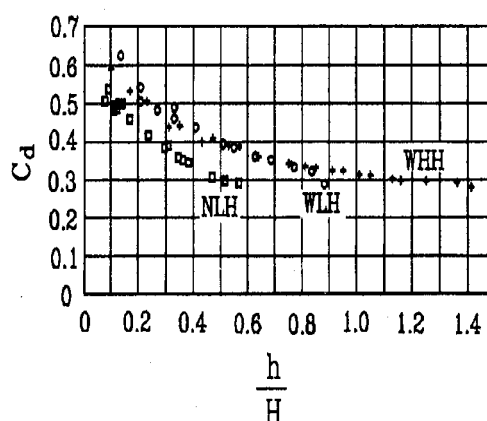


Figure II.28 : Courbe des coefficients de débit obtenu expérimentalement (Falvey, 1995)

Les hausses fusibles sont conçues pour fonctionner avec une nappe aérée. Les essais au TVA ont montré que le coefficient de débit était constant jusqu'au point où le niveau d'eau aval devient égal au niveau de la crête. Les effets de submersion sur les coefficients de débit observés pour les déversoirs en labyrinthe ne sont pas significatifs avec les hausses fusibles. L'inclinaison de la face aval et la barre de renforcement au milieu de la hauteur de la hausse se combinent pour maintenir la crête aérée pour les hauts niveaux d'eau aval (Falvey, 1995).

II.2.3 Blocs fusibles

II.2.3.1 Définition

Les blocs fusibles sont des éléments massifs en béton simplement posés les uns à côté des autres sur le seuil d'un déversoir, ils sont auto stables jusqu'à ce que le niveau d'eau à l'amont atteigne un certain niveau pour lequel ils basculent.

Les blocs posés sur un même seuil ont la même hauteur mais peuvent avoir des épaisseurs et donc des poids différents, de sorte qu'ils basculent pour des hauteurs d'eau différentes. Ce niveau peut être prévu avec précision si la valeur de la sous-pression qui s'exerce sous le bloc est bien connue. Une façon simple de résoudre ce problème est de s'assurer que la sous-pression est soit totale, soit inexistante. Ceci peut se faire par la création, sous chaque bloc, d'un vide qui soit fermé par un joint d'étanchéité à l'aval et communicant avec l'amont (sous-pression totale), ou soit fermé par un joint d'étanchéité à l'amont et communicant avec l'aval (sous-pression inexistante).

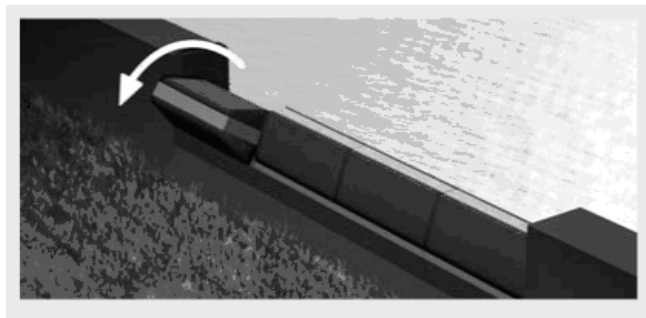


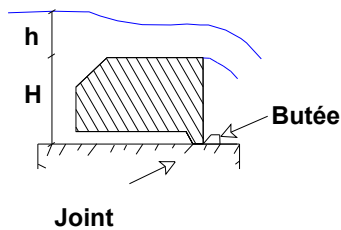
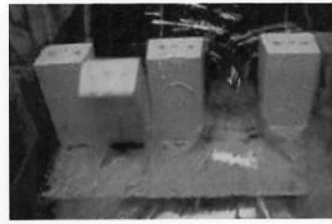
Figure II.29 : Vue en perspective d'un déversoir Blocs fusibles

Les blocs peuvent être prévus pour basculer avant d'être submergés. Ils sont alors relativement hauts par rapport à leur longueur (hauteur H jusqu'à deux fois la longueur L) et la solution sans sous-pression permet de leur garder une épaisseur E réduite. Ils forment en quelque sorte une crête fusible qui peut atteindre une hauteur importante et jouer le rôle d'un déversoir de sécurité.

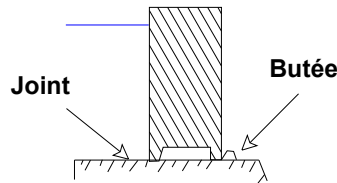
Les blocs peuvent au contraire être prévus pour être submergés par une nappe d'eau h importante (jusqu'à deux fois la hauteur H du bloc) avant de basculer. Ils sont alors relativement longs et épais par rapport à leur hauteur (L/H jusqu'à 10 ; E/H jusqu'à 3) et peuvent présenter un profilage à l'amont pour faciliter l'écoulement. La solution (sous-pression totale), bien que consommant plus de béton, paraît plus intéressante dans ce cas car elle donne une meilleure précision quant au niveau d'eau assurant le basculement (les courbes représentatives du moment stabilisateur et du moment de renversement se coupent

avec un angle maximum). En outre, cette solution n'exige pas une grande précision pour la position exacte du joint d'étanchéité, celui-ci étant situé à l'aval, c'est-à-dire proche de l'axe de rotation du bloc quand il bascule. Il convient simplement de veiller à une aération suffisante de la nappe, ce qui est facile à réaliser.

Ces blocs sont particulièrement intéressants pour l'amélioration des seuils libres (augmentation du débit par abaissement du seuil ou augmentation du stockage par relèvement du plan d'eau ou combinaison des deux) et semblent très bien adaptés aux nombreux petits barrages du Burkina Faso. Cette solution est donc celle qui sera développée ci-après.



A)- Bloc avec sous-pression
et déversement avant basculement



B)- Bloc sans sous-pression
et basculement avant déversement

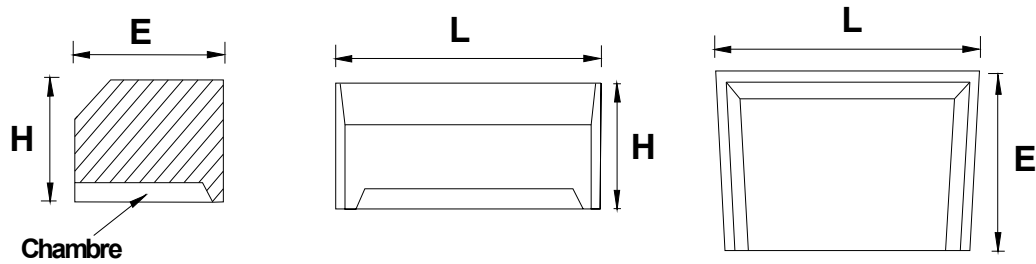
Figure II.30 : Les deux types de blocs fusibles

(On notera les essais de murs séparateurs sur la photo de gauche).

II.2.3.2 Blocs fusibles permettant le déversement avant renversement

Pour s'assurer que la sous-pression est totale, la partie inférieure amont du bloc sera laissée ouverte. Les extrémités latérales pourront rester également ouvertes (quelques supports sont alors nécessaires pour assurer la stabilité du bloc sur le seuil) ou être fermées, créant ainsi sous le bloc une chambre fermée sur trois cotés et ouverte à l'amont.

Des dispositions doivent être prises aux extrémités des blocs pour éviter que les irrégularités ou les défauts de verticalité toujours possibles lors de leur fabrication, n'entraînent des frottements entre blocs ou entre un bloc et un mur séparateur lors du basculement. Une solution possible consiste à réduire légèrement la longueur de la face aval du bloc pour donner à celui-ci une forme trapézoïdale.



A)- Coupe transversale

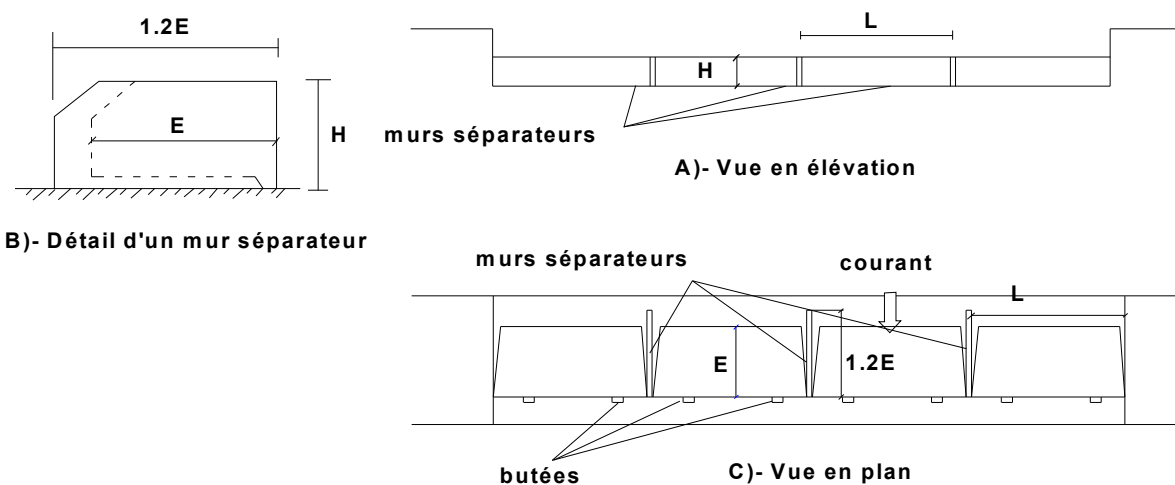
B)- Vue d'amont

C)- Vue de dessous

Figure II.31 : Bloc type

Les blocs peuvent être placés directement côte à côte, mais les nombreux essais sur modèles réalisés dans différents pays (France, Algérie, Chine, Vietnam) et coordonnés par Hydrocoop, ont montré l'intérêt de placer un mur vertical mince entre deux blocs adjacents lorsque ceux-ci ne sont pas d'une longueur très importante. Ces murs, fixés dans le seuil, limitent l'influence de la déformation de la nappe due au départ d'un bloc, sur les blocs adjacents et augmentent ainsi la précision du niveau de l'eau assurant le renversement des blocs restants.

Les essais ont également montré que ces murs n'avaient pas besoin d'avoir de grandes dimensions pour être efficaces (voir figure II.32).



B)- Détail d'un mur séparateur

A)- Vue en élévation

C)- Vue en plan

Figure II.32: Disposition générale et murs séparateurs

Les calculs théoriques ne sont simples qu'avant déversement. Après déversement, il est difficile de calculer l'épaisseur exacte de la nappe au dessus des blocs et la pression qui s'exerce contre la partie haute à l'amont des blocs ainsi que de prendre en compte les effets dynamiques et les frottements de l'eau contre les blocs.

Les calculs théoriques ne permettent donc que de réaliser des avant projets et des essais (par ailleurs très simples) de calibrage sur modèles réduits restent souhaitables pour préciser les épaisseurs assurant les renversements pour les hauteurs d'eau désirées.

La figure II.33 montre les courbes théoriques de stabilité. La lignes brisée MV représente le moment des forces verticales et la courbe MH le moment des forces horizontales (les moments sont calculés par rapport à la butée aval) en fonction d'une charge d'eau totale W à l'amont d'un bloc d'épaisseur E et de hauteur H . Le renversement du bloc correspond au point de rencontre de ces deux courbes. La ligne brisée MV1 en pointillée correspond à une épaisseur de bloc augmentée de 10 %.

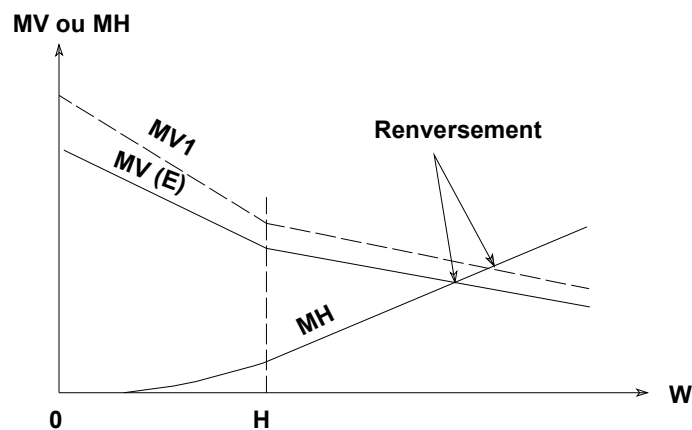


Figure II.33 : Diagramme de stabilité

Les essais sur modèles ont montré la fiabilité du rapport entre l'épaisseur E d'un bloc et l'épaisseur de lame d'eau pour laquelle il bascule.

Pour un avant projet très préliminaire, on peut utiliser la formule approchée suivante pour un bloc ayant la forme générale décrite aux paragraphes précédents et une densité moyenne :

$$h = E - 0,4 H \quad (\text{II.20})$$

Qui signifie qu'un bloc dont l'épaisseur est égale à une fois et demie sa hauteur ($E = 1,5 H$) bascule pour une épaisseur de nappe à peu près égale à sa hauteur ($h = H$).

Dans la plupart des cas, il faut environ 1 m^3 de bloc de béton pour augmenter le débit de $1 \text{ m}^3/\text{sec}$. L'utilisation de blocs fusibles à la place d'un seuil classique permet à la fois de réduire la quantité de béton à mettre en œuvre et d'accroître la capacité de l'évacuateur d'environ $1 \text{ m}^3/\text{se}$

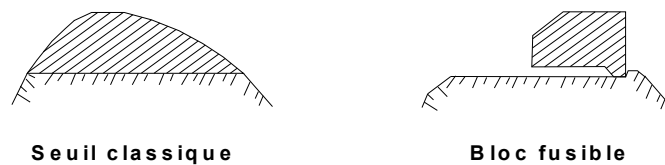


Figure II.34 : Comparaison d'un seuil classique et d'un seuil équipé de blocs fusibles

La construction des blocs peut être réalisée très simplement, par exemple en coulant le béton sur une couche de matériaux tout venant facile à enlever après coulage du béton, recouverte d'une membrane plastique comme indiqué sur la figure II.35. Si les extrémités latérales restent ouvertes, quelques supports sont nécessaires pour assurer la stabilité du bloc.

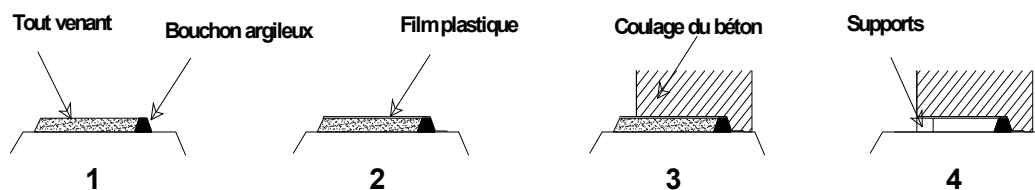


Figure II.35 : Exemple de phases de construction

II.2.4 Déversoirs en touches de Piano (PK.-Weir)

II.2.4.1 Définition

Le déversoir en touches de piano représente une nouvelle forme de déversoir non rectiligne baptisée Piano Keys Weir (PK-Weir), il a été développé par Hydrocoop-France et le Laboratoire Aménagements Hydrauliques et Environnement de l'Université de BISKRA (ALGERIE).

Ce nouveau type de déversoir a l'avantage d'être appliqué aux barrages en terre et sur des sections réduites de barrages poids existants ou nouveaux. Le PK-Weir permet l'évacuation des débits spécifiques jusqu'à $100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, en multipliant au moins par trois le débit d'un déversoir Creager, sa construction est simple et facile et peut être réalisé par des ressources locales de chaque pays. Le PK-Weir réduira considérablement le coût de la plupart des nouveaux barrages et permettra l'amélioration à la fois, de la capacité d'évacuation de l'évacuateur de crues et la capacité de stockage de la retenue des barrages existants.

II.2.4.2 Configuration géométrique du PK-Weir

Sur la base des essais préliminaires sur des modèles réduits physiques la forme géométrique du PK-Weir a été définie par :

- Une disposition rectangulaire des alvéoles quelque peu semblable 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 ;
- Une largeur réduite des éléments grâce à la forme rectangulaire ;
- Une surface réduite des murs latéraux ; (voir figure II.36).

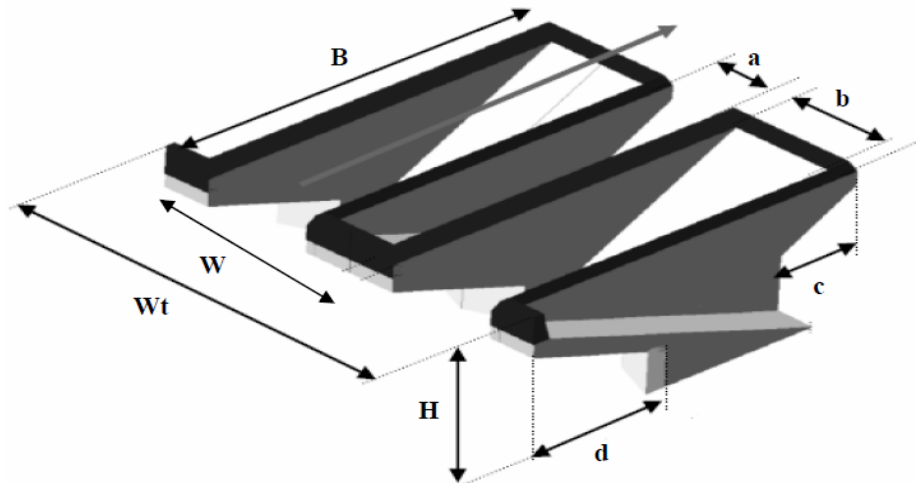


Figure II.36 : Schéma d'un élément du déversoir en clefs de Piano (PK-Weir)

- H : 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 d'un cycle du déversoir ;
- Wt : Largeur total du déversoir.

La forme de déversoir en plan peut changer, cependant, la forme la plus avantageuse correspond à la forme symétrique rectangulaire en plan comme montrée dans la figure II.36.

La configuration d'une telle forme en plan est totalement définie par la hauteur maximale H des parois latérales, la largeur des alvéoles amont et aval, la longueur des porte-à-faux, l'accroissement de longueur L/W , le nombre de cycles, n formant le déversoir et le rapport d'aspect vertical W/P .

Selon le travail de Lempérière et Ouamane (2003), deux types de PK-Weir ont été définis, type A avec deux porte-à-faux en amont et en aval et le deuxième type B avec uniquement des porte-à-faux en amont, ceci permet des gains importants de rendement supérieurs à 10% par rapport au type A, les efforts structurelles sont moins importants pour les grands débits spécifiques.

1)- PK-Weir Type A

Les porte-à-faux amont et aval sont identiques, ceci favorise l'utilisation des éléments préfabriqués en béton armé qui peuvent être utilisés pour des débits spécifiques jusqu'à 20

$m^3/s/ml$. 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).

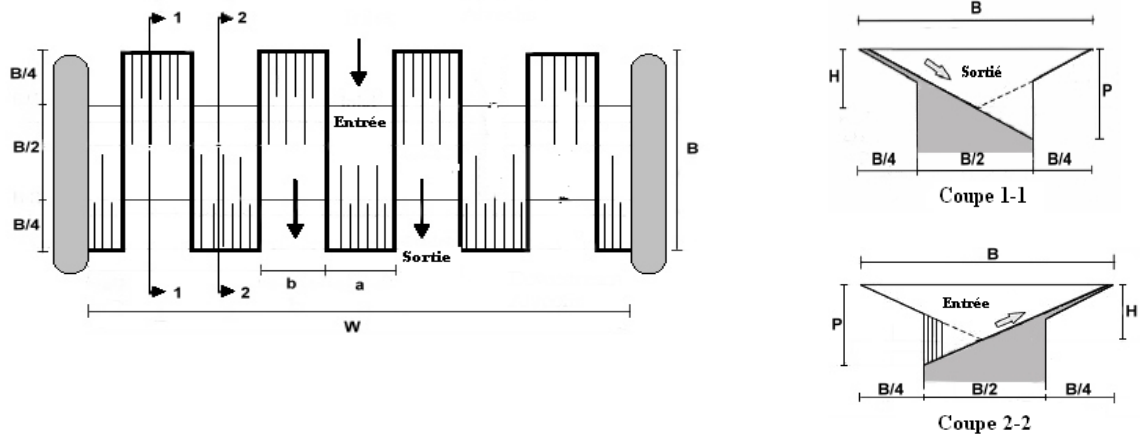


Figure II.37 : PK-Weir de type A

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 attirant pour plusieurs barrages futurs.

Cependant, le modèle de type B ne favorise pas l'utilisation des éléments préfabriqués qui peuvent être financièrement avantageux pour des débits spécifiques inférieurs à $20m^3/s/m$. Le modèle B est probablement plus intéressant pour les grands débits spécifiques (Ouamane et al. 2006c).

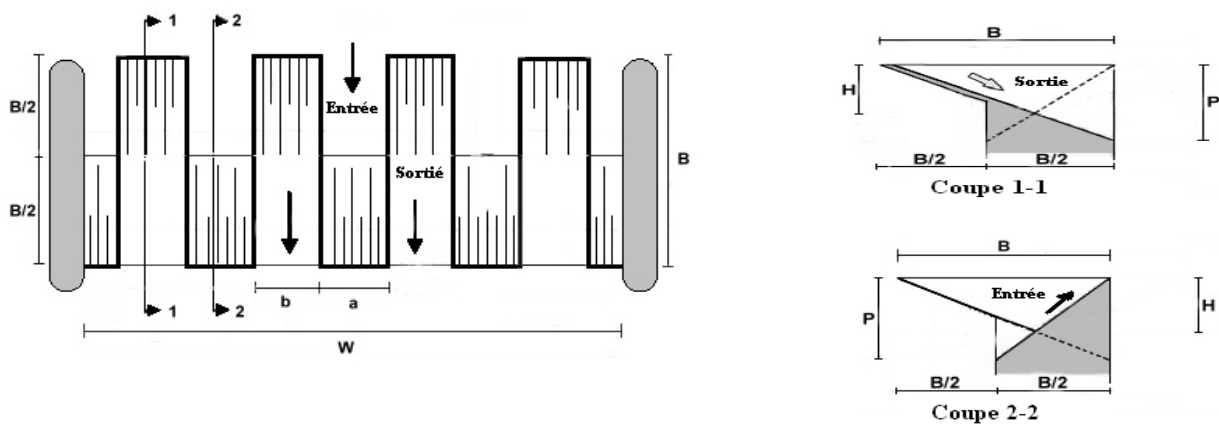


Figure II.38 : PK-Weir de type B

II.2.4.3 Mode d'écoulement sur le PK-Weir

L'écoulement sur le PK-Weir est tout à fait différent de l'écoulement sur le déversoir en labyrinthe, il 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 selon la charge sur le déversoir. La deuxième nappe qui est superficielle favorise l'aération du déversoir à cause de la présence des porte-à-faux (Figure II.39) (Ouamane, 2006b).



Figure II.39 : Ecoulement en deux nappes déversante sur un cycle de PK-Weir(Ouamane,2006b)

II.2.4.4 Performance hydraulique

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 a/b , 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).

$$C_w = f\left(\frac{D}{P}, \frac{W}{P}, \frac{L}{W}, \frac{b}{a}, \frac{c}{d}, \frac{h^*}{P}, \frac{t}{P}, \frac{R}{P}\right) \quad (\text{II.21})$$

II.2.4.4.1 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.

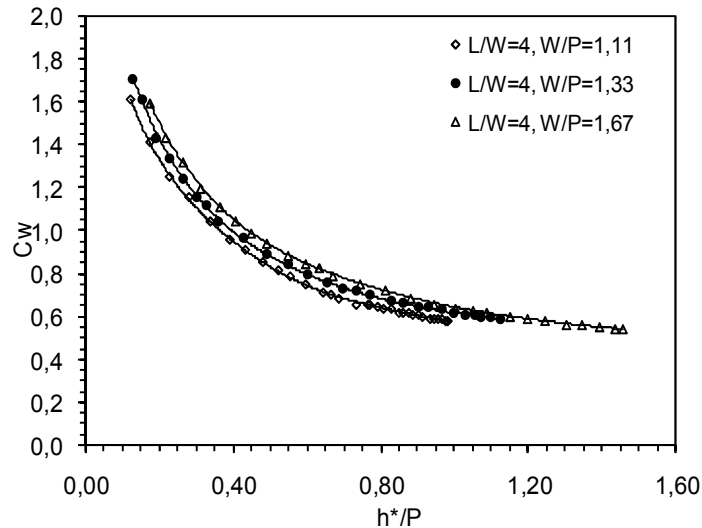


Figure II.40 : Coefficient de débit en fonction du rapport de l'aspect vertical W/P
(Ouamane, 2006b)

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 P.K.Weir.

II.2.4.4.2 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 influence remarquablement sur l'écoulement.

La figure II.41 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).

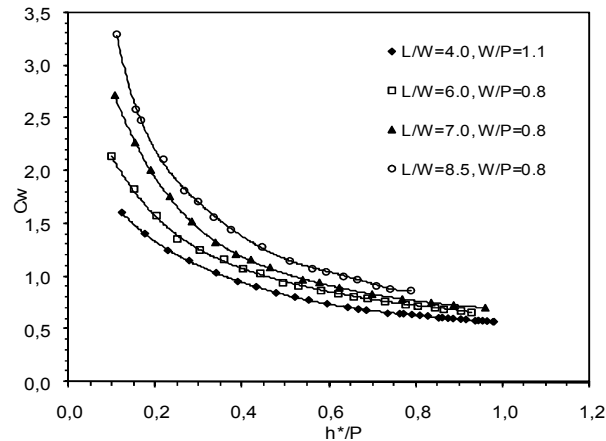


Figure II.41 : Coefficient de débit en fonction du ratio L/W (Ouamane, 2006b)

II.2.4.4.3 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 II.42 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).

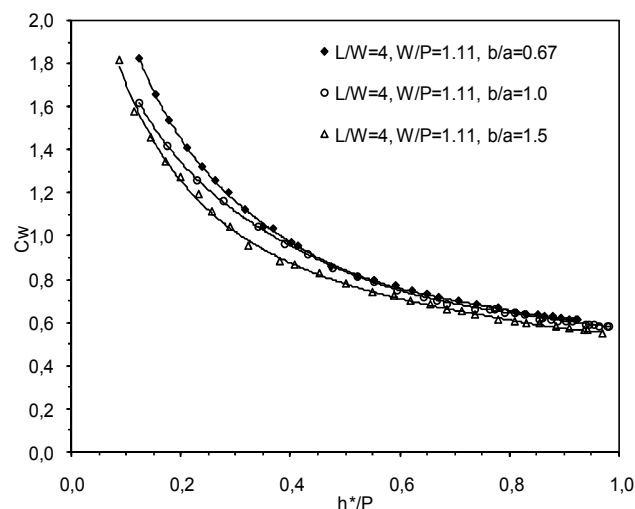


Figure II.42 : Coefficient de débit en fonction de la largeur des alvéoles (Ouamane, 2006b)

II.2.4.4.4 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 l'expérimentation, il a été remarqué qu'aucun blocage des corps flottants sous les porte-à-faux n'a été observé pendant la montée du niveau d'eau de la base du 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 évacué systématiquement vers l'aval.

La figure II.44 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 II.43: Fonctionnement du PK-Weir avec encombrement de l'entrée par des corps flottants

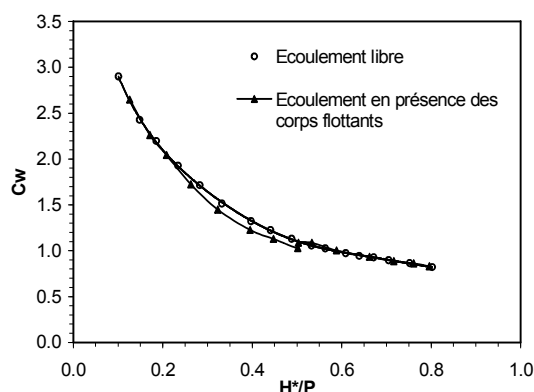


Figure II.44 : Coefficient de débit en fonction de la présence des corps flottants

II.2.4.4.5 Impact de la longueur des porte-à-faux

L'impact de la longueur des porte-à-faux a été étudié selon trois configurations, la première avec des porte-à-faux amont plus longs que les porte-à-faux aval, 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).

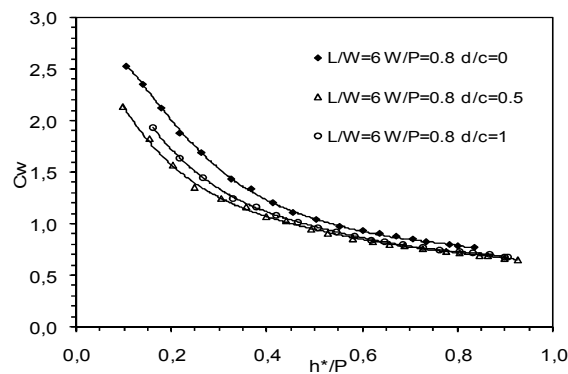


Figure II.45: Coefficient de débit en fonction de la longueur des porte-à-faux (Ouamane, 2006b)

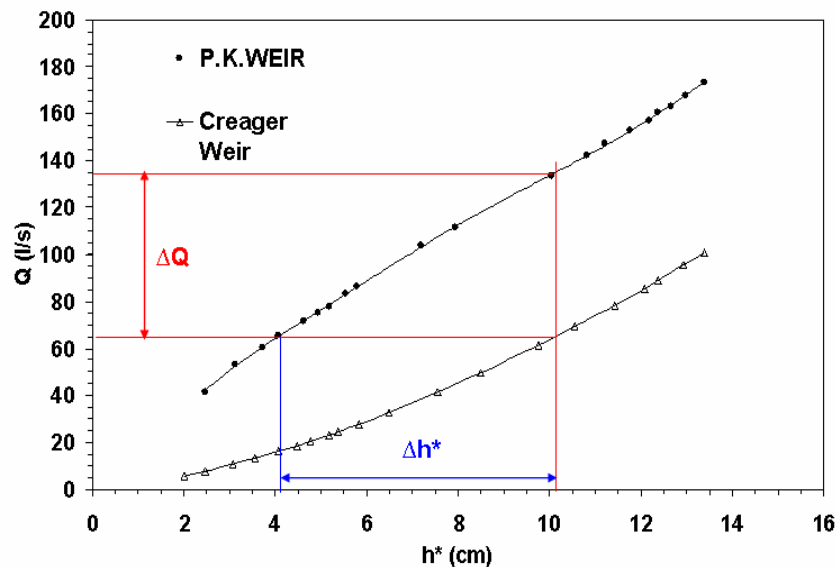


Figure II.46: Comparaison de débit entre le PK-Weir et le déversoir Creager (Ouamane 2006c)

Le débit spécifique du PK-Weir est comparé ci-dessus 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 $h < 0.3H$.

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

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 A. Noui dans el 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.

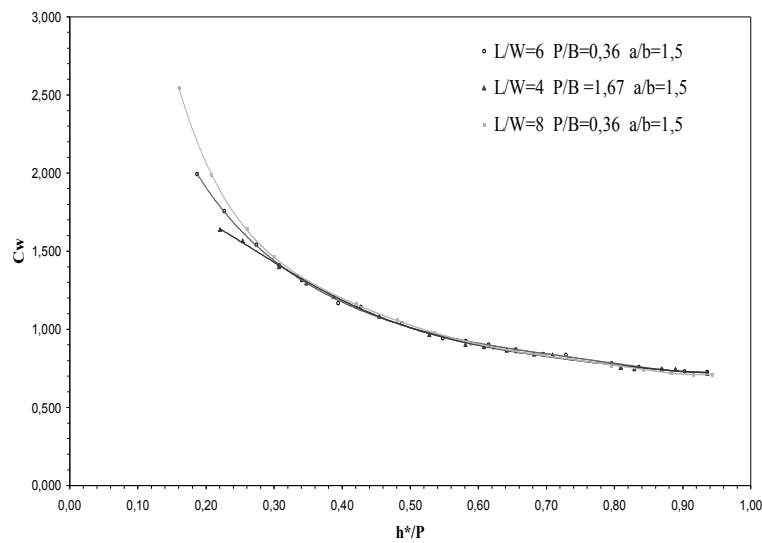


Figure II.47: Courbe des débits en fonction du ratio L/W (Noui.A, 2007)

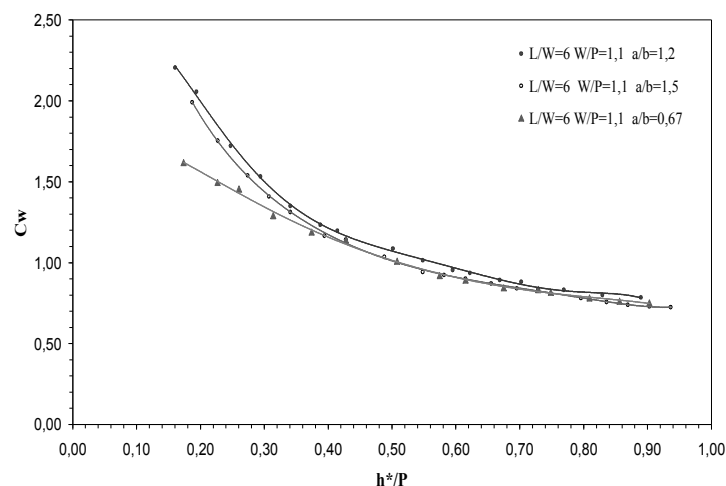


Figure II.48: Coefficient de débit en fonction des largeurs des alvéoles amont et aval (Noui.A, 2007)

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.

III. Conclusion

L'étude bibliographique du présent travail a eu pour objectif de passer en revue les principaux travaux effectués dans le domaine des évacuateurs de crues, en particulier les évacuateurs de crues en labyrinthe et le PK-Weir. Cette étude a permis de définir la géométrie, le mode d'écoulement des différents types de déversoirs et leur rendement de point de vue hydraulique.

La géométrie des déversoirs non rectilignes est caractérisée par une crête à axe discontinu en plan, permettant d'avoir une crête plus longue que la largeur du déversoir.

L'expérimentation sur modèle réduit physique était la base des différents travaux de recherche pour le développement et l'optimisation de ces types de déversoir et pour la compréhension des phénomènes d'écoulement. Le recours à l'expérimentation est exigé par la complexité de l'écoulement sur le déversoir qui ne s'apprête pas à une analyse numérique simple.

L'étude de La performance du déversoir en labyrinthe, a été réalisée pour la première fois par HAY et TAYLOR en 1970, Elle est considérée comme une base de conception des déversoirs en labyrinthe. Cette performance est exprimée par le rapport des débits entre le déversoir en labyrinthe et le déversoir rectiligne qui est dépendante des paramètres géométriques.

La première approche numérique basée sur l'expérimentation et l'analyse dimensionnelle est attribuée à Lux et Hinchliff (1985). Cette approche a défini les paramètres adimensionnels qui régissent l'écoulement sur le déversoir en labyrinthe et a permis d'exprimer le coefficient de débit en fonction de ces paramètres. Cependant, Tullis (1995) considère que le coefficient de débit est dépendant de la charge relative et de l'angle formé entre le sens de l'écoulement et la paroi latérale. Ainsi, des relations numériques ont été proposées pour la détermination du coefficient de débit en fonction de l'angle et la charge relative.

La bibliographie montre aussi l'effet de la noyade qui est étudié par plusieurs chercheurs tels que Fteley et Stems (1883), Francis (1884), Bazin (1894), Cox (1928), Villemonte (1947) ces travaux ont concerné le déversoir rectiligne, tandis que le déversoir en labyrinthe n'a fait l'objet d'étude que par Taylor (1968), Falvey (2003), Tullis (2006) et R. Lopes, J. Motos et J.F. Melo 2008. Ce dernier a déterminé une courbe unique qui représente la variation de la charge relative amont en fonction de la charge relative aval pour deux déversoirs en

labyrinthe de différentes configurations géométriques et de la caractéristique géométrique du canal descendant.

Les déversoirs en labyrinthes fusibles constituent une méthode simple pour augmenter la capacité de stockage des barrages et/ou des déversoirs. Ils sont constitués par des éléments jointifs et indépendants disposés sur la crête du déversoir du barrage. Pendant une forte crue et en fonction de son importance, les hausses basculent les unes après les autres sous la seule action de l'eau, de manière à libérer progressivement le seuil.

La nouvelle forme de déversoir développé par F. Lempérière et A. Ouamane (2003) baptisée PK-Weir 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 ; peut assurer la sécurité des barrages à faible coût ;

Le PK-Weir est un déversoir de type labyrinthe, caractérisé par des éléments de forme rectangulaire en plan. Sa structure est constituée essentiellement par des porte-à-faux amont et aval, ceci lui donne une longueur transversale de crête supérieure à la base d'appui. Les radiers amont et aval sont inclinés. Ce déversoir a fait l'objet d'une étude expérimentale détaillée qui a permis de sélectionner deux type de PK-Weir, le premier avec des porte-à-faux amont et aval (Type A) et le second avec seulement des porte-à-faux amont (Type B).

Le PK-Weir de type (A) a fait l'objet d'une étude expérimentale détaillée, qui a permis de déterminer l'impact de chaque paramètres géométrique sur le rendement de ce type de PK-Weir est de définir sa forme optimale.

Deuxième Partie

Etude expérimentale

Chapitre I

Description du dispositif et
protocole expérimentaux

CHAPITRE I

Description du dispositif et protocole expérimentaux

I.1 Introduction

Cette étude expérimentale consiste à déterminer dans un premier temps l'influence des conditions d'approche amont sur la performance du PK-Weir et du labyrinthe classique dans des conditions d'écoulement dénoyé. Dans un second temps les essais auront pour but d'établir l'effet de la variation du niveau aval sur l'écoulement en amont du déversoir.

Afin de réaliser cette étude, plusieurs modèles de déversoir ont été confectionnés. Ces modèles ont faits l'objet d'études selon les deux conditions d'écoulement dénoyé et noyé.

A : En conditions d'écoulement dénoyé :

1. Effet de l'emplacement du déversoir (sur support ou sur le radier d'un canal);
2. Effet de la forme d'entrée au pied du déversoir;
3. Effet de la forme du radier des alvéoles de sortie et de l'entrée;
 - a- Effet de la forme de radier des alvéoles de sortie;
 - b- Effet de la forme de radier des alvéoles d'entrée ;
 - c- Effet de l'importance de l'inclinaison du radier amont .

B : En conditions d'écoulement noyé :

1. Effet de la forme du radier aval (encombrement aval) ;
2. Effet du débit de transit sur la noyade ;
3. Effet du type d'obstacle en aval du déversoir (Vanne et Seuil) ;
4. Effet du ratio L/W ;
5. Effet de la contraction latérale ;
6. Effet de la submersion sur le coefficient de débit.

I.2 Modèles expérimentaux

L'étude expérimentale a été réalisée sur quatre modèles de déversoirs de configuration différente, confectionnés en plaques de tôles métalliques $e = 3\text{mm}$. Les caractéristiques géométriques de ces modèles sont mentionnées dans le tableau (I-01).

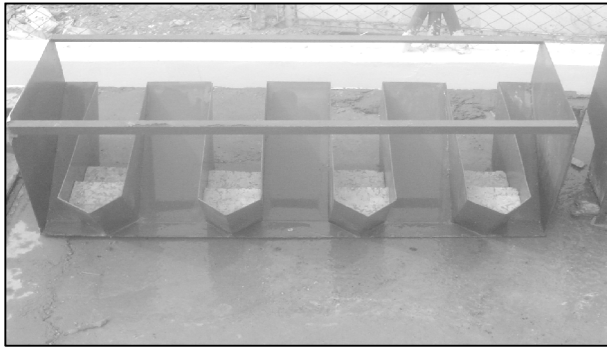


Figure I.01 : PK-Weir type A1m

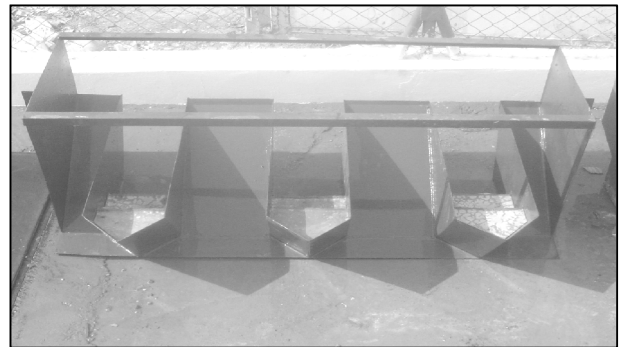


Figure I.02 : PK-Weir type A2m



Figure I.03 : PK-Weir type A

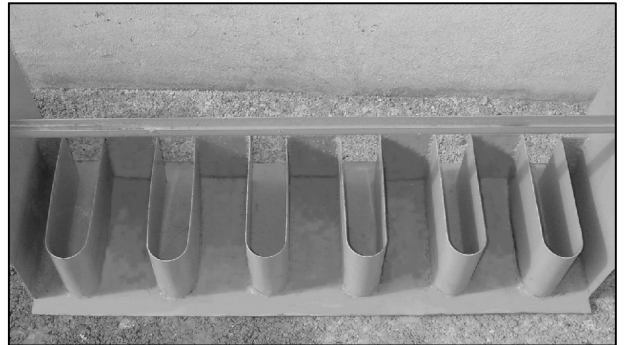


Figure I.04 : Labyrinthe rect. arrondi en amont D

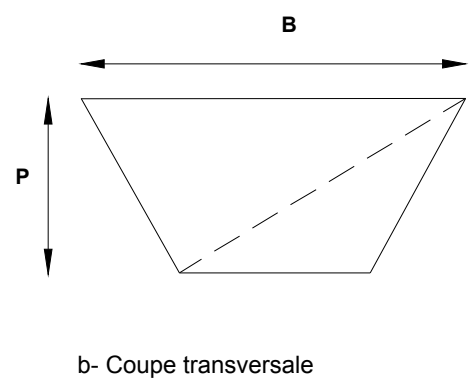
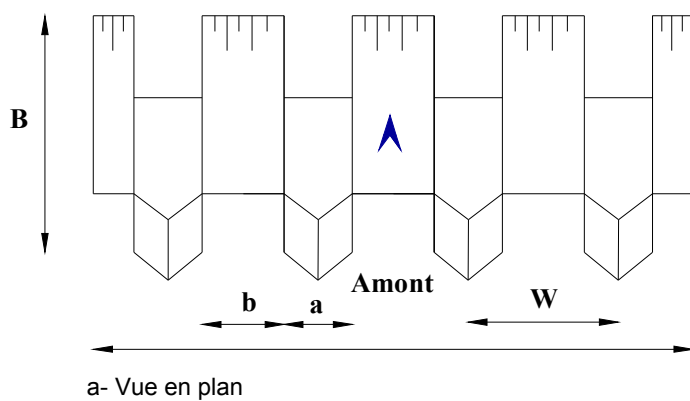


Figure I.05 : Schéma du modèle de PK-Weir type A1m

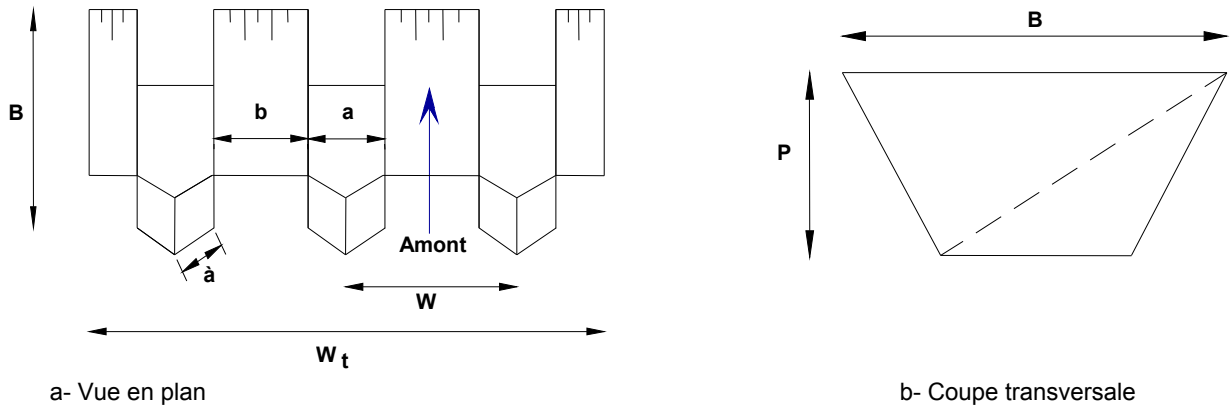


Figure I.06 : Schéma du modèle de PK-Weir type A2m

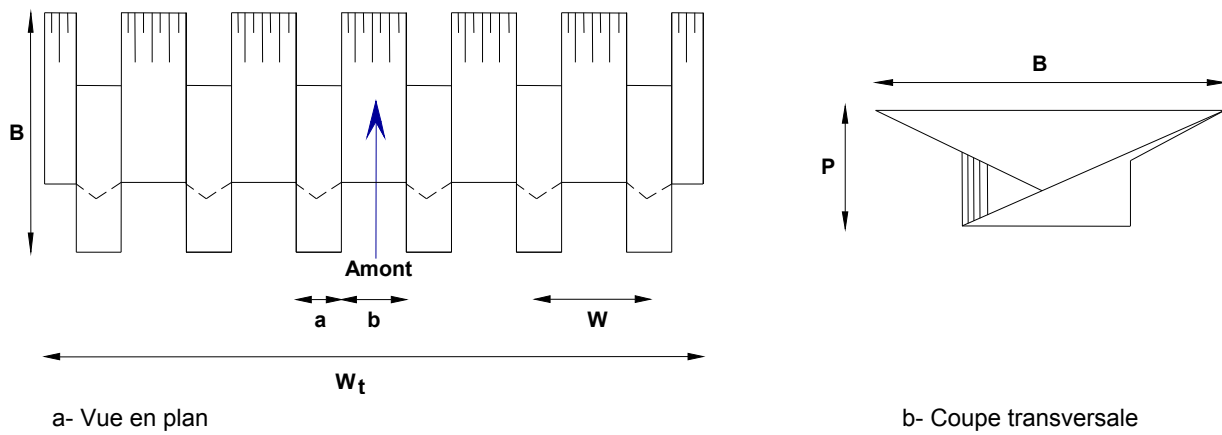


Figure I.07 : Schéma du modèle de PK-Weir type A

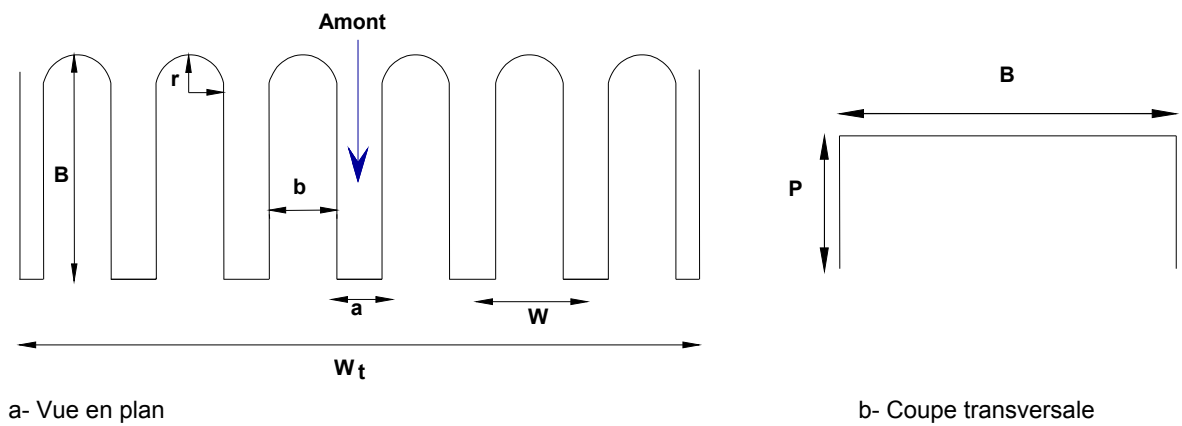


Figure I.08 : Schéma du modèle de déversoir en labyrinthe type D

Tableau II-01 : Caractéristiques géométriques des modèles réduits

Modèle	N°	n	L	Wt	P	B	W	a	b	L/W	W/P	a/b	Observation
		-	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	-	-	-	
PK-Weir avec porte-à-faux amont et aval	A2m	3	405	105	20	46.9	35	18	15	3.85	1.75	1.2	Installé sur radier du canal avec alvéole aval contenant deux marches d'escalier de hauteur 8cm et 6 cm
		3	405	105	20	46.9	35	18	15	3.85	1.75	1.2	Installé sur radier du canal avec alvéole aval contenant une marche de hauteur 8 cm
		3	405	105	20	46.9	35	18	15	3.85	1.75	1.2	Installé sur radier du canal alvéole aval contenant deux marches d'escalier de hauteur 8 et 3 cm
	A1m	4	498	99.2	20	48.48	24.8	13.5	11.3	5.01	1.24	1.2	Installé sur radier du canal avec alvéole aval contenant deux marches d'escalier de hauteur 8 et 6cm
		4	498	99.2	20	48.48	24.8	13.5	11.3	5.01	1.24	1.2	Installé sur radier du canal avec alvéole aval contenant une marche d'escalier de hauteur 8 cm
		4	498	99.2	20	48.48	24.8	13.5	11.3	5.01	1.24	1.2	Installé sur radier du canal avec alvéole aval contenant deux marches d'escalier de hauteur 8 et 3cm
		4	498	99.2	20	48.48	24.8	13.5	11.3	5.01	1.24	1.2	Installé sur radier du canal avec alvéole aval contenant deux marches d'escalier de hauteur 4cm chacune
		4	498	99.2	20	48.48	24.8	13.5	11.3	5.01	1.24	1.2	Installé sur socle à parement amont arrondi avec alvéole aval contenant trois marches d'escalier de hauteur 4cm chacune
		4	498	99.2	20	48.48	24.8	13.5	11.3	5.01	1.24	1.2	Installé sur socle à parement amont incliné avec alvéole aval contenant trois marches d'escalier de hauteur 4cm chacune
		4	498	99.2	20	48.48	24.8	13.5	11.3	5.01	1.24	1.2	Installé sur socle à parement amont vertical avec alvéole aval contenant trois marches d'escalier de hauteur 4cm chacune
		4	498	99.2	20	48.48	24.8	13.5	11.3	5.01	1.24	1.2	Installé sur radier du canal sans contraction et avec alvéole aval contenant une marche d'escalier de hauteur 8cm
	A	6	600	100	15	41	16.67	9	7.5	6.0	1.11	1.2	Installé sur socle
		6	600	100	15	41	16.67	9	7.5	6.0	1.11	1.2	Installé sur socle à parement amont vertical
		6	600	100	15	41	16.67	9	7.5	6.0	1.11	1.2	Installé sur socle à parement amont arrondi
	Labyrinthe rectangulaire arrondi en amont	D	6	355	90.8	15	25	59.8	9	6	3.91	3.97	1.5
6			355	90.8	15	25	59.8	9	6	3.91	3.97	1.5	Installé sur socle à parement amont arrondi et radier des alvéoles amont incliné
6			355	90.8	15	25	59.8	9	6	3.91	3.97	1.5	Installé sur socle à parement amont arrondi, radier des alvéoles amont incliné et les alvéoles aval contenant deux marches de hauteur 5,6 cm chacune
6			355	90.8	15	25	59.8	9	6	3.91	3.97	1.5	Installé sur socle à parement amont arrondi, radier amont incliné sur 2/3 de la hauteur et les alvéoles aval contenant deux marches de 5,6 cm chacune
6			355	90.8	15	25	59.8	9	6	3.91	3.97	1.5	Installé sur socle à parement amont arrondi avec radiers amont et aval horizontaux

I.3 Description de l'organisation expérimentale

I.3.1 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.



Figure I.09 : Vue d'ensemble de la station d'expérimentation des modèles réduits.

La station d'expérimentation est équipée d'une station de pompage regroupant deux pompes qui débitent 180 l/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.

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.

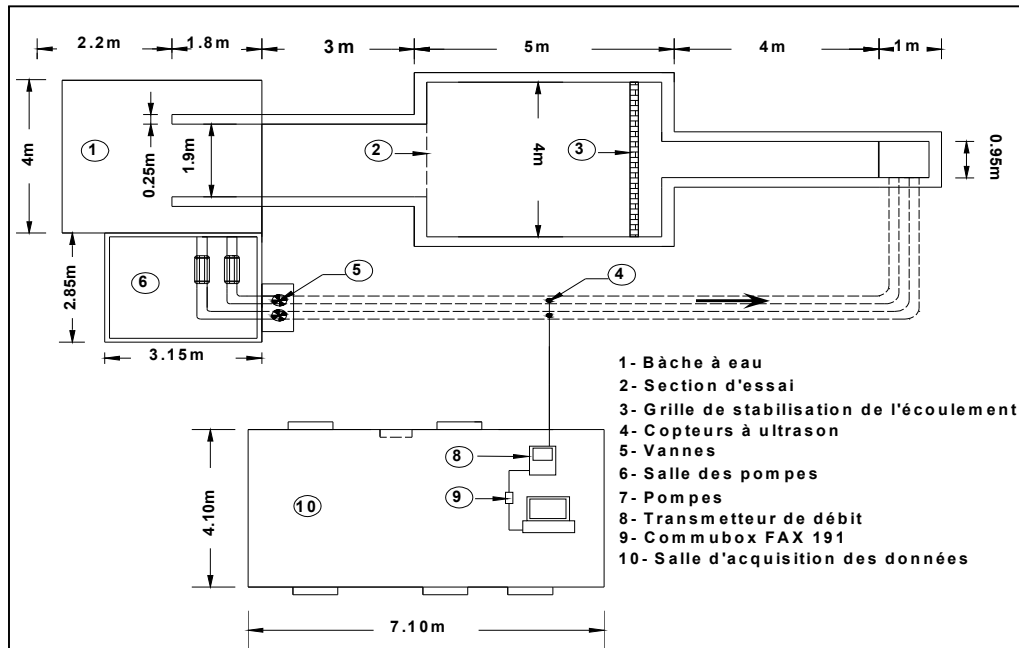


Figure I.10 : Schéma de station d'expérimentation. (Vue en plan)

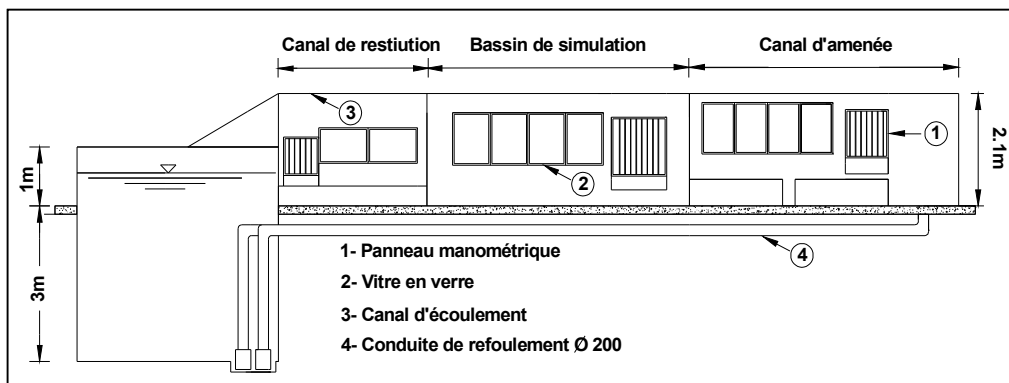


Figure I.11 : Schéma du dispositif expérimental (Vue de profil)

A la sortie aval du bassin de simulation se situe l'endroit d'emplacement des modèles de déversoirs 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.



Figure I.12 : Vue de l'aval de la station d'expérimentation.

Le débit transitant par le canal de restitution se déverse dans une bache à eau d'une capacité de 48m^3 , qui sert comme bassin de puisage pour les pompes, le système fonctionne en circuit fermé.

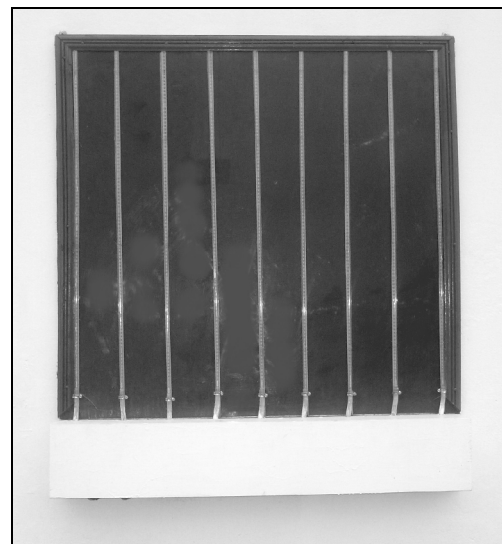
I.3.2 Instrumentation de mesure

I.3.2.1 Mesure des profondeurs d'eau

Les profondeurs 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 et des règles graduées permettant la lecture des différents niveaux d'eau dans les canaux.



a - Tableau manométrique en amont



b - Tableau manométrique en aval

Figure I.13 : Tableaux manométriques de mesure des niveaux d'eau

I-3-2-1 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.



Figure I.14 : Débitmètre à ultrason Flowmeter 93W2

Le débitmètre à ultrason est constitué de deux parties distinctes :

- Deux 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.

I-3-3 Procédure expérimentale

L'expérimentation sur modèles réduits nécessite une attention particulière pour aboutir à des résultats fiables. Ainsi, il a été fondamental de scinder le protocole expérimental en trois phases :

- Installation et calage du modèle réduit dans la section d'essai.
- Vérification du bon fonctionnement des instruments de mesure et de l'ensemble du système expérimental.
- Démarrage des essais par amorçage de la pompe.

La préparation des essais commence par l'installation du modèle, l'étanchéisation des joints et la vérification de l'horizontalité le long de la crête du modèle. Cette phase est suivie de l'amorçage de la pompe en laissant l'eau s'écouler dans le système expérimental jusqu'à

déversement par-dessus le modèle à expérimenté, on procède ensuite à l'arrêt de la pompe. Quand l'eau s'arrête de s'écouler par-dessus la crête du déversoir à expérimenter en prend la lecture sur les piézomètres pour connaître le niveau du seuil.

Après cette étape, en fait fonctionné la pompe à un débit donné par manipulation de la vanne, après quelques minutes l'écoulement se stabilise, ainsi on procède à la lecture des profondeurs d'eau et du débit. Cette opération se répète chaque fois qu'en modifie le débit par manipulation de la vanne. On obtient ainsi, une série de couple des valeurs des débits et des profondeurs d'eau correspondantes. Ce mode opératoire est appliqué pour chaque modèle testé.

Chapitre II

Résultats expérimentaux

CHAPITRE II

Résultats expérimentaux

II.1 Introduction

L'expérimentation sur modèle réduits est sanctionnée par des résultats qui nécessitent une interprétation des essais effectués sur les différents modèles testés. Ces résultats sont exprimé soit par le débit en fonction de la charge totale sur le déversoir $Q=f(h^*)$ ou par le coefficient de débit en fonction de la charge relative $C_w=f(h^*/P)$ ou par la performance en fonction de la charge relative $q^*=f(h^*/P)$ ou par la charge relative amont en fonction de la charge relative aval $H^*/H_0=f(H_d/H_0)$.

II.2 Interprétation et discussion des résultats expérimentaux réalisés dans des conditions d'écoulement libre

Étant donné que la présente étude s'intéresse se propose d'étudier l'écoulement sur le PK-Weir dans des conditions noyée et dénoyée, ainsi, les essais effectués sur les différents modèles ont été réalisés en deux phases la première avec des conditions d'écoulement libre et la seconde phase avec des conditions d'écoulement noyé.

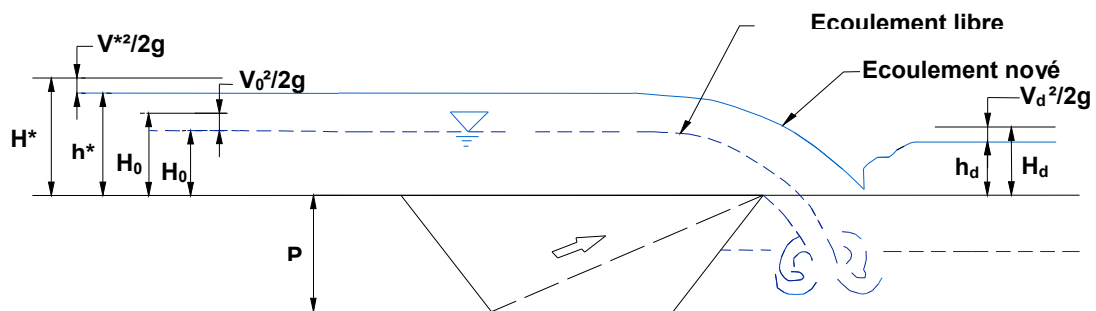


Figure II.01 : Définition des paramètres du déversoir à écoulement libre et noyé

1- Condition d'écoulement noyé

- H^* est la charge total amont;
- h^* est la charge piézométrique amont.
- H_d charge total aval;
- h_d la charge piézométrique aval.

2- Conditions d'écoulement libre

- H_0 est la charge total amont;
- h_0 est la charge piézométrique amont.

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

La charge totale sur le déversoir H^* (en écoulement noyé) et H_0 (en écoulement dénoyé) correspond à la somme de la charge piézométrique h^* ou h_0 et la charge cinétique h_c

$$H^* = h^* + h_c \quad , \quad H_0 = h_0 + h_c \quad (\text{II.01})$$

Ou :

- H^* : Charge totale sur le seuil du déversoir dans les conditions noyées (m) ;
- h^* : Charge piézométrique mesurée dans les conditions noyées (m) ;
- h_c : Charge cinétique (m).

$$h_c = \frac{Q^2}{2gA^2} = \frac{Q^2}{2g(l(P + h^*))^2} \quad (\text{II.02})$$

Ou :

- Q : Débit mesuré (m^3/s) ;
- A : Section de l'écoulement dans le bassin de simulation (m^2) ;
- l : Largeur du bassin de simulation (m) ;
- P : Hauteur du déversoir (m) ;
- h^* : Profondeur d'eau sur le seuil du déversoir mesurée à deux mètres en amont du seuil (m) .

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

$$C_w = \frac{Q}{W_t \sqrt{2gH^{*3/2}}} \quad (\text{II.03})$$

Ou :

- C_w : Coefficient de débit du déversoir testé ;
- W_t : Largeur totale du déversoir (m) ;
- H^* : Charge totale sur le seuil du déversoir (m) .

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.

$$q = \frac{Q_{P.K.Weir}}{Q_{cr}} \quad (\text{II.04})$$

Ou :

- q : Performance du déversoir expérimenté (PK-Weir) ;
- $Q_{P.K.Weir}$: Débit mesuré du PK-Weir (m^3/s) ;

- Q_{cr} : Débit calculé pour un déversoir rectiligne à mince paroi (m^3/s) .

Le débit qui transite par le déversoir rectiligne à paroi mince est déterminé par la relation :

$$Q_{cr} = \mu L \sqrt{2gH}^{3/2} \quad (II.05)$$

Ou :

- μ : Coefficient de débit d'un déversoir standard de type Creager ($\mu=0.49$) ;
- L : Largeur du déversoir ($L=W$) (m) ;
- H^* : Charge totale sur le déversoir (m).

II.2.1 Effet de l'emplacement du déversoir

Le déversoir en labyrinthe et le PK-Weir jouent le rôle d'organe de contrôle et d'évacuation des débits dans les rivières, les fleuves, à l'entrée des canaux des évacuateurs de crues des barrages en terre et même sur les sommets des barrages en béton. Ceci fait que l'emplacement du déversoir soit différent, pour les trois premiers cas le déversoir est installé directement sur le radier, cependant pour le dernier cas (cas de barrage déversoir) le déversoir est installé sur la partie supérieure du barrage qui joue le rôle de socle en béton. Pour étudier l'effet de ces deux types d'emplacement, deux types d'installation de déversoir non rectiligne ont été étudiés. Le premier correspond à l'emplacement du déversoir sur le radier du canal expérimental et le second sur un socle en béton pour simuler un écoulement en chute. Ces deux types d'emplacement ont été réalisés pour trois modèles expérimentales (PK-Weir type A1m, PK-Weir type A et le déversoir en labyrinthe).

A- PK-Weir type A1m

L'expérimentation réalisée sur les deux cas d'emplacement (sur radier du canal et sur socle) de PK-Weir type A1m (avec porte-à-faux continu jusqu'à la base) a montré que l'emplacement du déversoir peut avoir un effet sur la performance hydraulique. La figure II.04 qui représente le coefficient de débit en fonction de la charge relative fait apparaître une différence entre les deux courbes correspondant aux deux cas d'emplacement.



Figure II.02 : Modèle A1m sans socle



Figure II.03 : Modèle A1m sur socle

La différence entre les deux courbes est presque constante pour les différentes valeurs de la charge relative H^*/P . La comparaison du coefficient de débit pour les deux cas d'installation montre que les valeurs du coefficient de débit correspondant au déversoir sans socle sont largement supérieures aux valeurs obtenues pour le déversoir sur socle.

La différence est de l'ordre de 9% pour $H^*/P=0.1$ et 7% pour les moyennes charges relatives $H^*/P=0.3$.

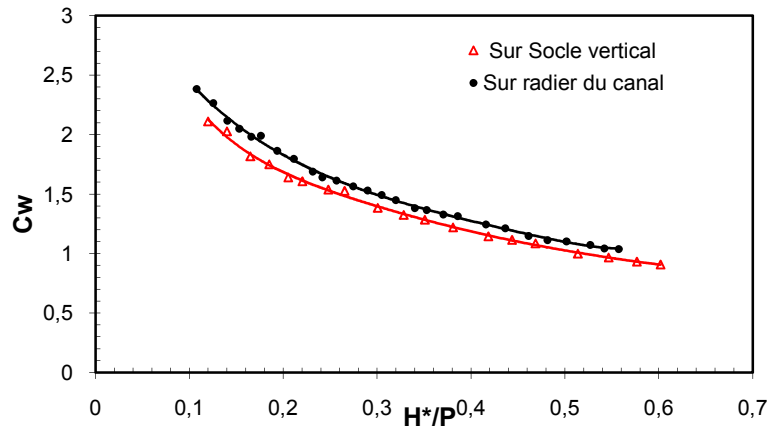


Figure II.04 : Coefficient de débit en fonction de la position du déversoir (PK-Weir A1m)

Les résultats obtenus sur le modèle A1m pour les deux conditions d'emplacement, montre que l'emplacement du déversoir peut engendrer une influence sur l'écoulement qui se manifeste par une perte de performance pour le cas d'emplacement sur socle. Ceci peut être justifié par le fait que pour le cas sans socle les filets liquide du fond à l'amont du déversoir se dirigent directement vers les alvéoles amont, tandis que pour le cas avec socle les filets liquide du fond butent sur le socle avant de se diriger vers le haut pour pénétrer dans les alvéoles amont.

B-PK-Weir type A

Le second modèle testé correspond au PK-Weir type A, qui est caractérisé par des porte-à-faux en amont et en aval qui occuper seulement une partie de la hauteur du déversoir.

Les résultats obtenus sur le modèle PK-Weir type A montrent aussi que la position d'emplacement a un effet sur la performance de ce type de déversoir.



Figure II.05 : PK-Weir sur socle arrondi en amont. Figure II.06 : PK-Weir placé sur le radier du canal

On peut remarquer que le modèle sans socle représente la variante la plus performante des deux emplacements. La performance du modèle A installé directement sur le radier du canal est d'environ 21% plus grande que celle du modèle A sur socle pour des charges relatives H^*/P inférieures à 0.35 et de l'ordre de 10% pour des charges relatives H^*/P supérieures à 0.35 (figure II.07).

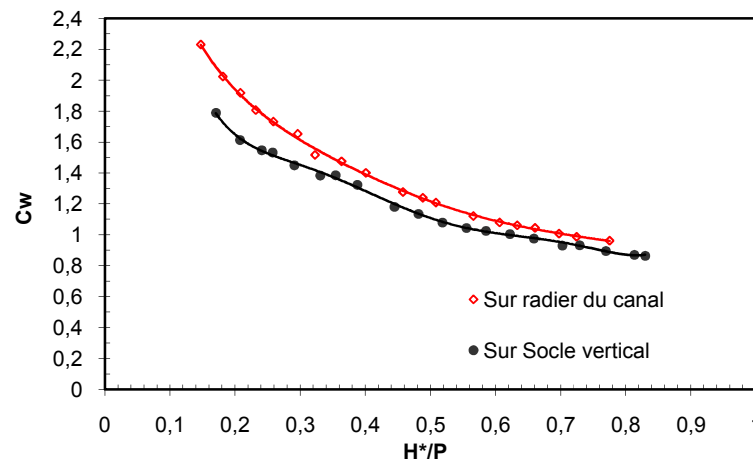


Figure II.07 : Coefficients de débit du PK-Weir type A en fonction de l'emplacement

C-Labyrinthe arrondi

Le troisième modèle expérimenté correspond au déversoir en labyrinthe arrondi type D qui se caractérise par des parois verticales et une face amont arrondie.



Figure II.08 : Emplacement sur radier du canal. Figure II.09 : Emplacement sur socle arrondi en amont

La représentation graphique des résultats des essais a montré que l'emplacement du déversoir en labyrinthe sur socle engendre une perte de performance de l'ordre de 9% pour des charges relatives H^*/P inférieures à 0.40 et de l'ordre de 3% pour des charges relatives H^*/P supérieures à 0.40 (figure II.10).

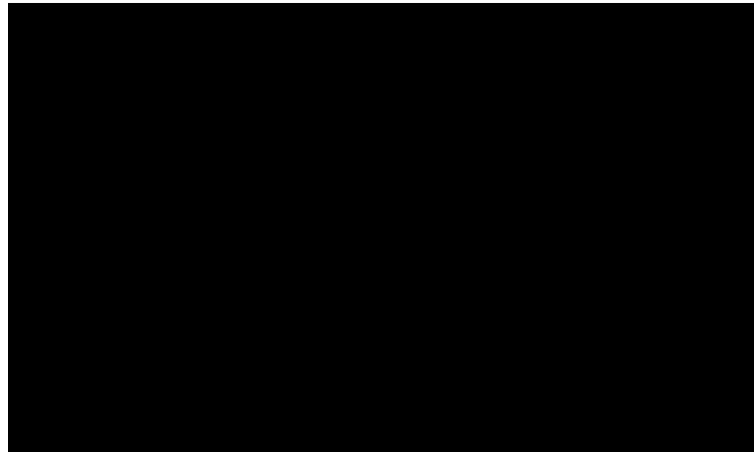


Figure II.10 : Coefficients de débit du labyrinthe arrondi en amont en fonction de l'emplacement. Ces résultats montrent que l'emplacement du déversoir dans un canal (ou le niveau du radier du canal aval est égal au niveau du radier amont) permet d'avoir un meilleur rendement. Cela peut être expliqué par l'écoulement au pied amont du déversoir qui est dirigé directement vers les alvéoles amont pour le cas d'emplacement dans un canal, tandis que le cas avec socle montre un écoulement qui transite par le fond et se dirige vers le haut du socle pour atteindre finalement les alvéoles amont du déversoir,

II.2.2 Effet de la forme d'entrée au pied du déversoir

La géométrie de l'entrée au dessous du déversoir peut prendre plusieurs formes. Pour vérifier l'incidence de ce paramètre, trois configurations de parement ont été testées

- Socles à parement amont arrondi ;
- Socles à parement amont incliné ;
- Socles à parement amont vertical.

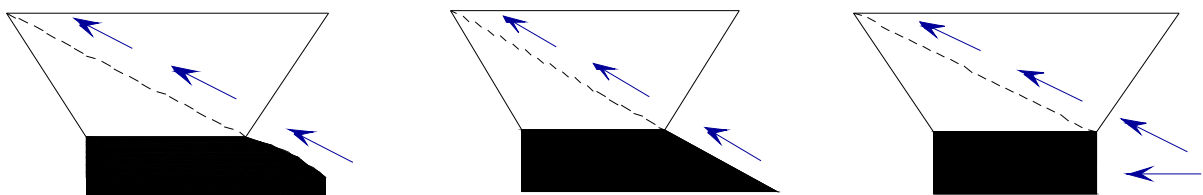


Figure II.11 : a- Socle à parement arrondi. b- Socle à parement incliné. c- Socle à parement vertical. Les résultats expérimentaux obtenus sur ces trois modèles montrent que les différentes courbes (dont chacune correspond à une forme d'entrée au pied amont du déversoir) sont presque les mêmes (figure II.12), un faible écart est constaté entre la courbe qui correspond au socle à parement amont incliné et les deux autres forme de parement. Ainsi on peut dire que la forme d'entrée au pied amont du déversoir n'influe que faiblement sur la performance du PK-Weir.

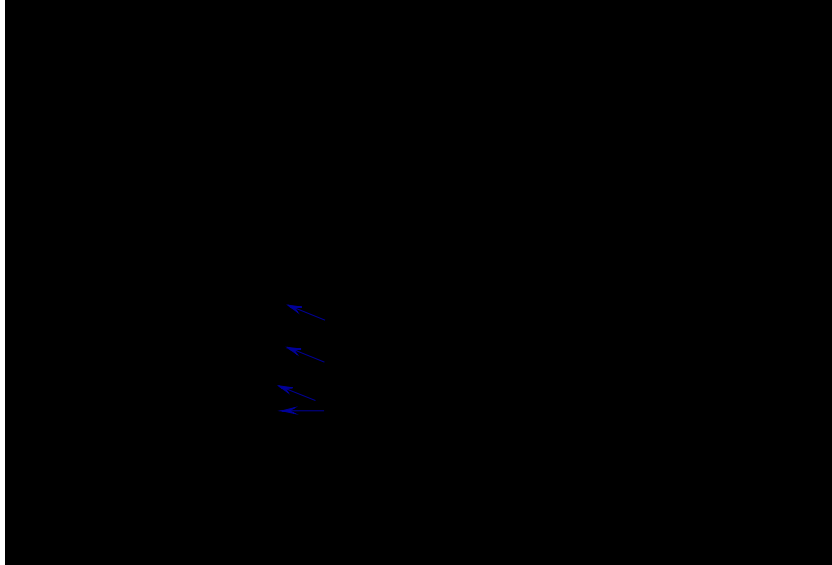


Figure. II.12 : Coefficients de débit en fonction de la forme amont du Socle. (Modèle A1m).

De point de vue pratique il est donc recommandé d'utiliser une forme d'entrée vertical au pied amont du déversoir, puisque cette forme est plus économique et sa performance n'est réduite que faiblement.

II.2.3 Effet de la forme du radier des alvéoles de sortie et d'entrée

Généralement, les déversoirs en PK-Weir et en labyrinthe sont conçus avec des murs de hauteur qui varie de 3 à 15m avec une épaisseur qui est de l'ordre du douzième de la hauteur des murs (P/12). Cette disposition verticale exige pour les grandes hauteurs des murs un béton armé fortement ferrailés pour mieux résister à la pression de l'eau le long des murs, ceci rend le coût de réalisation relativement élevé.

La solution qui permet de réduire le coût de cet ouvrage consiste à réduire la hauteur de la partie libre des murs tout en gardant la même hauteur du déversoir. Ceci peut être possible par le remplissage des alvéoles amont ou aval ou les deux à la fois par de béton sous forme d'un radier incliné ou en marches d'escalier. Cette disposition implique une réduction de la partie libre des parois et par conséquent le ferrailage ne concerne qu'une petite partie des murs.

La solution qui consiste à réaliser un radier en marches d'escalier à l'intérieur des alvéoles aval permet d'un côté de dissiper une partie de l'énergie et de l'autre côté elle permet de réduire la quantité d'acier du béton. Cette solution peut avoir des effets sur le rendement hydraulique du déversoir en PK-Weir et labyrinthe.

Ainsi, il est recommandé que la conception du radier aval en marche d'escalier ne peut être envisagée que dans le cas où la hauteur du déversoir est importante. Cette disposition du

radier des alvéoles aval (en marches d'escalier) peut être avantageuse pour les barrages en béton compacté au rouleau (BCR), en optant pour la construction du déversoir sur le sommet du barrage et en concevant le parement aval en gradin.

II.2.3.1 Effet de la forme de radier des alvéoles de sortie

a- Cas du PK-Weir type Alm

Le remplissage des alvéoles aval peut ne pas affecter la performance tant que le taux de remplissage ne dépasse pas une certaine valeur. Pour déterminer la limite de remplissage sans effet sur la performance, trois cas de remplissage ont été étudiés, le premier avec une marche de hauteur 8cm soit $2/5$ de la hauteur du déversoir et le second avec deux marches de hauteur 8 et 3cm, soit $(3/5)$ et le dernier avec deux marches de hauteur 8 et 6cm, soit $(3,5/5)$.



Figure II.13 : Avec une marche de hauteur $2P/5$. Figure II.14 : Avec hauteur de remplissage $3,5P/5$



Figure II.15 : Avec hauteur de remplissage $3P/5$

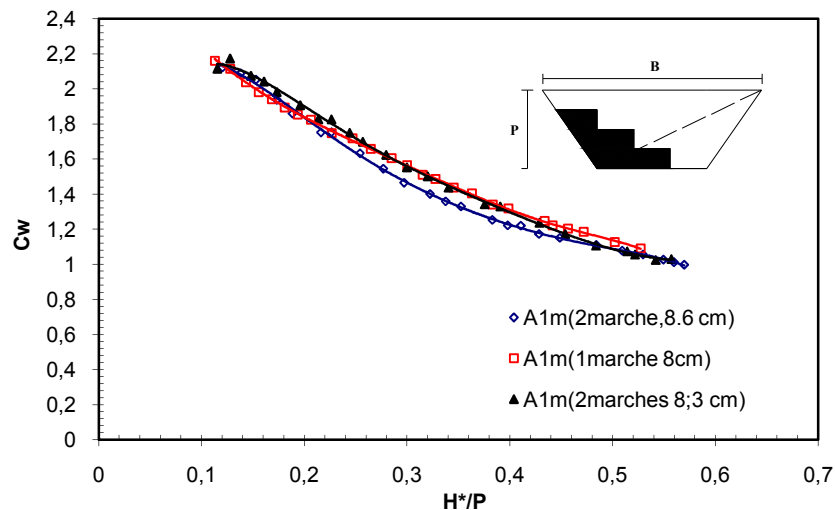


Figure II.16 : Coefficients de débit du modèle A1m en fonction du nombre et de la hauteur des marches

Le graphique II.16 qui représente le coefficient de débit C_w en fonction de la charge relative H^*/P , montre que le modèle A1m avec une seule marche de 8cm et deux marches de 8 et 3cm de haut dans l'alvéole aval se caractérise par un rendement semblable au modèle A1m avec des alvéoles aval sans marches d'escalier. Cependant le modèle A1m avec deux marches de hauteur 8 et 6 cm représente un rendement plus faible que celui des deux autres cas cités précédemment. Ces résultats montrent que le remplissage des alvéoles aval sous forme de marche d'escalier n'affecte pas la performance tant que la hauteur des marches ne dépasse pas 50% de la hauteur des alvéoles (figure II.16).

b- Cas du labyrinthe arrondi

Pour le cas du labyrinthe arrondi en amont deux cas ont été testés, le premier sans aucun remplissage et le second avec un taux de remplissage de 2/3 de la hauteur du déversoir.

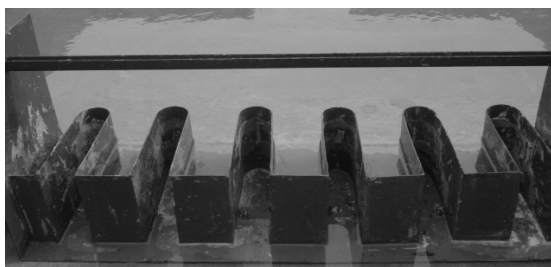


Figure II.17 : Sans marche dans les alvéoles aval



Figure II.18 : Avec deux marches de hauteur 5cm chacune.

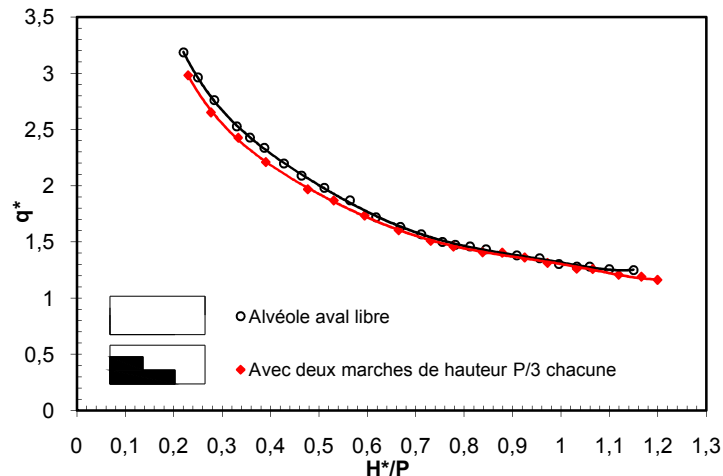


Figure II.19: Performance du labyrinthe arrondi en amont en fonction de l'encombrement de l'alvéole aval

La représentation graphique (Figure II.19) de la performance du modèle du déversoir en labyrinthe arrondi en amont en fonction de l'encombrement de l'alvéole aval (avec 2 marches et sans marche) montre que la conception du radier aval sous forme d'escalier n'a pas d'effet sur la performance, mieux encore il a été constaté que pour les faibles et moyennes charges relatives une faible amélioration de la performance est constatée. Cette amélioration est de l'ordre de 04%.

Ces résultats montrent aussi que la conception du radier des alvéoles aval en marches d'escalier n'affecte pas la performance tant que la hauteur des marches ne dépasse pas 2/3 de la hauteur du déversoir.

II.2.3.2 Effet de la forme de radier des alvéoles d'entrée

L'écoulement dans les alvéoles d'entrée du déversoir peut être stable ou perturbé selon la conception du radier. Dans cette étude deux type de conception de radier ont été considéré, le premier avec un radier horizontale et le second cas avec un radier incliné de la base jusqu'au sommet.



Figure II.20 : Socles arrondi en amont avec radier des alvéoles amont horizontal.



Figure II.21 : Socles arrondi en amont avec radier des alvéoles amont incliné.

Les graphiques (Figure II.22 et Figure II.23) qui représentent le coefficient de débit en fonction de la charge relative et les courbes de débit en fonction de la charge montre que les valeurs des coefficients de débit et les valeurs des débits du déversoir avec radier horizontal sont largement supérieures aux valeurs correspondant au modèle avec radier incliné.

Les courbes de débit de la figure (II.22) montrent que le modèle sur socle arrondi en amont avec un radier des alvéoles amont horizontal se caractérise par un rendement plus grand que le modèle sur socle arrondi en amont avec un radier des alvéoles amont incliné. Cette amélioration de la capacité d'évacuation est en moyenne de 08% pour les petites et les moyennes charges.

La figure (II.23) qui représente les coefficients des débits montre que la conception d'une meilleure forme hydraulique (modèle D avec radier des alvéoles amont horizontal), augmenterait le rendement du PK-Weir d'environ 08% pour des charges relatives $H^*/P < 0.7$ par rapport le modèle D (avec radier des alvéoles amont incliné).

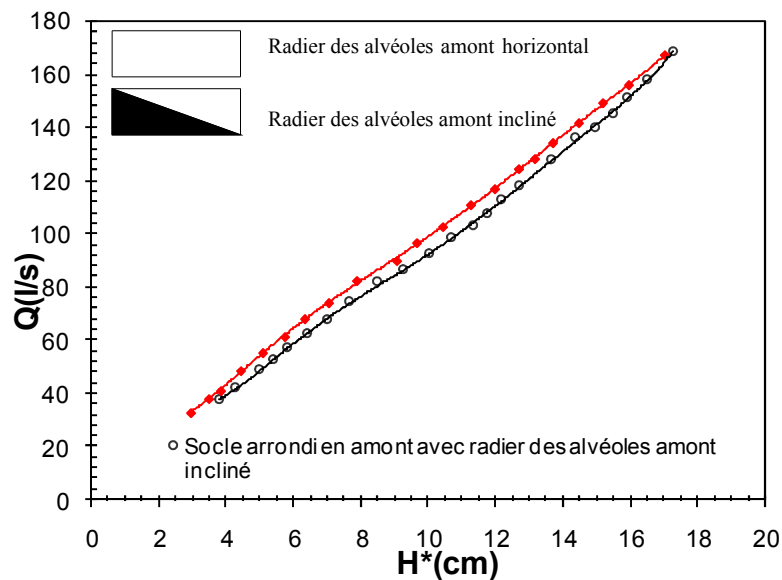


Figure II.22 : Courbes de débit du labyrinthe arrondi en fonction de la forme du radier des alvéoles amont.

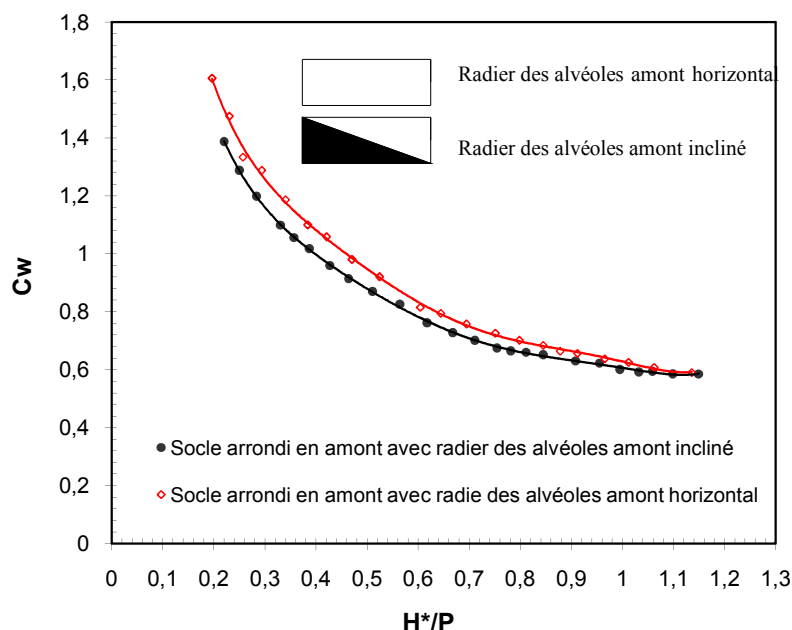


Figure II.23 : Coefficient de débit du labyrinth arrondi en fonction de la forme du radier des alvéoles amont.

II.2.3.3 Effet de l'importance de l'inclinaison du radier amont



Figure II.24 : Radier sur toute la hauteur de l'alvéole amont.



Figure II.25 : Radier sur les 2/3 de la hauteur de l'alvéole amont.

Pour étudier l'influence de l'inclinaison du radier amont, il était nécessaire deux cas de l'inclinaison du radier amont, le premier cas avec un radier amont incliné sur toute la hauteur du déversoir et le second cas se caractérise par un radier incliné sur les deux tiers de la hauteur.

Les résultats obtenus sur deux modèles, ont été représentés sur le graphique (II.26) qui représente le coefficient de débit en fonction de la charge relative montre que le déversoir avec radier incliné sur les deux tiers de la hauteur des alvéoles amont est plus rentable que

celui avec radier incliné sur toute la hauteur. L'écart entre les valeurs des deux dispositions décroît avec l'augmentation de la charge relative H^*/P , pour une charge relative $H^*/P=0.3$ l'écart est de 11%, pour $H^*/P= 0.5$, l'écart diminue à 05% et pour une valeur de $H^*/P=0.7$ la différence entre les deux courbes est de 03%. Ceci renforce le résultat obtenu précédemment sur le modèle avec radier horizontal. Cependant la différence entre les deux derniers cas ne permet pas de trancher sur la question du meilleur choix, ainsi le paramètre économique décidera du choix définitif.

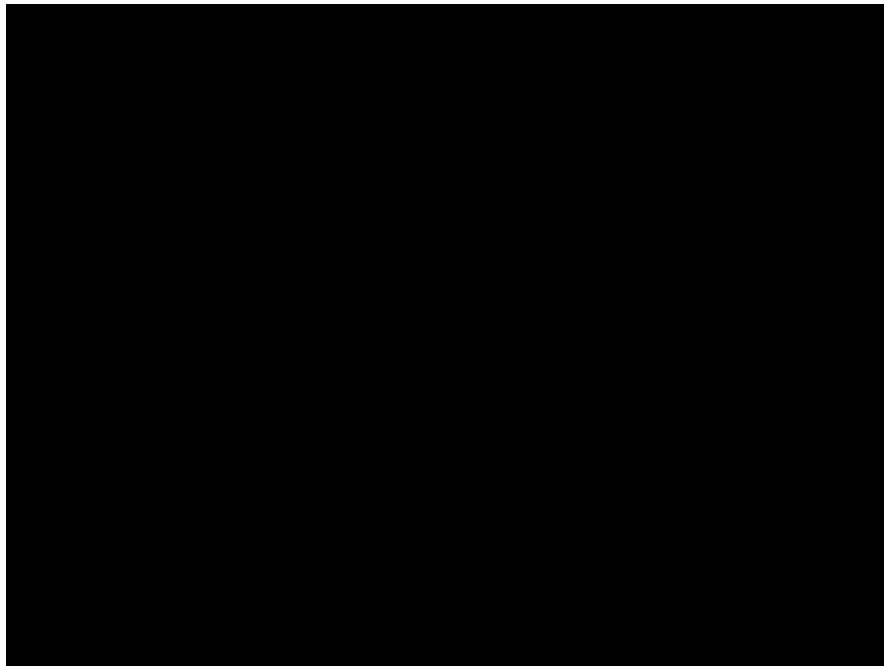
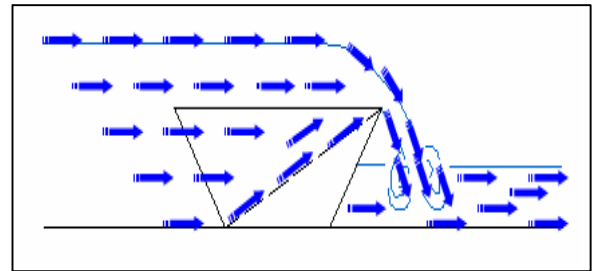
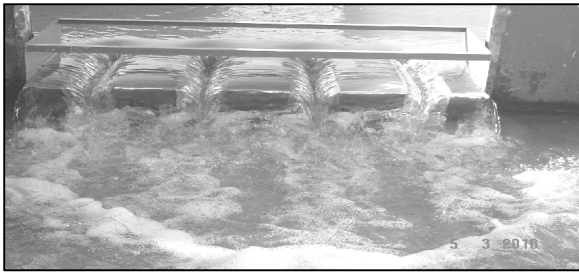


Figure II.26 : Coefficient de débit du labyrinthe arrondi amont sur socle en fonction de l'inclinaison du radier des alvéoles amont.

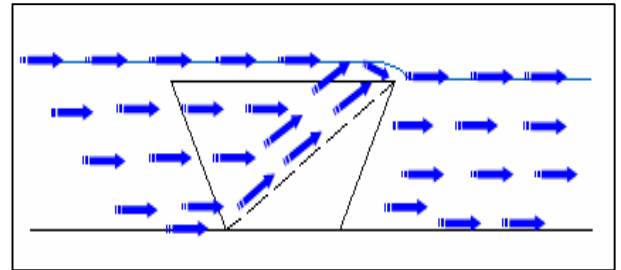
II.3 Interprétation et discussion des résultats expérimentaux réalisés dans des conditions d'écoulement noyé

Souvent, les déversoirs sont conçus pour fonctionner dans des conditions d'écoulement libre, ceci signifie que la surface du niveau d'eau aval est au-dessous de la crête de déversoir. Lorsque le niveau d'eau à l'aval dépasse le niveau de la crête, le déversoir n'est plus dans des conditions d'écoulement libre mais plutôt noyées.

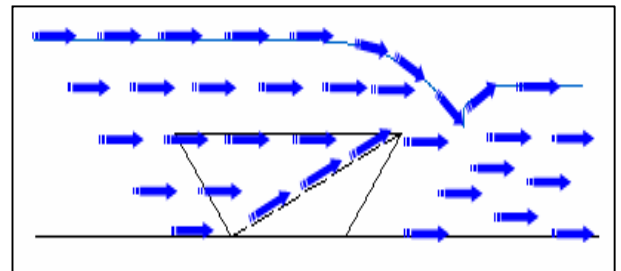
Dans le cas d'un déversoir installé dans un canal d'irrigation ou à travers un cours d'eau naturel et qui fonctionne dans des conditions d'écoulement noyé, une plus haute charge amont est exigée pour faire passer un débit égal au débit évacué dans des conditions d'écoulement libre. Dans le cas où la partie en amont du déversoir est suffisamment large par rapport à la largeur du déversoir ce qui engendre la formation d'un réservoir de stockage amont, la noyade aval causera une diminution du débit déversé (Tullis 2006).



a- Phase d'écoulement libre



b- Phase de transition (le niveau d'eau aval = le niveau de la crête)



c- Phase d'écoulement noyé

Figure II.27 : Différentes phases de l'écoulement sur le PK-Weir

Le fonctionnement du PK-Weir dans des conditions d'écoulement noyé n'a fait l'objet d'aucune étude qui peut être citée à l'exception d'un projet de fin d'étude réalisé en 2008 à l'université de Biskra. Cependant, le PK-Weir représente une alternative économique et efficace de point de vue hydraulique s'il est conçu dans les cours d'eau naturel et artificiel ou les conditions d'écoulement noyé sont très fréquentes.

Pour vérifier l'effet de la noyade sur le fonctionnement du PK-Weir plusieurs cas ont été considérés, selon l'encombrement dans les alvéoles de sortie, l'importance du débit évacué, le type d'obstacle en aval du déversoir (Vanne ou Seuil libre), le ratio L/W du déversoir et la contraction latérale.

II.3.1 Effet de la forme du radier aval (encombrement aval)

Souvent, les alvéoles aval sont conçus avec un radier horizontal, cependant, il est possible de les concevoir avec un radier sous forme de marches d'escalier. Ce type de conception du radier des alvéoles aval peut avoir un intérêt de point de vue, économique (réduction de l'acier de ferrailage du béton puisque la partie libre des murs latéraux devient minimale) et participe à la dissipation d'énergie.

Afin de vérifier l'effet de cette disposition de radier dans des conditions d'écoulement noyé des essais ont été effectués en utilisant trois taux de remplissage des alvéoles aval. Les résultats de ces essais obtenus ont montré que l'encombrement des alvéoles aval n'a pas de conséquence sur la noyade. La figure (II.28) montre que quelque soit la disposition du radier des alvéoles aval l'évolution de la charge amont par rapport à la charge aval reste la même.

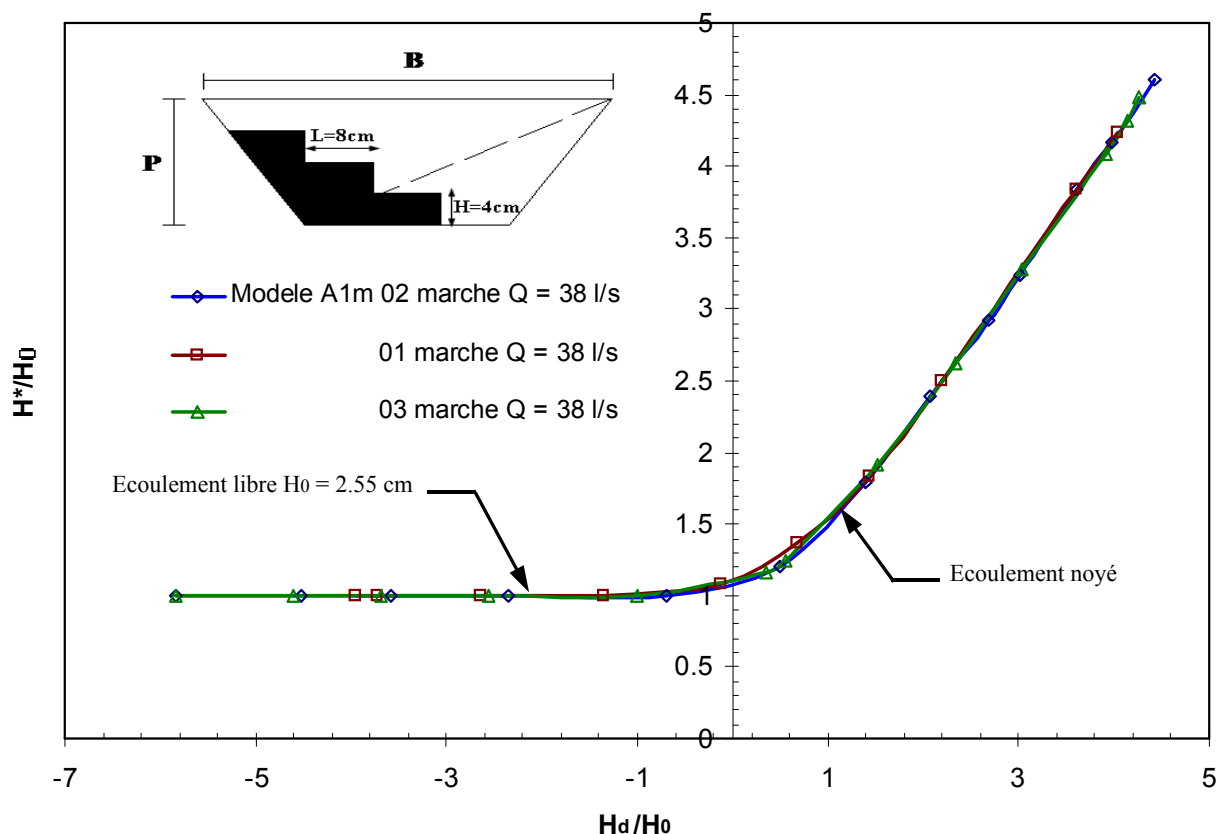


Figure II.28 : Courbes de la charge relative amont en fonction de la charge relative aval

II.3.2 Effet du débit de transit sur la noyade

L'importance de débit qui transite par le PK-Weir peut-il changer les conditions de l'écoulement noyé ? Afin de répondre à cette question, des essais ont été réalisés pour trois valeurs fixes de débit ($Q=38$ l/s, 60 l/s et 80 l/s), on fait varier seulement le niveau d'eau aval pour voir son effet sur le niveau d'eau amont. Les résultats obtenus ont fait remarquer que la

variation du niveau amont par rapport au niveau aval se fait d'une manière proportionnelle et constante pour les trois débits choisis, ainsi on peut dire que la variation de la charge relative aval par rapport à la charge relative amont est indépendante du débit de transit sur le PK-Weir (Figure II.29).

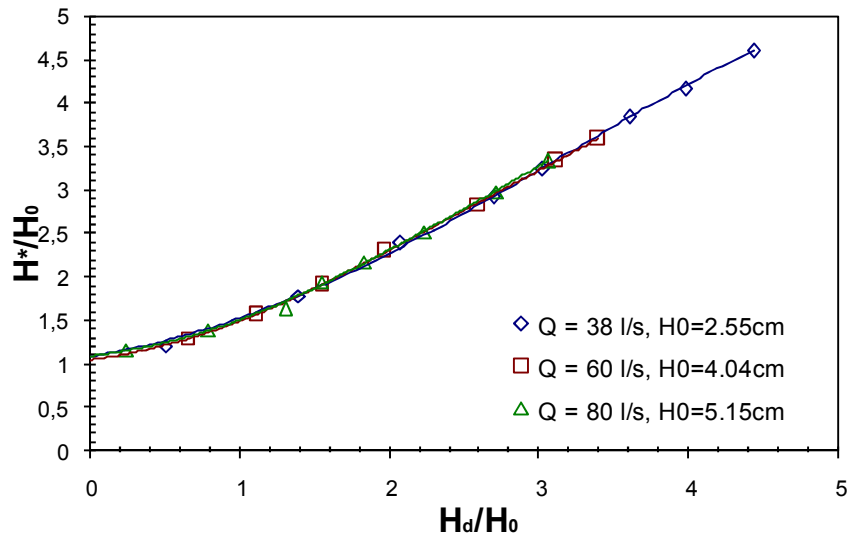
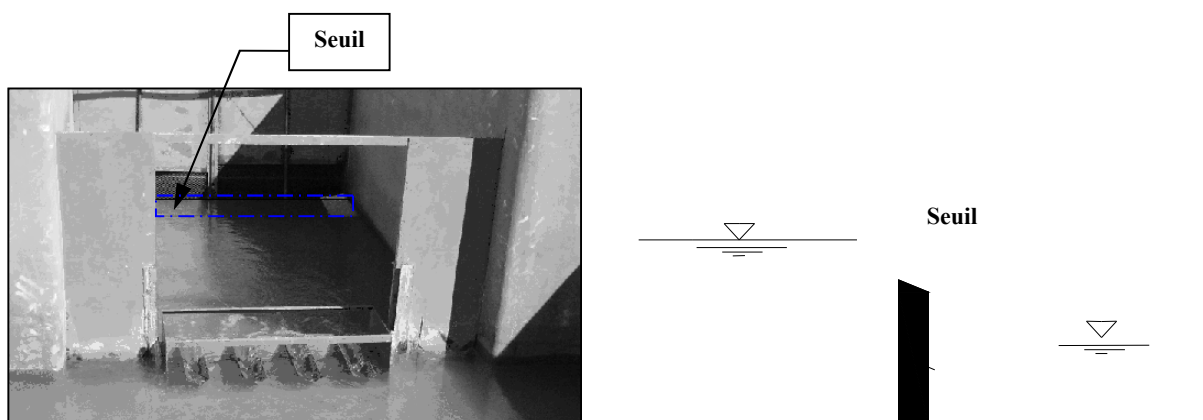


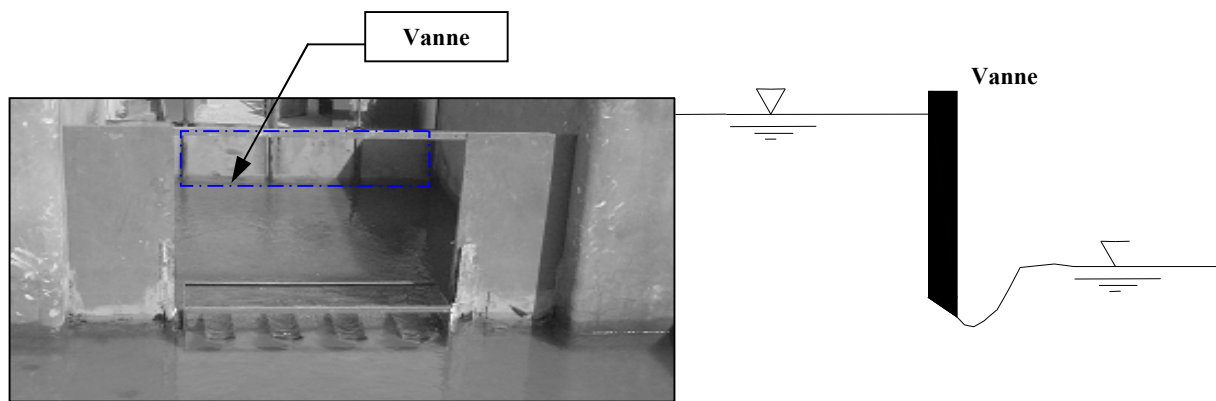
Figure II.29 : Courbes de la charge relative amont en fonction de la charge relative aval

II.3.3 Effet du type d'obstacle en aval du déversoir

La surélévation du plan d'eau aval peut avoir lieu en cas de présence d'obstacle en aval du déversoir, ainsi, deux cas peuvent être considérés, le premier se rapporte à la présence d'un seuil inséré dans le canal de restitution en aval du PK-Weir (ou l'écoulement est à surface libre). Le second type d'obstacle installé dans le canal de restitution se caractérise par un écoulement sous vanne de fond.



a- Ecoulement sur seuil aval



b- Ecoulement sous une vanne

Figure II.30 : Différents cas d'obstacle en aval du PK-Weir

Les essais effectués dans ces deux conditions aval ont fait apparaître que l'écoulement sur seuil aval ou sous une vanne a le même effet sur l'écoulement par-dessus le PK-Weir. La Figure (II.31) montre que pour un même débit de transit, les deux courbes adimensionnelles qui représentent la charge relative amont en fonction de la charge relative aval pour les deux conditions aval sont semblables.

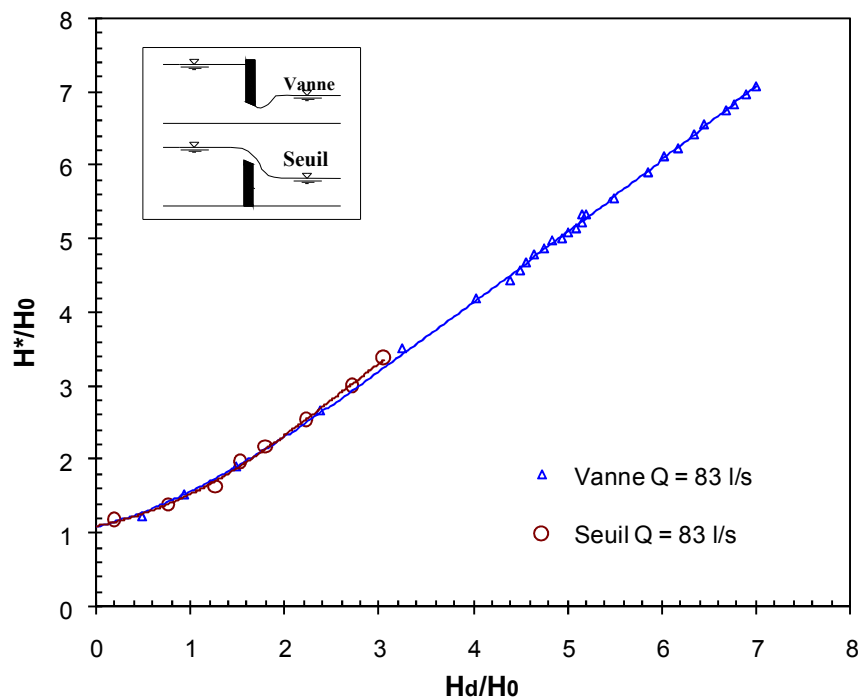


Figure II.31 : Courbes de la charge relative amont en fonction de la charge relative aval

II.3.4 Effet du ratio L/W

Le PK-Weir comme le déversoir en labyrinthe, il se caractérise par le ratio L/W qui représente le paramètre géométrique le plus important de point de vue performance hydraulique. Ainsi, il est important de vérifier l'effet de ce paramètre sur la noyade du PK-Weir. Pour se faire, des essais ont été effectués sur deux modèles de ratio différent $L/W= 3,85$ et $L/W= 5$. Les résultats des essais sur ces deux modèles A1m et A2m ont montré que la noyade est indépendante du ratio L/W . La figure (II.32) montre que pour un débit donné l'évolution de la charge amont par rapport à la charge aval est la même, ceci se justifie par l'obtention d'une courbe unique pour les deux ratios L/W des déversoirs expérimentés.

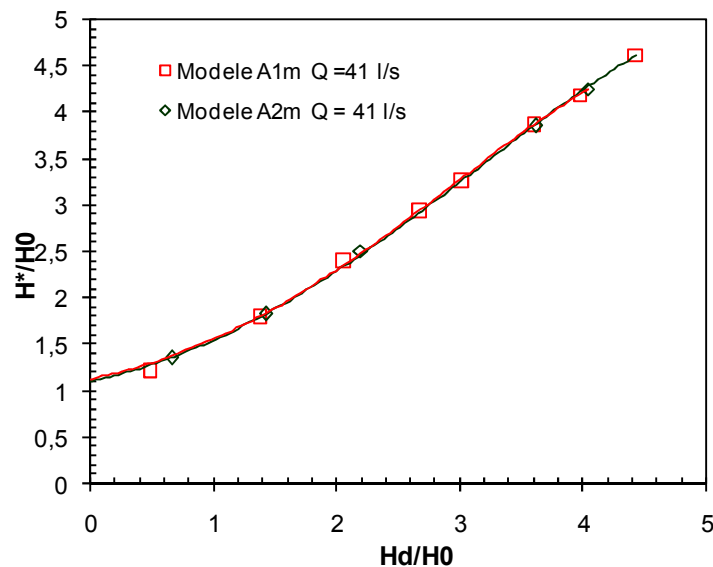


Figure II.32 : Courbes de la charge relative amont en fonction de la charge relative aval

II.3.5 Effet de la contraction latérale

Le déversoir en PK-Weir peut être réalisé dans un canal de même largeur que l'emprise du déversoir ou sur le contour d'une retenue ce qui engendre une largeur amplement supérieure à la largeur du déversoir. Selon la bibliographie, la noyade provoque la surélévation du plan d'eau amont dans le cas d'un canal de même largeur que l'emprise du déversoir et conduit à une réduction du débit dans le cas d'une retenue étendue. Ces deux cas peuvent être exprimés par le rapport entre la largeur de l'emprise du déversoir et la largeur du canal d'amenée. Pour le premier cas (Cas d'un canal), le déversoir est considéré sans contraction latérale $W=W_c$ et pour le second (Cas d'une retenue), avec contraction latérale $W < W_c$. L'écoulement dans ces deux situations est considéré différent dans la condition d'écoulement dénoyé (libre).

Dans le cas d'un déversoir sans contraction latérale, les filets liquides sont parallèles et l'alimentation du déversoir se fait frontalement par rapport à l'axe longitudinal du déversoir, dans ces conditions, si la noyade se manifeste, une surélévation du plan d'eau amont est enregistrée. Pour le déversoir avec contraction latérale, l'écoulement est frontal au centre et radial sur les cotés se qui engendre un étranglement au niveau de la section d'entrée du déversoir, Ceci conduit a une réduction du débit qui transite par le déversoir.

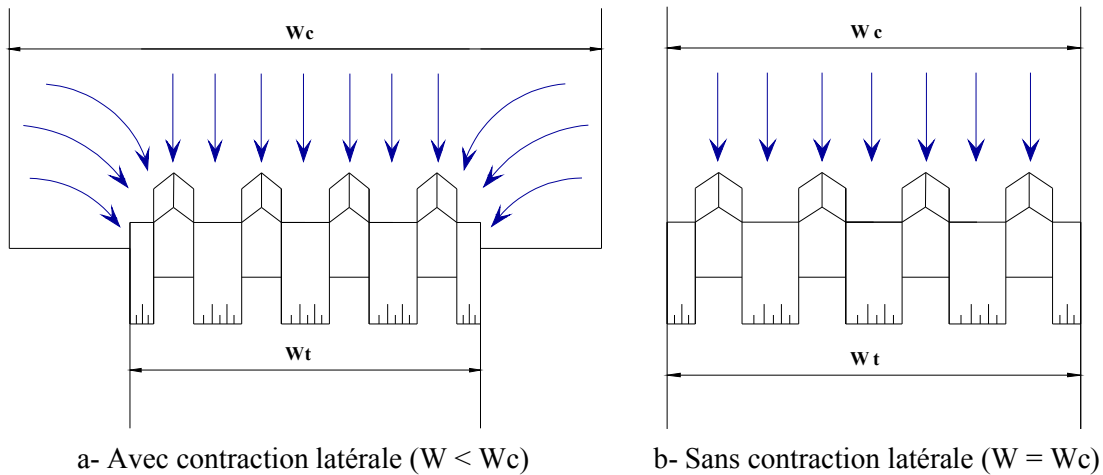
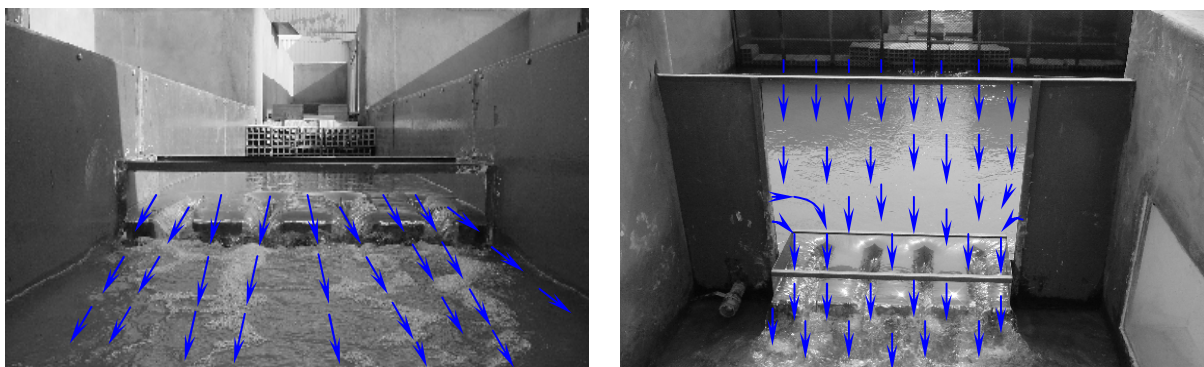


Figure II.33 : Schémas du déversoir en PK-Weir avec et sans contraction latérale

La vérification de l'effet de la contraction sur l'écoulement noyé a demandé des essais qui ont été réalisés sur deux modèles avec et sans contraction latérale, le premier type de disposition expérimental correspond à une largeur du canal d'amenée égale à la largeur du PK-Weir $W=W_c$ et la seconde disposition correspond à une largeur du canal d'amenée égal à quatre fois la largeur du déversoir $W_c=4W$.



a- Modèle de déversoir en PK-Weir sans contraction latérale ($W = W_c$)

b- Modèle de déversoir en PK-Weir avec contraction latérale ($W < W_c$)

Figure II.34 : Modèles de déversoir avec et sans contraction latérale

L'expérimentation réalisée sur ces deux types de disposition (avec contraction et sans contraction latérale) a montré que l'évolution du niveau d'eau amont en fonction du niveau aval est indépendante de la contraction latérale du déversoir en PK-Weir pour les deux cas étudiés.

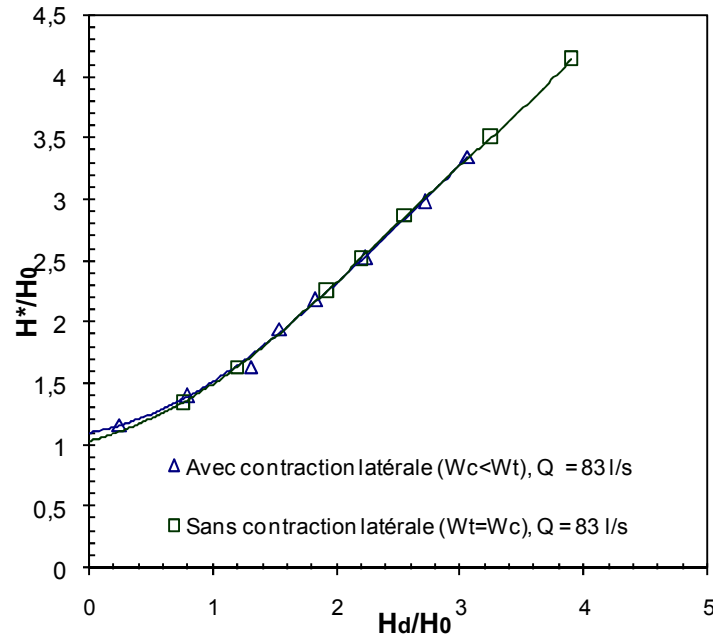


Figure II.35 : Courbes de la charge relative amont en fonction de la charge relative aval

Le graphique II.35 montre clairement que pour les deux types de contraction et pour un débit donné l'évolution de la charge amont par rapport à la charge aval est la même, ceci se justifie par l'obtention d'une seule courbe pour les deux cas de la contraction latérale.

II.3.6 Effet de la submersion sur le coefficient de débit

Le débit qui transite par un déversoir est souvent exprimé par le coefficient de débit qui représente l'efficacité d'un déversoir donné. L'effet de la submersion sur la capacité du PK-Weir peut être déterminé par la variation du coefficient de débit en fonction du taux de la submersion. Pour vérifier ceci, des essais dans des conditions noyées ont été effectués sur le modèle A1m pour une série de valeurs de débit fixées préalablement ($Q = 38$ l/s, 50 l/s, 60 l/s, 70 l/s, 80 l/s, 91 l/s, 100 l/s, 111 l/s et 122 l/s). Pour comparer les valeurs du coefficient de débit obtenues pour les différents taux de noyade, un essai dans des conditions d'écoulement libre a été réalisé pour des débits qui varient de 30 à 170 l/s.

Le graphique (II.36) donnant le coefficient de débit en fonction de la charge relative dans les conditions libres et noyées fait distinguer deux types de courbes, le premier correspond à un groupe de courbes dont chacune correspond à un débit donnée avec des charges amont qui varient en fonction du niveau aval et le second type de courbe correspond à la courbe qui

représente le coefficient de débit dans les conditions d'écoulement libre. Cette dernière courbe représente les valeurs maximales que peut avoir le coefficient de débit dans les conditions noyées. Elle peut être considérée comme une courbe enveloppe pour les différentes courbes de l'écoulement noyé, cette courbe représente aussi la limite entre l'écoulement libre et l'écoulement noyé.

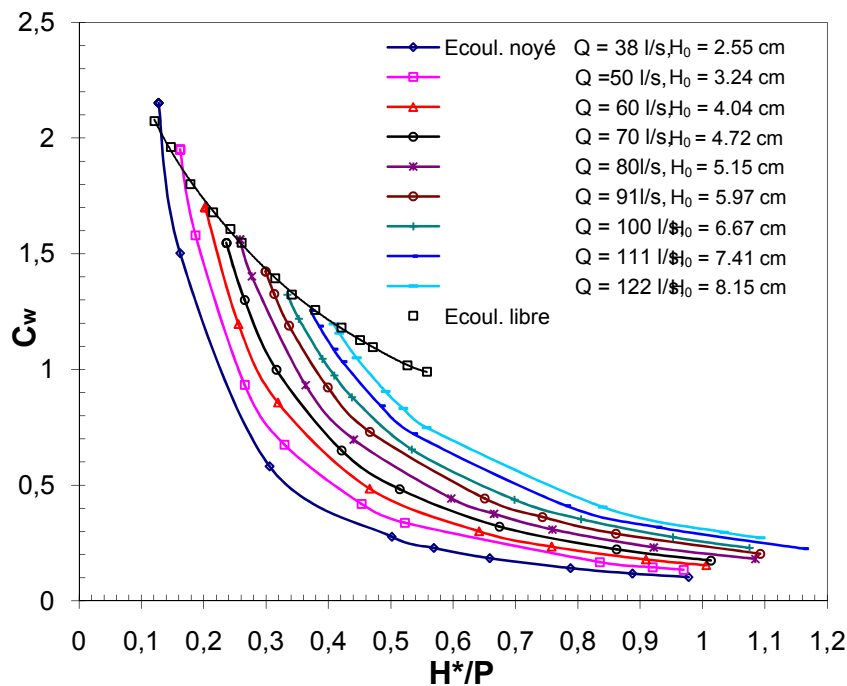


Figure II.36 : Effet de la submersion sur le coefficient de débit

Les essais ont montré aussi qu'en augmentant la profondeur d'eau aval, le déversoir devient noyé. Cette noyade se manifeste par un décroissement rapide du coefficient de débit pour les faibles valeurs de la charge relative amont H^*/P ($0.12 < H^*/P < 0.6$), ce décroissement perd de son importance à partir d'une valeur H^*/P d'environ 0,6 et les courbes de coefficient de débit deviennent plus aplaties.

Il est à remarquer que les courbes d'écoulement noyé sont disposées l'une après l'autre d'une façon ascendante du faible débit au grand débit. L'écart entre les différentes courbes est presque constant. Cet écart qui correspond à une augmentation de débit de l'ordre de 10 l/s engendre une augmentation du coefficient de débit de 0,1 pour les valeurs de $H^*/P < 0,6$.

Les résultats obtenus montrent aussi que pour les faibles débits l'influence du niveau aval sur l'amont est plus exprimée. Ceci dit que l'influence aval sur l'amont est plus rapide quand la charge amont est faible. La Figure (II.37) montre clairement ce qui a été dit précédemment, à titre indicatif, pour un débit de l'ordre de 38 l/s, et pour une variation de $H_d = 5$ cm, la variation de la charge amont est de 3.5 cm, tandis que pour un débit plus grand d'environ 122 l/s et avec

la même variation de H_d , la variation de la charge amont est de 1.5cm, soit 50% de la valeur correspondant au premier débit. Cette constatation n'est pas vraie pour les grandes charges ou la variation de la charge amont H^* et proportionnelle à la variation de la charge aval H_d .

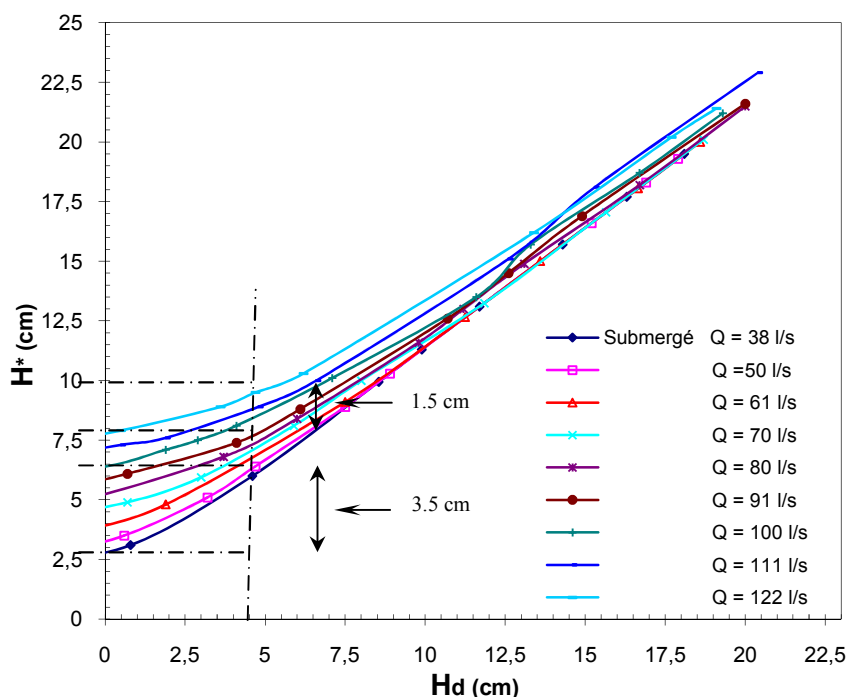


Figure II.37 : Variation de la profondeur d'eau amont en fonction de la surélévation du plan d'eau aval

Finalement, on peut dire que pour les faibles valeurs de H^*/P l'effet de la noyade est très important pour les faibles débits, cependant, il diminue progressivement avec l'augmentation de débit ce qui implique un accroissement de la charge amont H^* .

La figure II.38 qui exprime le coefficient du débit en fonction de la charge aval rapportée à la charge amont. (H_d/H^*) montre que pour les faibles valeurs de rapport de $H_d/H^* < 0.35$, le décroissement des valeurs de coefficients de débit est faible, par contre pour les valeurs de la charge relative aval $H_d/H^* > 0.35$, les courbes du coefficients des débits décroissent progressivement et l'écart entre les courbes diminue jusqu'à ce que les différentes courbes convergent et ont tendance de devenir une courbe unique pour une valeur de H_d/H^* proche de l'unité ($H_d/H^* = 1$).

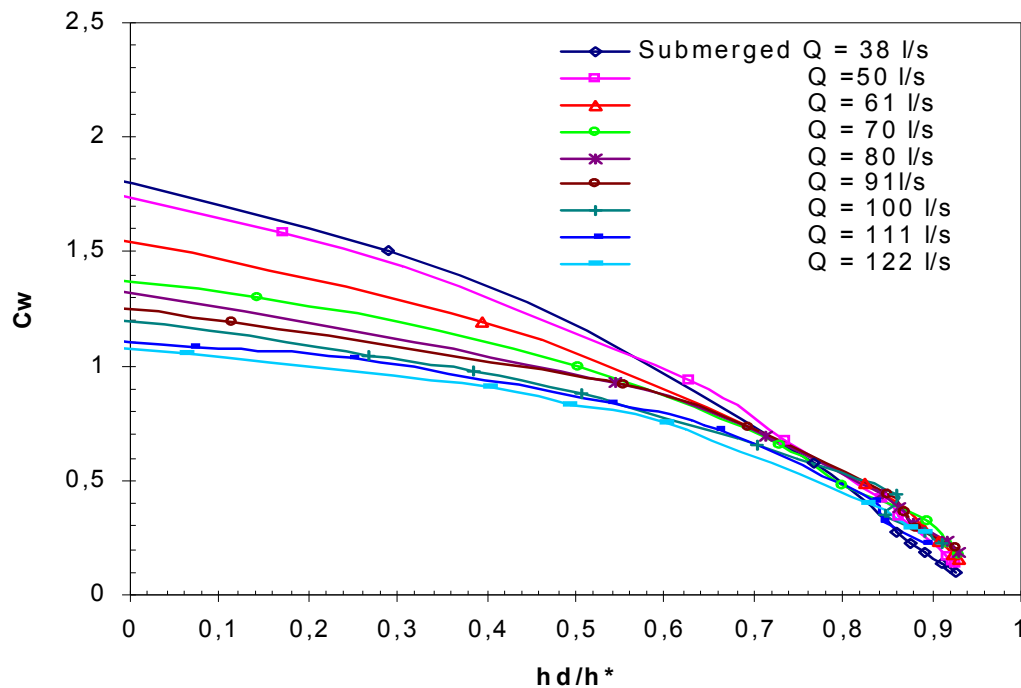


Figure II.38 : Variation du coefficient de débit en fonction de la charge relative aval

Ces résultats, indiquent que pour les faibles valeurs de H_d/H^* , le PK-Weir n'est influencé que faiblement par l'écoulement aval, par contre pour les grandes valeurs de H_d/H^* l'effet de la noyade sur l'écoulement amont est apparent.

II.3.7 La comparaison de l'effet de la noyade entre le PK-Weir et le déversoir en labyrinthe

Selon la bibliographie, une étude a été réalisée par Tullis (2006) pour comparer l'effet de la noyade entre le déversoir rectiligne et le déversoir en labyrinthe, les résultats obtenus ont montré que les deux déversoirs se comportent de la même manière quand ces deux derniers sont noyés. pour vérifier la variation de la charge relative amont de l'un par rapport à l'autre. Ainsi, les résultats expérimentaux obtenus sur le PK-Weir (A1m) dans des conditions d'écoulement noyé ont été comparés avec la courbe de référence du déversoir en labyrinthe obtenue par Tullis (2006). La comparaison de la courbe représentant le déversoir en labyrinthe et celle du PK-Weir (figure II.39) montre un décalage de l'ordre de 14%. Ce décalage fait remarquer que la noyade du PK-Weir a plus d'influence sur le niveau amont que pour le déversoir en

labyrinthe. Ceci peut être justifié par le remplissage partiel des alvéoles aval du PK-Weir tandis que celles du déversoir en labyrinthe sont libres et leur radier est horizontal.

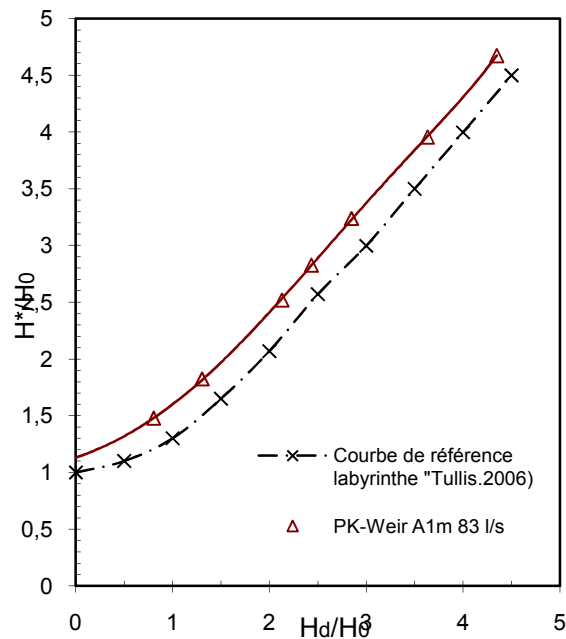


Figure II.39 : Comparaison entre le PK-Weir et le déversoir en labyrinthe (selon les données de Tullis) fonctionnant dans des conditions noyées.

II.4 Analyse des résultats expérimentaux pour la représentation du coefficient de noyade

L'analyse des résultats expérimentaux a pour but de déterminer une relation fonctionnelle qui exprime le coefficient de noyade K en fonction des conditions amont et aval. Ces conditions sont représentées par les termes adimensionnelles $(H_d - H_0)/H^*$ et H_0/P .

Le coefficient de noyade K représente le rendement du PK-Weir en écoulement noyé. Il est exprimé par le rapport entre le coefficient du débit de PK-Weir en écoulement noyé C_{wn} et le coefficient du débit de PK-Weir en écoulement dénoyé C_{wdn} .

$$K = \frac{C_{wn}}{C_{wdn}} = f\left(\frac{H_d - H_0}{H^*}, \frac{H_0}{P}\right) \quad (\text{II.06})$$

Ou :

- K : Coefficient de noyade;
- C_{wn} : Coefficient de débit en écoulement noyé;
- C_{wdn} : Coefficient de débit en écoulement dénoyé ;
- H^* : La charge totale amont dans les conditions d'écoulement noyé;
- H_d : La charge totale aval dans les conditions d'écoulement noyé ;

- H_0 : La charge totale amont dans les conditions d'écoulement libre;

- P : Hauteur maximale du PK-Weir.

Les courbes obtenues des résultats expérimentaux exprimant la variation du coefficient de noyade K en fonction de la hauteur relative $(H_d - H_0)/H^*$ et H_0/P pour les différentes valeurs de débits Q sont représentées dans la figure II.40

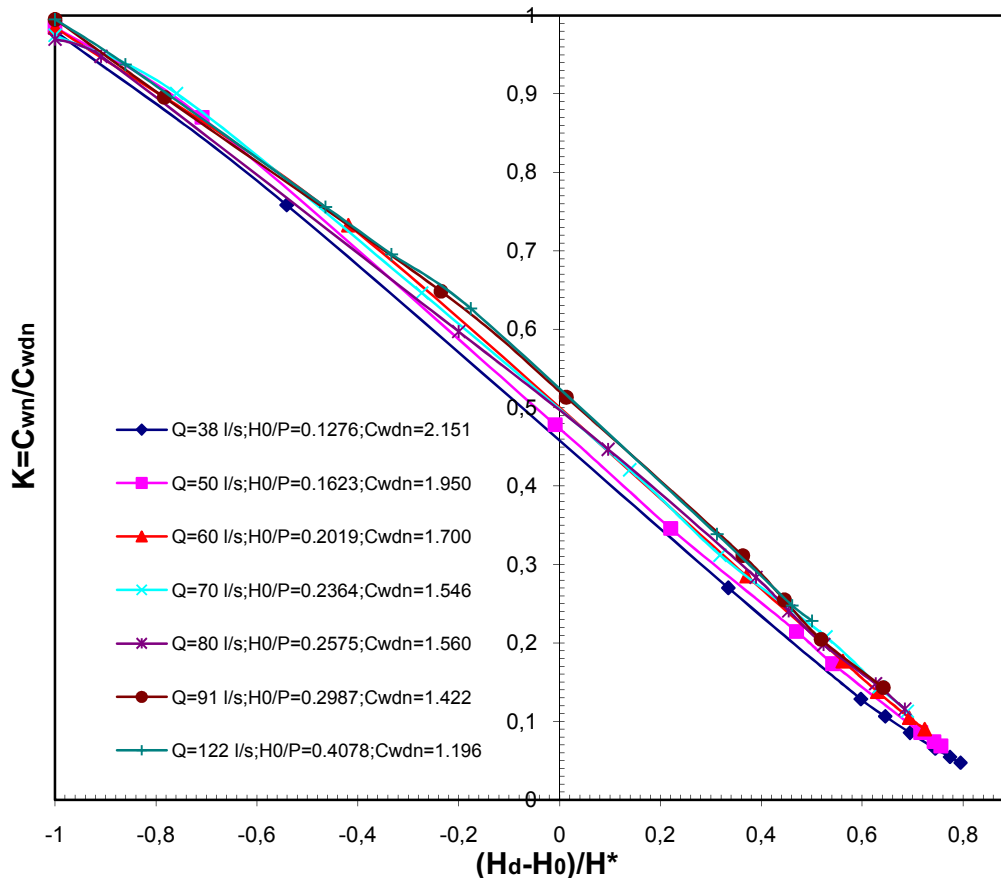


Figure II.40 : Coefficient de noyade en fonction des termes adimensionnelle $((H_d - H_0)/H^*, H_0/P)$ du PK-Weir

La représentation graphique de $K = f((H_d - H_0)/H^*, H_0/P)$ montre deux intervalles distincts du rapport $(H_d - H_0)/H^*$, le premier intervalle $(-1, 0)$ correspond aux valeurs de la charge aval inférieures à la charge amont dans les conditions d'écoulement libre et le second intervalle $(0, 1)$ correspond aux valeurs de la charge aval supérieures à la charge amont dans les conditions d'écoulement libre.

II.4.1 Expression du coefficient de noyade par l'analyse statistique

Afin de déterminer le coefficient de noyade par voie numérique, les résultats expérimentaux ont fait l'objet d'analyse par le biais du logiciel (MINITAB 15) qui permet la résolution des équations à plusieurs variables par voie de régression multiple. Ce logiciel permet le

traitement des données par la corrélation d'une large gamme de variables, basé essentiellement sur la méthode des moindres carrés qui permet d'expliquer et préciser la relation qui existe entre une variable de réponse et un ou plusieurs variables appelées prédicteurs.

Le logiciel MINITAB 15 contient cinq didacticiels à utiliser de la manière suivante :

- Session 1 : Représentation graphique des données
- Session 2 : Entrée et exploration des données
- Session 3 : Analyse des données
- Session 4 : Evaluation de la qualité
- Session 5 : Conception d'un plan d'expériences

Les résultats de la régression indiquent la direction, l'ampleur et la signification statistique de la relation entre un prédicteur et une réponse.

- Le signe de chaque coefficient indique la direction de la relation.
- La valeur de (p) de chaque coefficient teste l'hypothèse nulle que le coefficient est égal à zéro (aucun effet). Par conséquent, si les valeurs de (p) sont petites, cela peut souligner le caractère significatif de l'ajout du prédicteur au modèle.
- L'équation prévoit de nouvelles observations, en fonction de valeurs de prédicteur spécifiques.
- Les procédures de régression par les moindres carrés sont utilisées lorsque la variable de réponse est continue.
- Les procédures de régression par les moindres carrés partiels sont utilisées lorsque les prédicteurs sont fortement corrélés ou plus nombreux que les observations.
- Les procédures de régression logistique sont utilisées lorsque la variable de réponse est une variable de catégories.

Les séries des valeurs obtenues sur un modèle expérimenté pour les valeurs de débits Q , qui sont présentés sous forme des séries :

- Série 01 : $Q = 38$ l/s ;
- Série 02 : $Q = 50$ l/s ;
- Série 03 : $Q = 60$ l/s ;
- Série 04 : $Q = 70$ l/s ;
- Série 05 : $Q = 80$ l/s ;
- Série 06 : $Q = 91$ l/s ;
- Série 07 : $Q = 122$ l/s.

La relation qu'on cherche correspond au coefficient de noyade K du PK-Weir qui est en fonction du rapport des charges $((H_d-H_0)/H^*)$ et la charge relative (H_0/P) .

$$K = \frac{C_{wn}}{C_{wdn}} = f((H_d-H_0)/H^*; H_0/P)$$

L'utilisation des termes adimensionnelles $((H_d-H_0)/H^*; H_0/P)$ comme des variables prédicteurs a permis d'obtenir une relation mathématique qui exprime le coefficient de noyade K du P.K-Weir.

$$K_{(Th)} = 0.395 - 0.478((H_d-H_0)/H^*) + 0.260H_0/P \quad (II.07)$$

Avec $R^2 = 99.20\%$

L'ajustement de $K_{(th)}$ avec K expérimental a permis de déterminer deux relations qui donne des valeurs du coefficient de noyade très proches de ceux obtenues expérimentalement.

La première équation de régression est :

$$K_{(ajusst)} = -0.04693 + 1.3050K_{(th)} - 0.3017K_{(th)}^2 \quad (II.08)$$

Avec $R^2 = 99.70\%$

Le développement de la relation (II.08), permet d'écrire :

$$K_{(ajusst)} = 0.4215 - 0.5099 \frac{H_d - H_0}{H^*} \left[1 + 0.1352 \frac{H_d - H_0}{H^*} - 0.1471 \frac{H_0}{P} \right] + 0.2773 \frac{H_0}{P} \left[1 - 0.0735 \frac{H_0}{P} \right] \quad (II.09)$$

La deuxième équation de régression est :

$$K_{(ajusst)} = -0.000218 + 0.8038K_{(th)} + 0.9501K_{(th)}^2 - 0.8363 K_{(th)}^3 \quad (II.10)$$

Avec $R^2 = 99.80\%$

Le développement de la relation (II.10), permet d'écrire :

$$K_{(ajusst)} = 0.4140 + \frac{H_d - H_0}{H^*} \left[-0.5559 + \frac{H_d - H_0}{H^*} \left[-0.00935 + 0.09134 \frac{H_d - H_0}{H^*} \right] \right] + \frac{H_0}{P} \left[0.3024 + \frac{H_0}{P} \left[-0.0028 - 0.0147 \frac{H_0}{P} \right] \right] + \frac{H_d - H_0}{H^*} \left[\frac{H_0}{P} \left[0.0102 - 0.1490 \frac{H_d - H_0}{H^*} + 0.0810 \frac{H_0}{P} \right] \right] \quad (II.11)$$

L'application numérique des deux relations (II.09) et (II.11) peut donner directement la valeur du coefficient de noyade du PK-Weir, en introduisant les termes adimensionnels $((H_d-H_0)/H^*)$ et (H_0/P) .

La comparaison entre les courbes des données expérimentales et les courbes qui représentent les résultats des deux relations mathématiques précédentes a montré que les valeurs du coefficient de noyade obtenues par la relation (II.11) sont semblables aux valeurs

expérimentales. Cependant, les valeurs obtenues par la relation (II.09) donne des résultats similaires aux résultats expérimentaux dans l'intervalle (0, 1) et présence un faible écart avec les valeurs expérimentales pour les valeurs appartenant à l'intervalle (-1, 0) de la charge relative $((H_d-H_0)/H^*$.

Le coefficient de noyade K peut être exprimé par la relation (II.09) qui est simple et facile à utiliser, elle donne des valeurs proches aux valeurs réelles pour l'intervalle (0, 1) avec une erreur ne dépassant pas les 5%. Cependant la relation (II.11) permet d'obtenir des valeurs du coefficient de noyade très proches des valeurs réelles, néanmoins, son application est plus compliquée que la relation (II.09).

II.5 Conclusion

Cette investigation expérimentale avait comme objectif l'étude du PK-Weir fonctionnant dans des conditions d'écoulement noyé. Pour ce faire, il était nécessaire de scinder cette analyse expérimentale en deux phases. La première phase correspond à une analyse du fonctionnement du PK-Weir dans des conditions d'écoulement libre (dénoyé) et la seconde phase se rapporte à l'étude du PK-Weir fonctionnant dans des conditions d'écoulement noyé.

La première phase de l'expérimentation s'est intéressée essentiellement aux conditions d'entrée et de sortie du PK-Weir. Ces conditions concerne l'emplacement du PK-Weir (sur radier du canal et sur socle), la forme d'entrée au pied du déversoir, la forme de radier des alvéoles de sortie et de l'entrée, la forme de radier des alvéoles de sortie, la forme de radier des alvéoles d'entrée et l'inclinaison du radier amont.

Les résultats obtenus ont montré que :

- L'emplacement du déversoir dans un canal (ou le niveau du radier du canal aval est égal au niveau du radier amont) permet d'avoir un meilleur rendement. Cela peut être expliqué par l'écoulement au pied amont du déversoir qui est dirigé directement vers les alvéoles amont pour le cas d'emplacement dans un canal, tandis que le cas avec socle montre un écoulement qui transite par le fond et se dirige vers le haut du socle pour atteindre finalement les alvéoles amont du déversoir.
- La forme d'entrée au pied amont du déversoir n'influe que faiblement sur la performance du PK-Weir. ainsi, de point de vue pratique il est donc recommandé d'utiliser une forme d'entrée vertical au pied amont du déversoir, puisque cette forme est plus économique est sa performance n'est réduite que faiblement.

- Généralement, les déversoirs en PK-Weir et en labyrinthe sont conçus avec des murs. Cette disposition verticale exige pour les grandes hauteurs des murs un béton armé fortement ferrailés pour mieux résister à la pression de l'eau le long des murs. La solution qui permet de réduire le coût de cet ouvrage consiste à réduire la hauteur de la partie libre des murs tout en gardant la même hauteur du déversoir. Ceci peut être possible par le remplissage des alvéoles amont ou aval ou les deux à la fois par de béton sous forme d'un radier incliné ou en marches d'escalier. Cette disposition implique une réduction de la partie libre des parois et par conséquent le ferrailage ne concerne qu'une petite partie des murs.
- Le remplissage des alvéoles aval peut ne pas affecter la performance tant que le taux de remplissage ne dépasse pas une certaine limite. Cette limite a été déterminée expérimentalement, elle correspond à une hauteur des marches égale à la moitié de la hauteur du déversoir, ces marches sont réalisées dans chaque alvéole aval.
- L'écoulement dans les alvéoles d'entrée du déversoir peut être stable ou perturbé selon la conception du radier. Dans cette étude deux type de conception de radier ont été considéré, le premier avec un radier horizontale et le second cas avec un radier incliné de la base jusqu'au sommet. Il a été vérifié que le radier amont horizontal permet d'avoir un meilleur rendement que le radier amont incliné.

La deuxième phase de l'expérimentation s'est intéressée essentiellement à l'effet du niveau aval sur le niveau amont dans des conditions d'écoulement noyé. Les essais effectués sur plusieurs modèles de PK-Weir avec divers dispositions ont montré que les conditions aval peuvent influencer sur l'écoulement à l'amont du PK-Weir et par conséquent affecter la performance de ce type de déversoir. Cette influence a été démontrée qu'elle se caractérise par une variation proportionnelle entre amont et l'aval et ne dépend pas de la forme du radier aval (encombrement aval). Il a été constaté aussi que la variation du niveau amont par rapport au niveau aval se fait d'une manière proportionnelle constante pour les différents débits, ainsi on peut dire que cette variation est indépendante du débit de transit. Les essais réalisés pour deux type d'obstacles à l'aval ont fait remarqué que pour un même débit de transit donné, l'écoulement pour ces deux cas est semblable et donne la même proportionnalité entre la charge amont et celle de l'aval, L'expérimentation réalisée sur deux types de disposition (avec contraction latérale et sans contraction latérale) a montré que effet de noyade est indépendant de la contraction latérale du déversoir en PK-Weir.

Le débit qui transite par un déversoir est souvent exprimé par le coefficient de débit qui représente l'efficacité d'un déversoir donné. L'effet de la submersion sur la capacité du PK-Weir peut être déterminé par la variation du coefficient de débit en fonction du taux de la submersion. Le résultat des essais ont montré qu'en augmentant la profondeur d'eau aval, le déversoir devient noyé. Cette noyade se manifeste par un décroissement rapide du coefficient de débit pour les faibles valeurs de la charge relative amont H^*/P ($0.12 < H^*/P < 0.6$), ce décroissement perd de son importance à partir d'une valeur H^*/P d'environ 0,6.

Les résultats obtenus montrent aussi que pour les faibles débits l'influence du niveau aval sur l'amont est plus exprimée. Ceci dit que l'influence aval sur l'amont est plus rapide quand la charge amont est faible. Cependant, cet influence diminue progressivement avec l'accroissement de débit ce qui implique un accroissement de la charge amont H^* .

La comparaison des résultats obtenus sur le PK-Weir avec le déversoir en labyrinthe pour l'écoulement noyé a montré que l'effet de la noyade est plus exprimé pour le PK-Weir que le déversoir en labyrinthe. Ceci peut être justifié par le remplissage partiel des alvéoles aval du PK-Weir tandis que celles du déversoir en labyrinthe sont libres et leur radier est horizontal.

L'application de la méthode de régression multiple aux données expérimentaux par le biais du logiciel Minitab a permis de déterminer deux relations qui permettent la prédiction du coefficient de noyade du PK-Weir en connaissant les charges amont et aval avant et après la submersion.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le PK-Weir peut être une solution efficace comme barrage déversoir à travers les cours d'eau où l'écoulement est souvent noyé. Il servira comme organe de contrôle de surélévation du plan d'eau amont tout en assurant une évacuation maximale des eaux. L'étude de fonctionnement du PK-Weir dans des conditions noyées n'a fait l'objet d'aucun travail à l'exception d'un mémoire de fin d'étude réalisé en 2008 au département d'Hydraulique à l'université de Biskra. L'objectif essentiel du présent travail est la définition de l'effet de la variation du niveau aval sur l'écoulement en amont du PK-Weir et par conséquent son impact sur sa performance hydraulique. Ce travail est basé essentiellement sur l'expérimentation sur modèles réduits de PK-Weir avec différentes conditions d'écoulement en amont et en aval.

Pour atteindre cet objectif fixé, ce travail a été composé en deux parties principales ; la première bibliographique et la seconde expérimentale finalisée par une analyse numérique.

La première partie correspondant à l'étude bibliographique a permis de présenter un état de connaissance sur les déversoirs en labyrinthe et le PK-Weir qui représentent une solution efficace pour l'évacuation des grands débits sous des faibles charges. Ces types de déversoirs ont fait l'objet de plusieurs travaux de recherches dans le but de mieux comprendre leur fonctionnement hydraulique et d'optimiser leurs configurations géométriques.

La géométrie des déversoirs non rectilignes est caractérisée par une crête à axe discontinu en plan, permettant d'avoir une crête plus longue que la largeur du déversoir. L'expérimentation sur modèle réduit physique était la base des différents travaux de recherche pour le développement et l'optimisation de ces types de déversoirs et pour la compréhension des phénomènes d'écoulement. Le recours à l'expérimentation est exigé par la complexité de l'écoulement sur ces types de déversoirs qui ne se prête pas à une analyse numérique simple.

L'étude de la performance du déversoir en labyrinthe, a été réalisée pour la première fois par HAY et TAYLOR en 1970, Elle est considérée comme une base de conception des déversoirs en labyrinthe. Cette performance est exprimée par le rapport des débits entre le déversoir en labyrinthe et le déversoir rectiligne qui est dépendante des paramètres géométriques. La première approche numérique basée sur l'expérimentation et l'analyse dimensionnelle est attribuée à Lux et Hinchliff (1985). Cette approche a défini les paramètres adimensionnels qui régissent l'écoulement sur le déversoir en labyrinthe et a permis d'exprimer le coefficient de débit en fonction de ces paramètres. Cependant, Tullis (1995)

considère que le coefficient de débit est dépendant de la charge relative et de l'angle formé entre le sens de l'écoulement et la paroi latérale. La bibliographie montre aussi l'effet de la noyade qui est étudié par plusieurs chercheurs tels que Cox (1928), Villemonte (1947) ces travaux ont concerné le déversoir rectiligne, tandis que le déversoir en labyrinthe n'a fait l'objet d'étude que par Taylor (1968), Falvey (2003), Tullis (2006) et R. Lopes, J. Motos et J.F. Melo 2009. Ce dernier a déterminé une courbe unique qui représente la variation de la charge relative amont en fonction de la charge relative aval pour deux déversoirs en labyrinthe de différentes configurations géométriques et de la caractéristique géométrique du canal descendant.

Les déversoirs en labyrinthes fusibles constituent une méthode simple pour augmenter la capacité de stockage des barrages et/ou des déversoirs. Pendant une forte crue et en fonction de son importance, les hausses basculent les unes après les autres sous la seule action de l'eau, de manière à libérer progressivement le seuil.

La nouvelle forme de déversoir développé par F. Lempérière et A. Ouamane (2003) baptisée PK-Weir 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.

Le PK-Weir est un déversoir de type labyrinthe, caractérisé par des éléments de forme rectangulaire en plan. Sa structure est constituée essentiellement par des porte-à-faux amont et aval, ceci lui donne une longueur transversale de crête supérieure à la base d'appui. Les radiers amont et aval sont inclinés. Ce déversoir a fait l'objet d'une étude expérimentale détaillée qui a permis de sélectionner deux type de PK-Weir, le premier avec des porte-à-faux amont et aval (Type A) et le second avec seulement des porte-à-faux amont (Type B).

La seconde partie de ce travail correspond à une étude expérimentale qui a pour but de vérifier expérimentalement l'effet des conditions d'approche amont et aval sur l'écoulement libre d'une part et de vérifier l'effet de la noyade sur l'écoulement amont et par conséquent sur la performance du PK-Weir.

Pour ce faire, il était nécessaire de scinder cette analyse expérimentale en deux phases. La première phase correspond à une analyse du fonctionnement du PK-Weir dans des conditions d'écoulement libre (dénoyé) et la seconde phase se rapporte à l'étude du PK-Weir fonctionnant dans des conditions d'écoulement noyé.

La première phase de l'expérimentation s'est intéressée essentiellement aux conditions d'entrée et de sortie du PK-Weir.

L'investigation expérimentale a montré que l'emplacement du déversoir dans un canal (ou le niveau du radier du canal aval est égal au niveau du radier amont) permet d'avoir un meilleur rendement que de placer le déversoir sur un socle qui représente un barrage poids. Cela peut être expliqué par l'écoulement au pied amont du déversoir qui est dirigé directement vers les alvéoles amont pour le cas d'emplacement dans un canal, tandis que le cas avec socle l'écoulement qui transite par le fond se dirige vers le haut du socle pour atteindre finalement les alvéoles amont du déversoir.

L'étude de la forme d'entrée au pied amont du déversoir a montré que cette dernière n'influe que faiblement sur la performance du PK-Weir. Ainsi, de point de vue pratique il est donc recommandé d'utiliser une forme d'entrée vertical au pied amont du déversoir.

Le remplissage des alvéoles aval peut ne pas affecter la performance tant que le taux de remplissage ne dépasse pas une certaine limite. Cette limite a été déterminée être égale à une hauteur des marches de 50% de la hauteur du déversoir, les marches sont réalisées dans chaque alvéole aval.

L'écoulement dans les alvéoles d'entrée du déversoir peut être stable ou perturbé selon la conception du radier. Dans cette étude deux type de conception de radier ont été considéré, le premier avec un radier horizontale et le second cas avec un radier incliné. Il a été vérifié que le radier amont horizontal permet d'avoir un meilleur rendement que le radier amont incliné.

La deuxième phase de l'expérimentation s'est intéressée essentiellement à l'effet du niveau aval sur le niveau amont dans des conditions d'écoulement noyé. Les essais effectués sur plusieurs modèles de PK-Weir ont montré que les conditions aval peuvent influencer sur l'écoulement à l'amont du PK-Weir et par conséquent affecter la performance de ce type de déversoir. Cette influence a été démontrée qu'elle se caractérise par une variation proportionnelle entre l'amont et l'aval et ne dépend pas de la forme du radier aval (encombrement aval). Il a été constaté aussi que la variation du niveau amont par rapport au niveau aval se fait d'une manière proportionnelle qui est la même pour tous les débits considérés, ainsi on peut dire que cette variation est indépendante du débit de transite. Les essais réalisés pour deux type d'obstacles à l'aval ont fait remarqué que pour un même débit de transite, l'écoulement est semblable et donne la même proportionnalité entre la charge amont et celle de l'aval, L'expérimentation a montré aussi que la noyade est indépendante de la contraction latérale du déversoir en PK-Weir.

L'effet de la submersion sur la capacité du PK-Weir peut être déterminé par la variation du coefficient de débit en fonction du taux de submersion. Le résultat des essais ont montré qu'en augmentant la profondeur d'eau aval, le déversoir devient noyé. Cette noyade se manifeste par un décroissement rapide du coefficient de débit pour les faibles valeurs de la charge relative amont H^*/P ($0.12 < H^*/P < 0.6$), ce décroissement perd de son importance à partir d'une valeur H^*/P d'environ 0,6.

Les résultats obtenus montrent aussi que pour les faibles débits l'influence du niveau aval sur l'amont est plus exprimée. Cependant, cet influence diminue progressivement avec l'accroissement de débit ce qui implique un accroissement de la charge amont H^* .

La comparaison des résultats obtenus sur le PK-Weir avec le déversoir en labyrinthe pour l'écoulement noyé a montré que l'effet de la noyade est plus exprimé pour le PK-Weir. Ceci peut être justifié par le remplissage partiel des alvéoles aval du PK-Weir à cause du radier qui est incliné.

L'application de la méthode de régression multiple aux données expérimentaux par le biais du logiciel Minitab a permis de déterminer deux relations qui permettent la prédiction du coefficient de noyade du PK-Weir en connaissant les charges amont et aval avant et après la submersion.

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

Liste des notations

Symbole	Désignation	Unité
a	Largeur de l'alvéole amont	[m]
A	Section de l'écoulement dans le bassin de simulation	[m ²]
b	Largeur du déversoir	[m]
b	Largeur de l'alvéole aval	[m]
B	Longueur d'une paroi latérale	[m]
c	Longueur du porte-à-faux aval	[m]
C_d	Coefficient de débit	[-]
$\overline{C_d}$	Coefficient de débit	[-]
C_w	Coefficient de débit du déversoir testé	[-]
d	Longueur du porte-à-faux aval	[m]
D	Hauteur aval des parois	[m]
E	Epaisseur de bloc fusible	[m]
g	Accélération de la pesanteur	[m/s ²]
h*	Charge piézométrique amont (condition d'écoulement noyé)	[m]
h ₀	Charge piézométrique amont (conditions d'écoulement libre)	[m]
h _d	Charge piézométrique aval	[m]
$\overline{h_0}$	Hauteur d'eau amont	[m]
H	Hauteur piézométrique en amont	[m]
H	Hauteur maximale du P.K.Weir	[m]
H*	Charge totale total amont (condition d'écoulement noyé)	[m.c.e]
h _c	Charge cinétique	[m.c.e]
H _d	Charge total aval	[m.c.e]
H ₀	Charge total amont (conditions d'écoulement libre)	[m.c.e]
H _v	Charge cinétique d'approche en amont	[m.c.e]
\overline{H}	Charge amont sur le déversoir	[m.c.e]
H _t	Charge total sur la crête	[m.c.e]
H*/P	(Paramètre adimensionnelle) charge relative	[-]
H*/H ₀	(Paramètre adimensionnelle) charge relative amont	[-]
H _d /H ₀	(Paramètre adimensionnelle) charge relative aval	[-]
l	Largeur du bassin de simulation	[m]
L	Longueur développée du déversoir (L=a+b+2B)	[m]
L _c	Longueur de la crête	[m]
P	Hauteur maximale amont du P.K.Weir	[m]
Q	Débit évacué (m ³ /s)	[m ³ /s]
QL	Débit qui transite sur un déversoir en labyrinthe	[m ³ /s]
QN	Débit qui passe sur un déversoir rectiligne	[m ³ /s]
Q _s	Débit à écoulement noyé	[m ³ /s]
Q _l	Débit à écoulement liber	[m ³ /s]
Q _{cr}	Débit calculé pour un déversoir rectiligne à mince paroi	[m ³ /s]
Q _{P.K.Weir}	Débit mesuré	[m ³ /s]
q	Performance du déversoir expérimenté	[-]
T	Epaisseur des parois	[m]
v	Vitesse d'écoulement	[m/s]
W	Largeur d'un cycle du déversoir	[m]
W _t	Largeur total du déversoir	[m]
W _c	Largeur de canal	[m]
w _i	Largeur du déversoir (w=a+b)	[m]
\overline{W}	Hauteur de déversoir du fond du canal jusqu'à la crête	[m]
α	Angle du mur	[°]
μ	Coefficient de débit d'un déversoir standard de type Creager (μ=0.49)	[-]

Références

Bibliographiques

Références bibliographiques

- BAZIN H., 1894. Expériences nouvelles sur l'écoulement en déversoir, Annales des Points et Chaussées, Mémoires et Documents (7e Série) Tome VII.
- BEN SAID M., 2007. Mémoire Magister en Hydraulique, Etude de l'optimisation des évacuateurs de crues en labyrinthe, Biskra, pp. 78-86.
- 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.
- 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
- CARLIER M., 1980. Hydraulique générale et appliquée, Eyrolles, pp. 189-215.
- COX, G.N. 1928. The submerged weir as a measuring device. Bulletin of the University of Wisconsin, Engineering Experiment Station (Series No.67), pp.153-154.
- 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.
- FALVEY H.T., 1995. Hydraulics and design of fusegate, Journal of Hydraulics Engineering
- FALVEY H.T., 2003. Hydraulic design of labyrinth weirs, Virginia, ASCE Press.
- FRANCIS J.B., 1884. Experiments on the flow of water over submerged weirs. American Society of Civil Engineers Transactions, pp. 303-312.
- FTELEY A., STEARNS F.P., 1883. Description of some experiments on flow of water made during the construction of works for conveying water of Sudbury River to Boston, American Society of Civil Engineers Transactions , pp. 101-108.
- HAY N., TAYLOR G., 1970. Performance and design of labyrinth weirs, Journal of the hydraulics division Proceedings of ASCE, Vol 96, N° 11, pp. 2337-2357
- HINCHLIFF D.L., HOUSTON K.L., 1984. Hydraulic Design and Application of Labyrinth Spillways, Division of Research Engineering and Research Center, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado
- LADREYT S., LABORIE V., 2005. Notice sur les déversoirs, Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales (CETMEF), France, pp 21-71.
- LEMPÉRIÈRE F., OUAMANE A., 2003. The Piano Keys Weir: a new cost-effective solution for spillways, The International Journal on Hydropower & Dams, Issue Four.
- LEMPERIERE F., VIGNY J., 2005. International symposium on Dam safety. Analysis and low cost mitigation of the flood risk of Asian dams, Xian
- LEMPERIERE F., VIGNY J., 2006. Economie et sécurité des déversoirs du Burkina faso. 1^{er} congrès national des barrages Burkina faso.

- LOPES R., MATOS J., MELO J.F., 2009. Discharge capacity for free flow and submerged labyrinth weirs. Proc. 33rd IAHR congress, Vancouver, Canada.
- LUX III, F., HINCHLIFF, D.L., 1985. Design and Construction of Labyrinth Spillways, 15th Congress on Large Dams, ICOLD, Vol. IV, Q59, R 15, Lausanne. pp. 249-274
- MAGALHAES A P., MELO J F., 1994. Hydraulic Model Study of Large Labyrinth Weir Spillway. Application of Useful Experimental Charts in its Design, 2nd International Conference on Hydraulic Modeling, BHR Group pp. 25-31
- NOUI A., 2007. Mémoire Magister en Hydraulique, Etude de l'optimisation de l'évacuateur de crues en touches de piano (P.K.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., 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., LEMPERIERE 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., LEMPERIERE F., 2006. Nouvelle conception de déversoir pour l'accroissement de la capacité des retenues des barrages, Colloque International sur la protection et la préservation des ressources en eau, Blida.
- 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., 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.
- 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
- REHBOCK T., 1929. Hydrauliclaboratorypractices, American Society of Mechanical Engineers, New York, pp. 111-242.
- TAYLOR G., 1968. The performance of labyrinth weirs, PhD thesis, University of Nottingham, Nottingham, England.
- TULLIS P., 2006. Predicting submergence effects for labyrinth weirs, International Symposium on Dams in the Societies of the XXI Century, Barcelona,
- TULLIS J. P., AMANIAN N., WALDRON D., 1995. Design of Labyrinth Spillways, Journal of hydraulic engineering, Vol. 121, N° .3, pp. 247-255.

- VAZQUEZ J., 2000. Systèmes Hydrauliques Urbains, ENGEES, France, pp. 53-54.
- VILLEMONTÉ J.R., 1947. Submerged weir discharge studies, Engineering News Record December, pp. 866-869.