

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed khider –Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et d'Hydraulique
Référence :/2019



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية و الري
المرجع/2019

Mémoire de Master

Filière : Hydraulique

Spécialité : Hydraulique urbaine

Thème

Etude de la capacité hydraulique de déversoir rectiligne et non rectiligne

Nom et Prénom de l'étudiant :
ATROUS MOUSSA

Encadreur : Djedri Tewfik
Co-Encadreur : Laiadi Adil

Promotion Juillet 2019

Résumé

Le déversoir est un organe essentiel intégré dans un aménagement de barrage, par-dessus lequel l'eau s'écoule pendant les périodes ordinaire ou pendant les périodes de crues. Le déversoir est souvent placé à travers un cours d'eau naturel ou artificiel (Rivière, petits cours d'eau, canal d'irrigation, etc.) comme organe de mesure ou de contrôle de débit et de la profondeur d'eau. Il est utilisé aussi pour assurer le passage des crues exceptionnelles dans des conditions favorables à la sécurité.

Selon l'alignement de la crête du déversoir, ces derniers sont classés en deux types, rectilignes et non rectilignes.

Cette étude est basée principalement sur la comparaison théorique entre le déversoir rectiligne type Creager et le déversoir non rectiligne type labyrinthe et le PK-Weir sur la capacité hydraulique et déterminer le type de déversoir le plus efficace pour l'aménagement d'oued el abiadh M'chouneche.

ABSTRACT

The Weir is an essential organ integrated in a dam planning, over which water flows during ordinary periods or during periods of flooding. The Weir is often placed through a natural or artificial watercourse (river, small streams, irrigation canal, etc.) as a measuring or flow control device and water depth. It is also used to ensure the passage of exceptional floods in conditions favorable to safety.

Depending on the alignment of the weir crest, they are classified into two types, rectilinear and non-rectilinear.

This study is based mainly on the theoretical comparison between the Creager-type straight weir and the labyrinth-type non-linear weir and the PK-Weir on hydraulic capacity and determine the most efficient weir type for wadi planning Oued el abiadh M'chouneche;

ملخص

الهدار هو عضو أساسي مدمج في إدارة السد ، خلال يتدفق الماء في الفترات العادية أو خلال فترات ارتفاع المياه. غالبًا ما يتم وضع الهدار في مجرى مائي طبيعي أو اصطناعي (النهر ، مجرى المائي صغير ، قناة الري ، إلخ) كجهاز قياس أو التحكم في التدفق وعمق الماء. كما يستخدم لضمان مرور الفيضانات الاستثنائية في ظروف مواتية للسلامة.

. اعتمادًا على استقامة قمة الهدار ، يتم تصنيف هذا الأخير إلى نوعين ، خطي وغير خطي

تعتمد هذه الدراسة بشكل أساسي على المقارنة النظرية بين الهدار الخطي نوع Creager والهدار الغير الخطي من Labyrinthe و PK-Weir على السعة الهيدروليكية وتحديد نوع الهدار الأكثر كفاءة لتطویر واد مشونش. الذي هو حاليا في طور الإنشاء بهدف سقي مدينة مشونش -بولاية بسكرة-.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents

A Mes frères et mes sœurs

A tout ma famille

A Tous mes amis

A toute personne chère à mon cœur, et à tous ceux et toutes celles qui me connaissent et qui m'aime.

Remerciements

Je remercie Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de m'avoir appris ce que j'ignorais, de m'avoir donné la santé physique et spirituelle pour l'accomplissement de cette mémoire de fin d'étude.

*Je tiens à exprimer mes profonds remerciements et ma vive reconnaissance à mon promoteur, le **Encadreur Djedri Tewfik** qui a su, à sa façon, me conseiller et m'orienter tout au long de la réalisation de ce travail.*

*J'exprime toute ma gratitude à mon Co-encadrant de mémoire **M Laiadi Adil** pour son aide.*

Je remercie également tous les membres du jury qui apporteront leur contribution, en acceptant d'être dans le jury qui examinera ce modeste travail.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
<i>CHAPITRE I : Etat de connaissance sur les déversoirs rectilignes</i>	
I-1 INTRODUCTION	2
I.2 Déversoir rectiligne	2
I.3 Différents types de déversoir rectiligne	3
I.3.1 Déversoir standard (Creager)	3
I.3.2 Déversoir rectiligne à paroi mince	5
I.3.2.1 Régime d'écoulement sur les déversoirs en mince paroi	6
I.3.2.2 Déversoir rectangulaire sans contraction latérale	7
I.3.2.3 Déversoir rectangulaire avec contraction latérale	7
I.3.2.4 Déversoir à échancrure triangulaire	8
I.3.2.4 Déversoir trapézoïdal	9
I.3.3 Déversoir circulaire	10
I.3.4 Déversoir incliné	11
I.3.5 Déversoir oblique	12
I.3.6 Déversoir à seuil épais (large seuil)	13
I.3.6.1 Régime d'écoulement sur un déversoir à crête épaisse	14
I.3.6.2 Type des déversoirs à crête épaisse	15
I.4 CONCLUSION	16

SOMMAIRE

CHAPITRE II : Etat de connaissance sur les déversoirs non rectilignes

II-1- INTRODUCTION	17
II.2 Différentes formes des déversoirs non rectilignes	17
II-2.1 Déversoir en Labyrinthe	17
II.2.1.1 Définition	17
II-2.1.2 Géométrie du déversoir en labyrinthe	18
II.2.1.3 Paramètres affectant la performance de déversoir en labyrinthe	19
II.2.1.3.1 Impact l'accroissement de la longueur L/W	20
II.2.1.3.2 Impact la charge relative H/P	21
II.2.1.3.3 Impact du rapport d'aspect vertical W/P	21
II.2.1.3.4 Impact d'angle de paroi latérale	21
II.2.1.3.5 Impact de nombre de cycle n	21
II.2.1.3.6 Impact de l'interférence en aval	22
II.2.1.3.7 Impact de la largeur des alvéoles amont est aval	23
II.2.1.3.8 Impact de la forme d'entrée	23
II.2.1.4 Capacité hydraulique du déversoir en labyrinthe	24
II-2.2 Déversoir en touche de Piano (PK-Weir)	28
II.2.2.1 Généralité sur le déversoir PK-Weir	28
II.2.2.2 Configuration géométrique de PK-Weir	31
II.2.2.3 Différents types de PK-Weir	32
II.2.2.4 Paramètres affectant la performance de déversoir PK- Weir	32
II.2.2.4.1 Effets des principaux paramètres géométriques sur le rendement du PK-Weir	33

SOMMAIRE

II.2.2.4.2 Effets des paramètres secondaires	36
II.2.2.5 Capacité hydraulique du déversoir en labyrinthe	40
II.3 Conclusion	43

Chapitre III : Etude comparative

III.1 Introduction	44
III.2 Évacuateur de crues d'Oued M'chouneche	44
III.2.1 Caractéristiques d'évacuateur de crues d'Oued M'chouneche	44
III.2.2 La capacité d'évacuation de déversoir rectiligne type Creager	45
III.3 La capacité d'évacuation de déversoir en labyrinthe	47
III.3.1 L'écoulement à travers le déversoir en labyrinthe	47
III.3.2 Performance de déversoir en labyrinthe	48
III.3.3 La comparaison en entre le déversoir Creager et labyrinthe	50
III.4 La capacité d'évacuation de déversoir PK-Weir	52
III.4.1 L'écoulement sur le PK-Weir	52
III.4.2 Performance du PK-Weir	52
III.4.3 La comparaison en entre le déversoir Creager et PK-Weir	55
III.5 La comparaison en entre le déversoir PK-Weir et labyrinthe	57
III.6 Conclusion	57
Conclusion générale	59
Liste des notations	60
Références bibliographique	62

LISTE DES FIGURES

Figures	Titre	page
Figure I.01	Ecoulement sur un déversoir rectiligne (Creage	2
Figure I.02	Schéma d'un déversoir rectiligne	3
Figure I.03	Déversoir Creager	4
Figure I.04	Schéma de l'écoulement sur le déversoir mince parois	5
Figure I.05	Coupe longitudinale d'un déversoir à crête mince en écoulement noyé	6
Figure I.06	Déversoir à crête mince en écoulement noyé en dessous à ressaut éloigné	6
Figure I.07	Vue en perspective d'un déversoir rectangulaire sans contraction latérale	7
Figure I.08	Vue en perspective d'un déversoir rectangulaire avec contraction latérale	7
Figure I .09	Déversoir triangulaire à paroi mince	8
Figure I.10	Forme de la crête d'un déversoir à échancrure triangulaire	8
Figure I .11	coupe transversale d'un déversoir de Cipolletti	9
Figure I.12	Déversoir à crête circulaire	10
Figure I.13	Coupe longitudinale d'un déversoir incliné	10
Figure I.14	Vue en plan d'un déversoir oblique	11
Figure I.15	Déversoir à seuil épais	13
Figure I.16	Coupe longitudinale d'un déversoir à crête épaisse en écoulement noyé	14
Figure I.17	Coupe longitudinale d'un déversoir à crête épaisse en écoulement dénoyé	14
Figure I.18 :	Vue en perspective d'un déversoir à seuil épais à profil triangulaire	15
Figure I.19	Coupe longitudinale d'un déversoir à crête longitudinale trapézoïdale	15
Figure II.01	Déversoirs non rectiligne	17
Figure II.02	Vue en perspective d'un déversoir labyrinthe	17
Figure II.03	Différentes formes de déversoir en labyrinthe:Triangulaire (A), trapezoidale (B), et rectangulaire (C)	18
Figure II.04	Représentation des paramètres du déversoir en labyrinthe (Ben Saïd et al. , 2011)	19
Figure II.05	Différentes configurations triangulaires des déversoirs rectilignes et non rectilignes testées par Gentilini (1941)	20
Figure II.06	Rapport de coefficient de débit CL / Cn en fonction de la charge relative (Gentilini1941)	20

LISTE DES FIGURES

Figure II.07	Rapport sans dimensions décrivant la performance de déversoir en labyrinthe noyé (Tullis, 2007)	22
Figure II.08	Coefficient de débit en fonction de largeur des alvéoles (A) et en fonction de la forme d'entrée du déversoir (B) (Ben Said et Ouamane, 2007)	23
Figure II.09	Coefficient de débit du déversoir en labyrinthe à crête en quart de cercle (Lux et Hinchliff, 1985)	25
Figure II.10	Coefficient de la crête pour le déversoir en labyrinthe (Tullis, 1995)	26
Figure II.11	Piano Key Weir sur barrage Goulours (EDF – France)	29
Figure II.12	Représentation en 3D d'un élément de déversoir en touches de piano et définition de ses paramètres géométriques (. Pralong et al, 2011)	31
Figure II.13	Paramètres fondamentaux du PK-Weir - vue en plan et en coupe transversale (Pralong et al, 2011)	31
Figure II.14	Différents types du PK-Weir (Machiels et al, 2013)	32
Figure II.15	Coefficient de débit en fonction du rapport de l'aspect vertical W_u/P (Ouamane, 2006)	33
Figure II. 16	Effet de la hauteur de PK-Weir (Epicum et Machiels, 2013)	34
Figure II.17	Coefficient de débit en fonction du ratio L/W (.Ouamane et al, 2006)	34
Figure II.18	Rapport de débit r en fonction de H/P pour différentes valeurs de L/W_t (Leite Ribeiro et al. 2011)	51
Figure II.19	Coefficient de débit en fonction de la largeur des alvéoles (Ouamane et al, 2006)	35
Figure II.20	Coefficient de débit en fonction de la longueur des porte-à-faux (Ouamane et al, 2006)	36
Figure II.21	Effet de la rehausse (Machiels et al, 2013)	37
Figure II. 22	Coefficient de débit de PK-Weir en fonction de la rehausse (Laiadi et al, 2012)	38
Figure II-23	Fonctionnement du PK-Weir avec encombrement de l'entrée par des corps flottants (Ouamane et al, 2006)	38
Figure II.24	Coefficient de débit en fonction de la présence des corps flottants (Ouamane et al, 2006)	39
Figure II.25	Coefficient de débit en fonction de la charge relative et la contraction latérale (Bouredji, 2012)	39
Figure III.01	Coupe transversal du déversoir standard (Creager) pour l'aménagement d'oued M'chounech	45

LISTE DES FIGURES

Figure III.02	La capacité d'évacuation de déversoir Creager en fonction de la charge	46
Figure.III.03	Schéma Descriptif de l'écoulement sur le déversoir en labyrinthe	48
Figure.III.04	Représentation des paramètres du déversoir en labyrinthe	49
Figure.III.05	Variation du coefficient de débit en fonction de la charge	50
Figure.III.06	La comparaison de capacité d'évacuation entre le déversoir labyrinthe et Creager	51
Figure .III.07	L'écoulement à travers le PK-Weir	52
Figure .III.08	Représentation en 3D d'un élément de déversoir en touches de piano	53
Figure III.09	Performance du PK-Weir en fonction de la charge	55
Figure.III.10	La comparaison de capacité d'évacuation entre le déversoir PK-Weir et Creager	56
Figure.III.11	La comparution de capacité d'évacuation entre le déversoir labyrinthe et Creager	57

LISTE DES TABLEAUX

Liste des tableaux	Titre	Page
Tableau I.1	Valeurs du coefficient β pour différentes valeurs de l'angle d'obliquité du déversoir (LENCASTRE., 1969)	12
Tableau II.01	Les caractéristiques hydrauliques et géométriques principales, des PK-Weir 'existant et planifié' (Leite Ribeiro et al, 2013	30
Tableau II-2	Paramètres géométriques des modèles testés et le gain moyen de débit spécifique avec l'utilisation de rehausse (Machiels et al, 2012).	37
Tableau III. 1	Les débits maximaux fréquentiels au site de l'oued M'chounech sont	45
Tableau III. 2	Le débit en fonction de la charge sur le déversoir Creager	46
Tableau III.4	Le débit en fonction de la charge sur le déversoir en labyrinthe	49
Tableau III. 5	Caractéristique géométrique de PK-Weir	53
Tableau III.6	Le débit en fonction de la charge sur le déversoir en PK-Weir	54

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les rivières présentent le long de leur linéaire un certain nombre d'ouvrages hydrauliques aux fonctions très diverses, mais qui sont, entre autres, des singularités hydrauliques, c'est-à-dire des obstacles physiques qui perturbent l'écoulement.

Trois grandes classes d'ouvrages hydrauliques, considérés comme des singularités hydrauliques, sont fréquemment rencontrées : les vannes, les barrages et les déversoirs. Les ouvrages hydrauliques sont nombreux et génèrent des phénomènes particuliers, difficilement maîtrisables sans une connaissance approfondie de leurs caractéristiques et de leurs fonctions hydrauliques précises

- Un barrage permet de réguler un plan d'eau en fonction du débit. Il peut être mobile ou fixe, il sert alors de réservoir ;
- Une vanne permet de réguler le débit qui la traverse, de manière ponctuelle, tandis que l'orifice laisse passer un débit constant pour une totale emprise de sa section d'écoulement ;
- Un déversoir (appelé parfois déchargeoir) est un ouvrage hydraulique permettant de contrôler ou de mesurer le débit s'écoulant au-dessus de l'ouvrage. Il contracte plus ou moins la section d'écoulement et peut permettre de stopper les érosions régressives, de stabiliser la rivière ou de relever la ligne d'eau.

L'utilisation des déversoirs remonte probablement au moins aux premiers grands aménagements hydrauliques de l'antiquité. Au moyen Âge, l'utilisation croissante des moulins à eau, en complément des moulins à vent impliquait le contrôle des débits, par l'utilisation de vannages, de seuils et de déversoirs pour absorber et étaler d'éventuelles crues brutales.

À cet effet, Notre présente étude a pour objet la comparaison entre le déversoir rectiligne et non rectiligne sur la capacité d'évacuation

Aussi, notre étude s'articulera en trois chapitres principaux :

-Le premier chapitre et le deuxième chapitre sera consacrée à une synthèse bibliographique ayant pour objectif la présentation d'un état des connaissances des différentes théories d'écoulement sur les déversoirs et d'exposer les différents travaux réalisés dans ce type d'ouvrage hydraulique.

- Le troisième chapitre est consacré à l'étude comparative entre le déversoir rectiligne type Creager et le déversoir non rectiligne type labyrinthe et PK-Weir sur la capacité hydraulique et déterminer le type de déversoir la plus efficace pour l'aménagement d'Oued el Lbiadh M'chouneche Qui est actuellement en construction pour l'irrigation de la ville M'CHOUNECHE -wilaya de Biskra-(Projet d'aménagement d'Oued el Lbiadh M'chouneche est un exemple réelle pour cette étude).

Chapitre I
Etat de connaissance
sur les déversoirs
rectilignes

Chapitre I

Etat de connaissance sur les déversoirs rectilignes

I.1 Introduction

Le déversoir est un ouvrage hydraulique utilisé souvent pour la mesure de débit ou comme organe de contrôle de niveau d'eau. Les déversoirs sont réalisés à travers les cours d'eau artificiels ou naturels et dans les retenues où la limitation d'un débit ou d'un niveau d'eau doit être assurée. Ils sont également utilisés en combinaison avec des organes mobiles, en particulier les vannes et les clapets installés sur leurs sommets.

Selon l'alignement du seuil déversant, les évacuateurs de crues sont classés en deux catégories, rectilignes et non rectilignes.

Les déversoirs rectilignes se distinguent par le type d'alignement de la crête qui est disposée sous forme d'une droite de longueur égale à la largeur de l'emprise du déversoir.



Figure I.01 : Ecoulement sur un déversoir rectiligne (Creager).

I.2 Déversoir rectiligne

Lorsque le seuil d'un déversoir est en alignement rectiligne, ce type de déversoir est appelé déversoir rectiligne (figure I.02). Le débit qui transite sur un déversoir rectiligne est étroitement lié à la largeur du déversoir W et la charge sur le seuil h (SINNINGER et al. 1989).

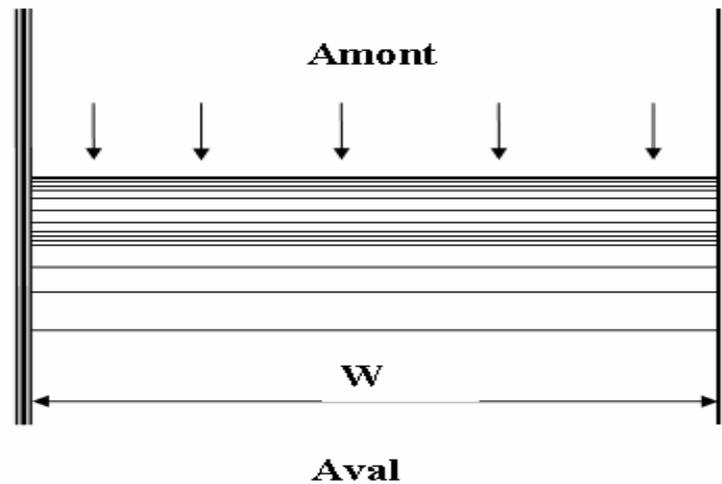


Figure I.02 : Schéma d'un déversoir rectiligne

I.3 Différents types de déversoir rectiligne

On peut classifier les déversoirs, selon plusieurs critères spécifiques (le contrôle du déversement, mode de fonctionnement, le régime d'écoulement, l'alignement de la crête... etc),

I.3.1 Déversoir standard (Creager)

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

Le débit qui transite sur le déversoir est déterminé par l'application d'une relation univoque entre le débit et la hauteur de lame d'eau, appelée relation classique de Poleni :

$$Q = C_d W_t H \sqrt{2gH} \quad (\text{I.01})$$

(Q) est le débit qui transite sur le déversoir (m^3/s), (H) est la charge totale sur le déversoir (m), (W_t) est la largeur du déversoir (m), (g) est l'accélération de la pesanteur (m/s^2). C_d : est le coefficient de débit du déversoir standard qui dépend de la charge (H), le coefficient moyen est estimé d'environ : 0.47 à 0.49 (LADREYT et al., 2005).

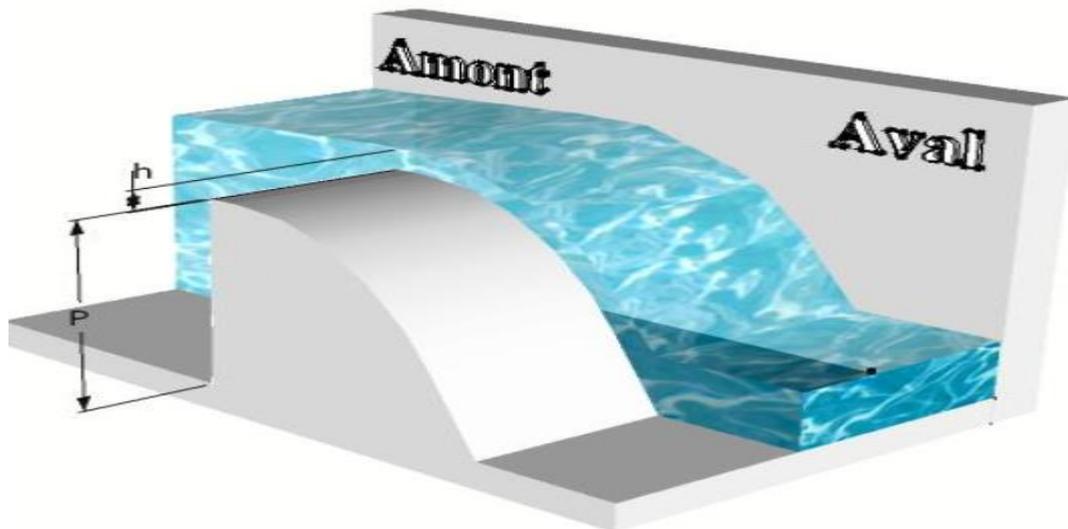


Figure I.03 : Déversoir Creager

La capacité d'évacuation du déversoir standard est liée étroitement à l'importance de la charge sur le seuil :

- Quand la charge sur le seuil du déversoir standard est inférieure à la charge de dimensionnement ($H/H_d < 1$), le déversoir standard est considéré comme surdimensionné et les pressions sur le radier sont plus fortes mais positives, donc acceptable. Dans ces conditions d'écoulement, le coefficient de débit diminue ($C_d < C_{dD}$); $H / H_d \rightarrow 0$; $C_d \rightarrow 0,385$.
- Quand la charge atteint une grandeur égale à la charge de dimensionnement (H_D), ($H/H_d = 1$), l'écoulement sur le déversoir standard correspond à celui d'un déversoir en mince paroi. Dans ces conditions la pression sur le radier est négligeable est le coefficient de débit atteint sa valeur maximale $C_d = C_{dD} = 0,494$.
- Quand la charge sur le seuil dépasse la charge de dimensionnement ($H/H_d > 1$), le déversoir standard est considéré comme sous dimensionné. Ainsi, les pressions sur le radier deviennent négatives (risque de cavitation si $H/HD > 1,4$ ou l'écoulement se sépare du déversoir). Cependant, le coefficient de débit augmente ($C_d > C_{dD}$). En pratique des valeurs de $H/HD = 1.1$ à 1.3 sont acceptées (SINNINGER., 1989).

I.3.2 Déversoir rectiligne à paroi mince

Le déversoir rectiligne ou linéaire compte parmi les plus simples et les plus anciennes structures de mesure et de contrôle du débit d'eau. Ce dispositif forme un obstacle vertical par rapport à l'écoulement dans les canaux et ayant une ouverture sur sa partie supérieure avec une longueur

égale à la largeur du déversoir. En outre, il existe un déversoir rectiligne qui se distingue par une paroi épaisse (Carlier, 1980).

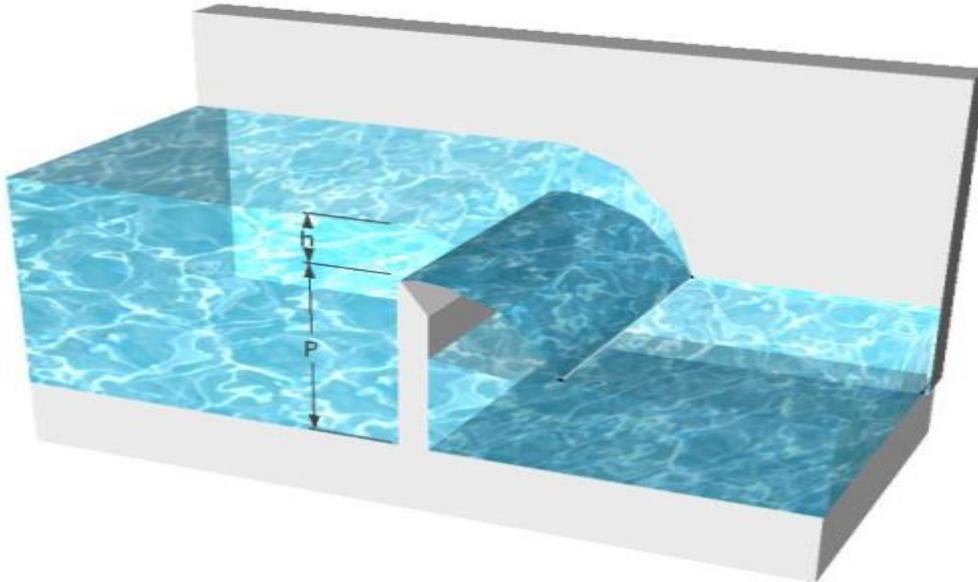


Figure I.04 : Schéma de l'écoulement sur le déversoir mince parois.

Un seuil peut être considéré à paroi mince lorsque $H/L > 1,5$, Lest l'épaisseur du seuil dans le sens de l'écoulement. Tandis que, le seuil dit épais (ou à crête large) quand la hauteur d'eau au-dessus du seuil à l'amont, est inférieure à 1.5 ou à 2 de l'épaisseur du même seuil.(BOUSSINESQ. 1871).

Le débit d'eau sur le déversoir à mince paroi est calculé en fonction des paramètres de cité ci-dessous suivant :

- La charge sur le seuil h .
- La largeur du canal b .
- La forme de la zone de déversement.
- Le coefficient déterminé expérimentalement.

Cette dernière relation montre que le débit d'eau varie avec la charge sur le déversoir, par conséquent ce type d'ouvrage peut être utilisé comme structure de mesure. Un déversoir à crête mince peut être installé d'une manière perpendiculaire, oblique ou latérale et cela par rapport à l'axe longitudinal du canal.

I.3.2.1 Régime d'écoulement sur les déversoirs en mince paroi

Pour une singularité des déversoirs à mince paroi, l'écoulement peut être de trois types :

- Ecoulement noyé, si ($Z_2 > Z_{\text{seuil}}$)
- Ecoulement noyé en dessous, si ($Z_2 < Z_{\text{seuil}}$ et $h_1 < h_2$)
- Ecoulement dénoyé, si ($Z_2 < Z_{\text{seuil}}$ et $h_1 > h_2$)

-Un écoulement est dit « dénoyé » lorsque le niveau d'eau amont est indépendant du niveau d'eau aval. L'écoulement est fluvial à l'amont du seuil, passe en régime torrentiel au droit de l'ouvrage et se raccorde à l'écoulement fluvial en aval soit par un ressaut en dissipant l'énergie par des mouvements très turbulents avec des instabilités à la surface, soit en chute libre.

- Un écoulement est dit « noyé en dessous », lorsque la cote d'eau aval est inférieure à la cote de crête du seuil et que la hauteur d'eau amont (par rapport au seuil) est supérieure à la hauteur d'eau aval (par rapport au seuil).

- Un écoulement est dit « noyé » lorsque le niveau d'eau aval influence le niveau d'eau amont.

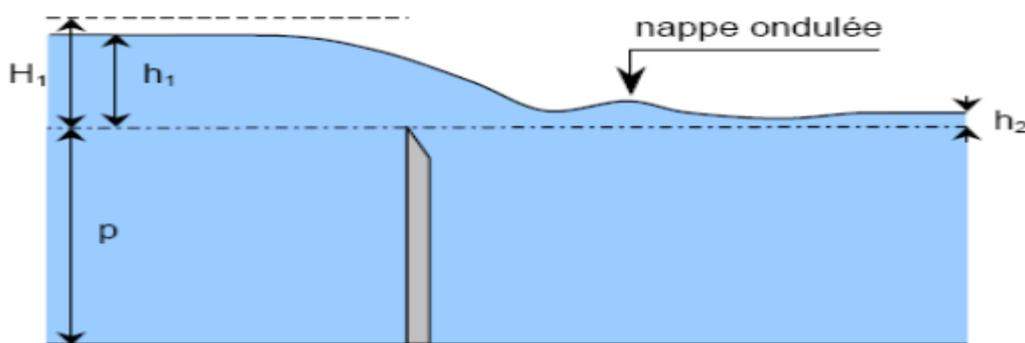


Figure I.05 : Coupe longitudinale d'un déversoir à crête mince en écoulement noyé

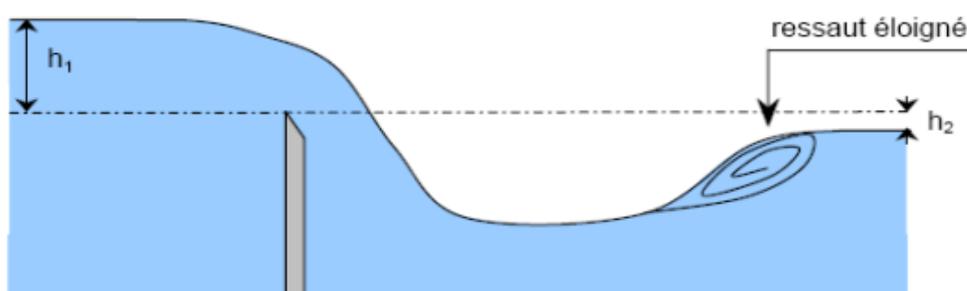


Figure I.06 : Déversoir à crête mince en écoulement noyé en dessous à ressaut éloigné

I.3.2.2 Déversoir rectangulaire sans contraction latérale

Un déversoir rectangulaire est dit « sans contraction latérale » lorsque la largeur d'écoulement sur le déversoir (L) est égale à la largeur d'écoulement (B) en amont du déversoir.

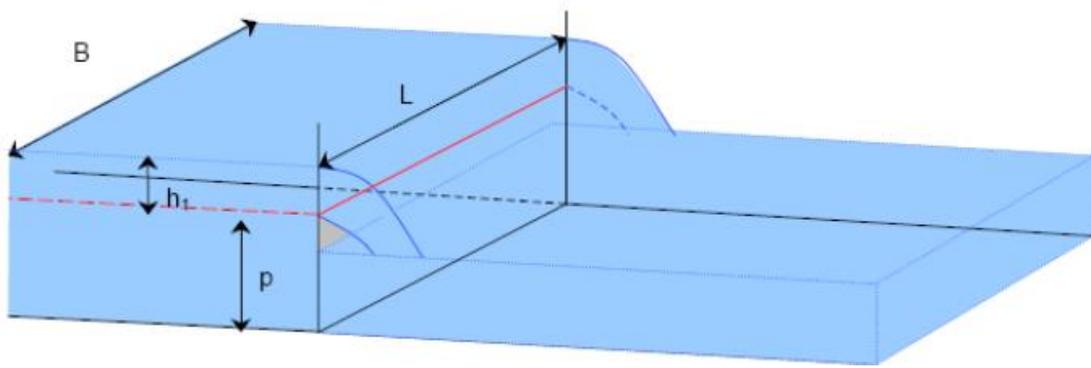


Figure I.07 : Vue en perspective d'un déversoir rectangulaire sans contraction latérale

I.3.2.3 Déversoir rectangulaire avec contraction latérale

Un déversoir rectangulaire est dit « avec contraction latérale » lorsque la largeur du canal (B) est supérieure à la largeur d'écoulement (L) du déversoir.

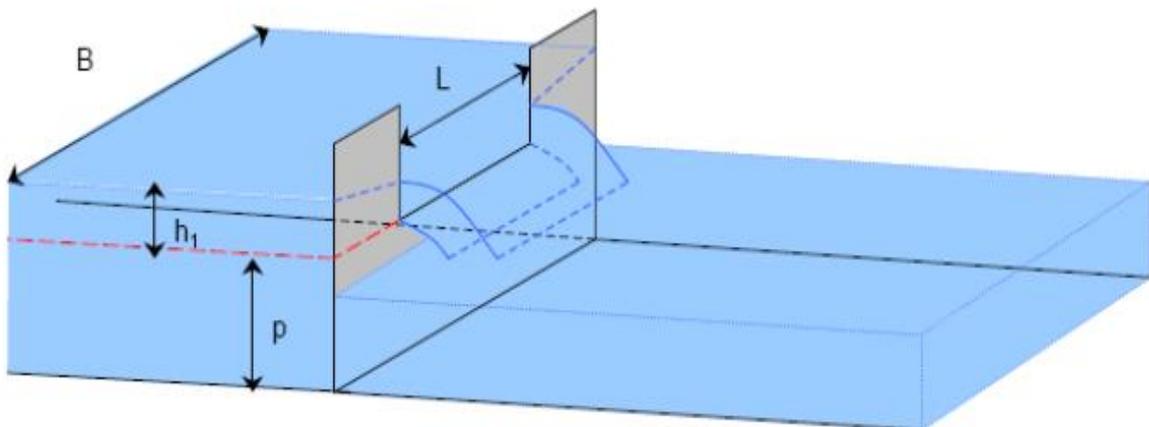


Figure I.08 : Vue en perspective d'un déversoir rectangulaire avec contraction latérale

I.3.2.4 Déversoir à échancrure triangulaire

Le déversoir triangulaire en mince paroi est un dispositif très précis pour les mesures de débits. Il doit être formé d'une échancrure en V symétrique, située dans une mince paroi verticale. La paroi du déversoir doit être lisse et plane (figure I-12). La formule générale du débit pour un déversoir triangulaire en mince paroi est :

$$Q = \frac{8}{15} CH^2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \sqrt{2gH} \quad (\text{I.02})$$

Où:

Q : débit (m^3/s)

C : coefficient de débit

g : accélération de la pesanteur (m/s^2)

α ; l'angle formé par les parois de l'échancrure ($^\circ$)

H_e : hauteur de la surface liquide amont par rapport au point bas de l'échancrure (m).

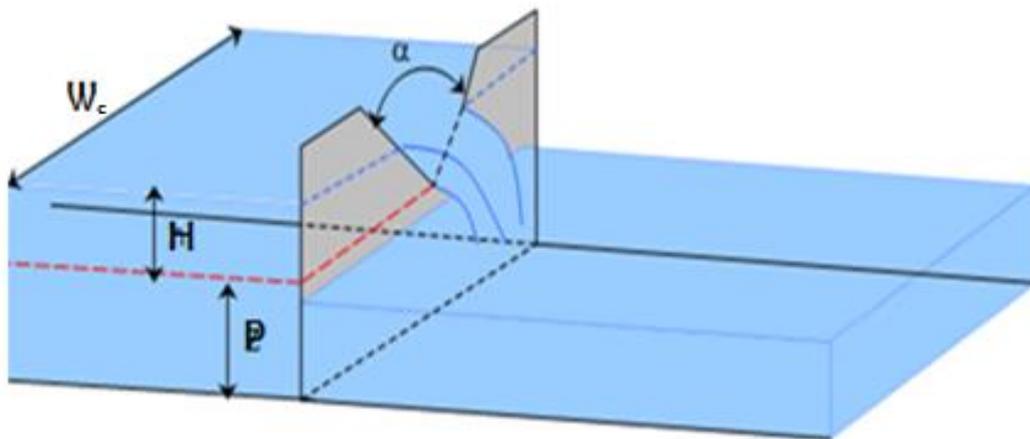


Figure I.09 : Déversoir triangulaire à paroi mince

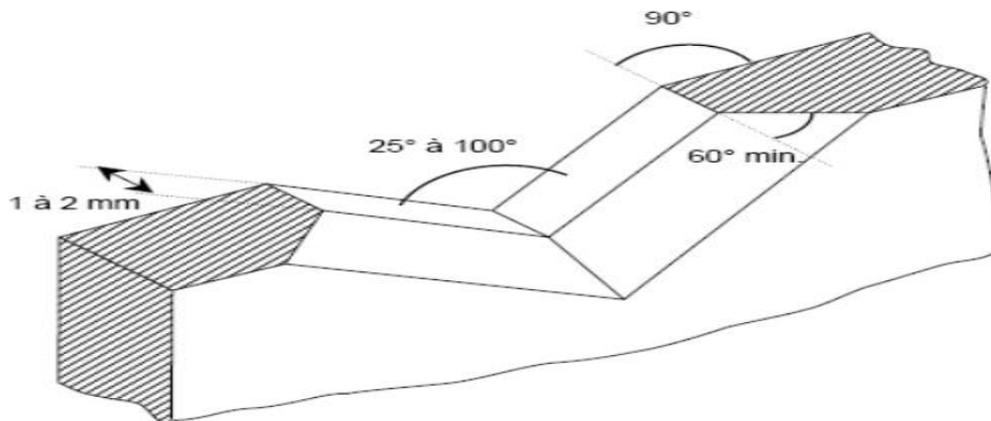


Figure I.10 : Forme de la crête d'un déversoir à échancrure triangulaire

I.3.2.4 Déversoir trapézoïdal

D'une manière générale, la section de contrôle d'un déversoir trapézoïdal a la forme d'un trapèze isocèle. Le déversoir trapézoïdal le plus fréquemment utilisé est désigné par déversoir Cipolletti.

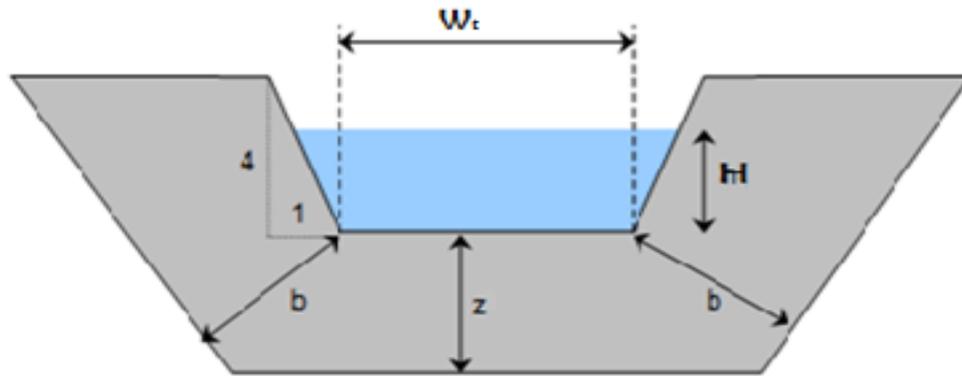


Figure I.11: coupe transversale d'un déversoir de Cipolletti

Cipolletti a imaginé un déversoir trapézoïdal dont l'angle α est tel que $\text{tg}\alpha = 1/4$, ce qui permet de compenser l'influence de la contraction due aux joues par l'augmentation de la largeur superficielle de la nappe due à la forme de l'échancrure, de manière à conserver un coefficient C constant pour une large plage de variation de la charge H (Lencastre, 1957)

Le débit du déversoir trapézoïdal de Cipolletti est donc donné par la formule générale :

$$Q = CW_t H \sqrt{2gH}$$

C'est Consente quelle que soit H (voisin de 0,422)

La formule de Cipolletti s'écrit donc sous forme simplifiée :

$$Q = 1.86 W_t H^{\frac{3}{2}} \quad (\text{I.03})$$

Les limites d'application :

$0,06\text{m} < H < 0,60$; $H/W_t < 0,5$; $\alpha > 2H$, avec minimum de 0,30 ; $b > 2H$, avec un minimum de 0,30m.

I.3.3 Déversoir circulaire

La forme circulaire d'une crête de déversoir produit un écoulement différent de celui de déversoir à crête rectiligne. Généralement, le déversoir circulaire est constitué d'une corolle, d'un puits vertical suivi d'une galerie horizontale. Cette disposition provoque un écoulement vertical, en conséquence la lame d'eau déversante reste collée à la paroi du puits en laissant un noyau libre pour la circulation de l'air qui est dérivés dans la galerie sans perturber l'écoulement.

L'écoulement sur ce type de déversoir doit être guidé en direction radiale aux moyens des piliers placés sur le périmètre de la corolle. La figure (I.12) présente un déversoir avec une crête circulaire.

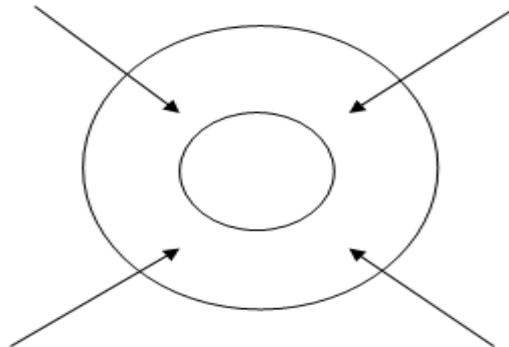


Figure I.12 : Déversoir à crête circulaire

I.3.4 Déversoir incliné

Un déversoir incliné (figure I.13) a une crête perpendiculaire à l'axe du canal, mais le plan qui le contient est incliné par rapport à la verticale. En considérant l'angle d'inclinaison (i), d'après la théorie de (BOUSSINESQ., 1871), le coefficient de débit de ce type de déversoir est égal au produit du coefficient de débit d'un déversoir vertical par un coefficient K :

$$K = 1 - 0,3902 (i/180) \quad (\text{I-04})$$

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

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

$$Q = CW_i H \sqrt{2gH}$$

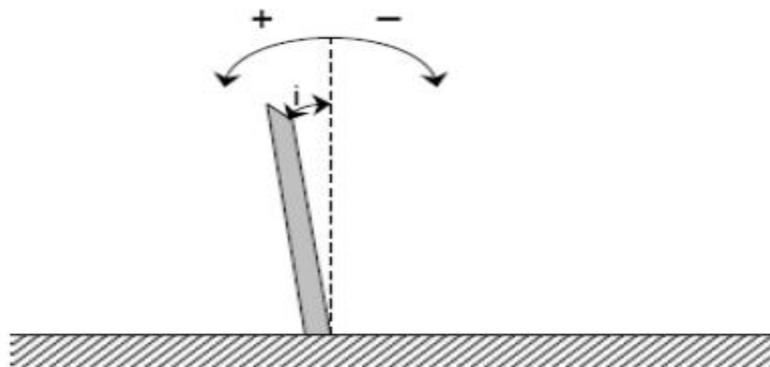


Figure I.13 : Coupe longitudinale d'un déversoir incliné

I.3.5 Déversoir oblique

C'est un déversoir vertical dont la crête est disposée obliquement par rapport à l'axe longitudinal du canal dans lequel il est placé (figure I.14).

Jusqu'ici, les formules proposées ont été établies dans le cas où le seuil considéré était implanté perpendiculairement à l'écoulement. Il est possible de tenir compte d'une direction du seuil qui soit quelconque par rapport à la direction de l'écoulement.

Il suffit d'effectuer le calcul comme pour un déversoir perpendiculaire à l'écoulement et de pondérer ensuite par un coefficient afin d'obtenir la loi d'écoulement voulue.

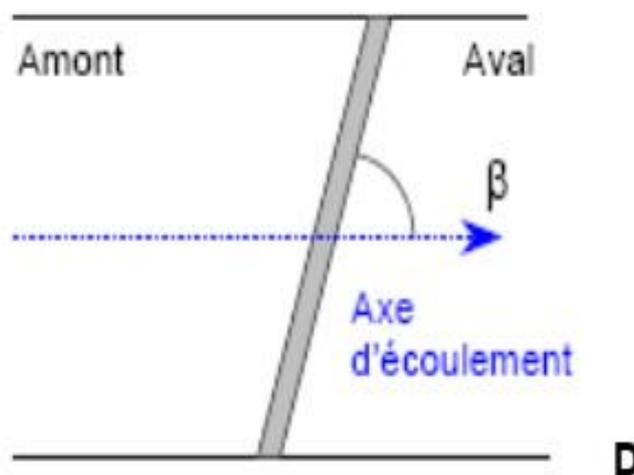


Figure I.14 : Vue en plan d'un déversoir oblique

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

$$Q = [1 - (h\beta/P)]Q_n \quad (I-05)$$

Où:

Q_n : le débit d'un déversoir de même largeur et de même type disposé perpendiculairement à l'axe longitudinal du canal ($\varepsilon = 90^\circ$)

β : fonction empirique sans dimension de l'angle ε

Tableau I.1 : Valeurs du coefficient β pour différentes valeurs de l'angle d'obliquité du déversoir (*LENCASTRE., 1969*)

ϵ	β
< 15°	-
15°	0.691
20°	0.526
25°	0.420
30°	0.357
35°	0.298
40°	0.244
45°	0.200
50°	0.166
55°	0.139
60°	0.110
65°	0.084
70°	0.061
75°	0.048
90°	0

I.3.6 Déversoir a seuil épais (large seuil)

Le déversoir est considéré à seuil épais dans le cas où la largeur du seuil est suffisamment grande pour quelle 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.15), peut s'imposer notamment pour des phases de construction de barrages. 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 le coefficient de correction (c_e) dans la formule générale du déversoir en mince paroi. (TISON., 1950).

$$Q = \overline{C_d} c_e b \sqrt{2gH}^{3/2} \quad (I.06)$$

Où :

Q : Débit évacué (m^3/s)

C_d : Coefficient de débit

c_e : Coefficient de correction

b : Largeur du déversoir (m)

H : Charge totale sur le déversoir (m)

g : Accélération de l'apesanteur (m/s^2)

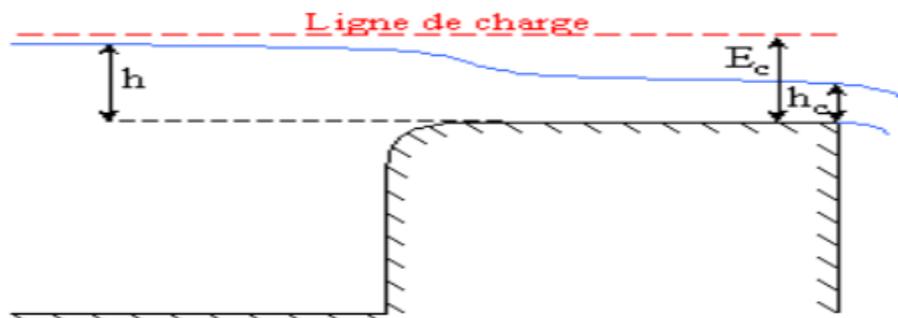


Figure I.15 : Déversoir à seuil épais

Les déversoirs à seuil épais se différencient par la longueur longitudinale du seuil, la forme d'entrée (avec ou sans contraction latérale) et par la forme du parement amont de la crête (arrondie ou vive). Sa construction dans un canal rectangulaire est relativement facile ; il offre un passage facile aux corps flottants, et il est solide et peu altérable.

I.3.6.1 Régime d'écoulement sur un déversoir à crête épaisse

Deux types d'écoulement se caractérisent le déversoir à seuil épais, selon le tableau (I.02) :

Tableau I.02 : Détermination du type d'écoulement pour le déversoir à crête épaisse

Déversoir	Écoulement noyé	Écoulement dénoyé
à crête épaisse	$\frac{h_2}{h_1} > \varphi$ avec $\varphi \in \left[\frac{2}{3}; 0,82 \right]$ avec $Z_2 > Z_{\text{seuil}}$	$Z_2 < Z_{\text{seuil}}$ OU $\frac{h_2}{h_1} < \varphi$ avec $\varphi \in \left[\frac{2}{3}; 0,82 \right]$ avec $Z_2 > Z_{\text{seuil}}$

Où :

h_1 : hauteur d'eau amont au-dessus du seuil (m)

h_2 : hauteur d'eau aval par rapport au seuil (m) (au-dessus ou au-dessous de la crête du seuil)

Z_{seuil} : cote de la crête du seuil (m)

Z_2 : cote de la surface libre de l'écoulement à l'aval du seuil hors du remous (m)

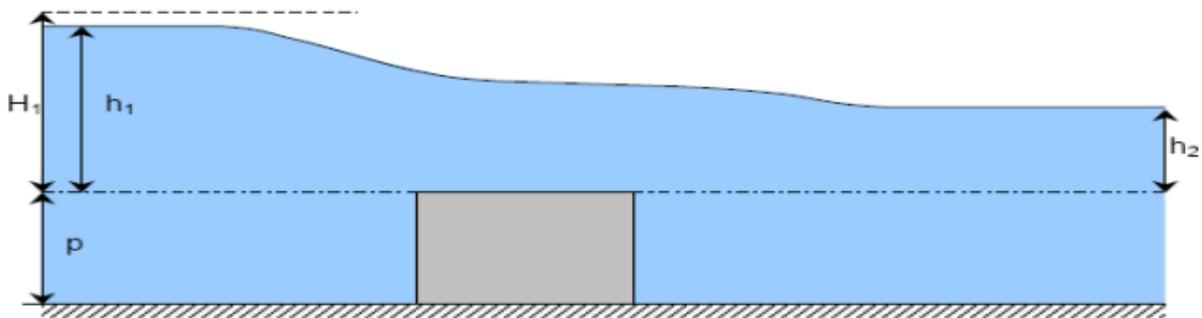


Figure I.16 : Coupe longitudinale d'un déversoir à crête épaisse en écoulement noyé

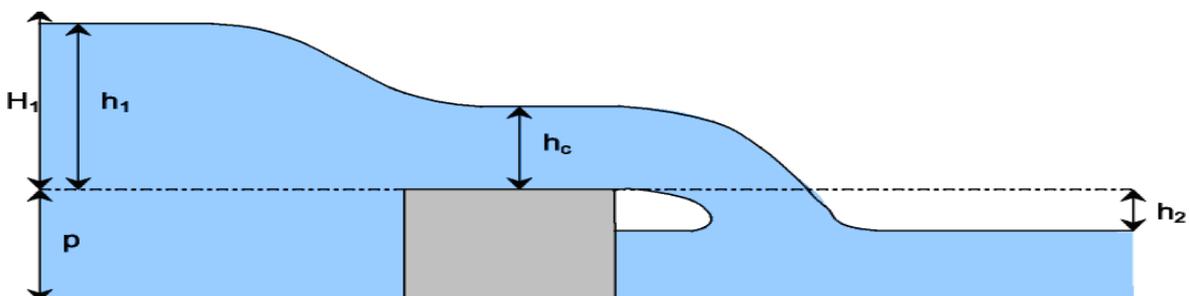


Figure I.17 : Coupe longitudinale d'un déversoir à crête épaisse en écoulement dénoyé

I.3.6.2 Type des déversoirs à crête épaisse

On distingue deux principaux types selon la configuration géométrique du déversoir :

- Déversoir de forme triangulaire
- Déversoir de section trapézoïdale

➤ **Déversoir à seuil épais à profil triangulaire**

Ce type de déversoir, de par sa géométrie, engendre deux formulations de débit. L'utilisation de l'une ou l'autre de ces formulations est conditionnée par le fait que la hauteur d'eau (h_c) au-dessus du seuil (dans la section de contrôle) soit supérieure ou non à la hauteur de la limite supérieure de la section triangulaire du seuil (tr).

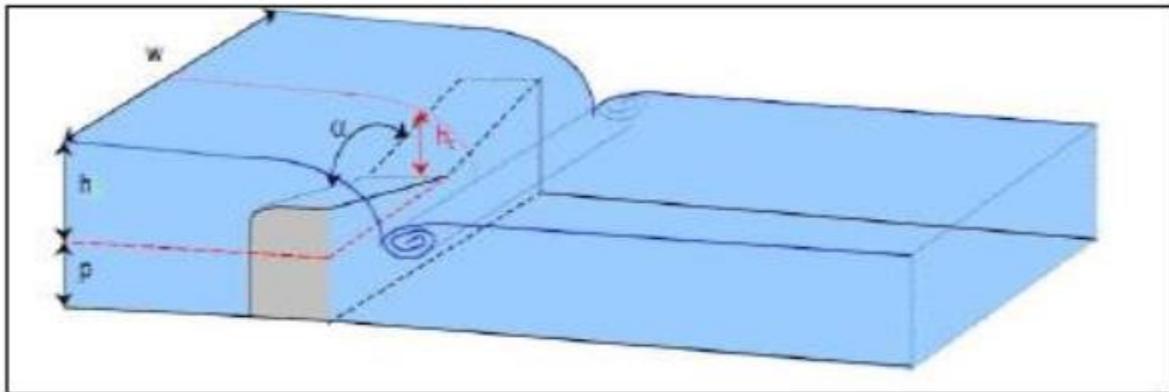


Figure I.18 : Vue en perspective d'un déversoir à seuil épais à profil triangulaire

➤ **Déversoir de section trapézoïdale**

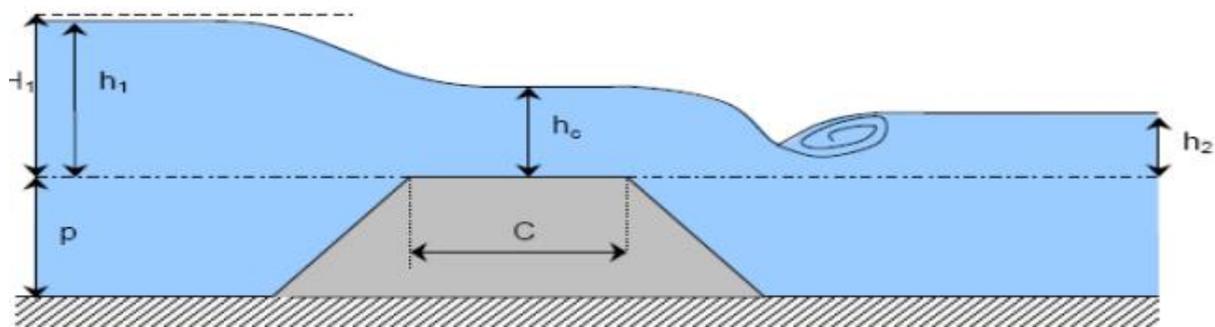


Figure I.19 : Coupe longitudinale d'un déversoir à crête longitudinale trapézoïdale

I.4 CONCLUSION

La recherche bibliographique de ce chapitre a eu pour objectif de passer en revue les principaux travaux effectués dans le domaine des déversoirs rectilignes. Cette étude nous a permis de définir la géométrie, le mode d'écoulement des différents types de déversoirs rectilignes et leurs rendements de point de vue hydraulique.

La recherche bibliographique sur les déversoirs rectilignes a montré que :

Les principaux types de déversoirs rectilignes sont :

- ❖ Déversoirs standard.
- ❖ Déversoirs à mince paroi ;
 - Déversoir sans contraction latérale
 - Déversoir avec contraction latérale
 - Déversoir à échancrure triangulaire
 - Déversoir trapézoïdal
 - Déversoir circulaire
 - Déversoir incliné
 - Déversoir oblique
- ❖ Déversoirs à seuil épais ;
 - Déversoir de forme triangulaire
 - déversoir de section trapézoïdale

- Ainsi, la bibliographie a montré que pour une singularité à crête mince, l'écoulement peut être de trois types (écoulement noyé, écoulement noyé en dessous, écoulement dénoyé), tandis que pour une singularité à crête épaisse, l'écoulement ne peut être que de deux types (écoulement noyé, écoulement dénoyé).

- Les déversoirs à seuil épais offre un passage facile aux corps flottants, et il est solide et peu altérable.

- Ces types des déversoirs peuvent utilisés comme dispositifs de mesure de débit (Débitmètre), et peuvent utilisés comme des évacuateurs de crues.

- Leurs rendements hydrauliques sont très faibles devant les déversoirs non rectilignes.

Chapitre II

Etat de connaissance sur les déversoirs non rectilignes

Chapitre II

Etat de connaissance sur les déversoirs non rectilignes

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.

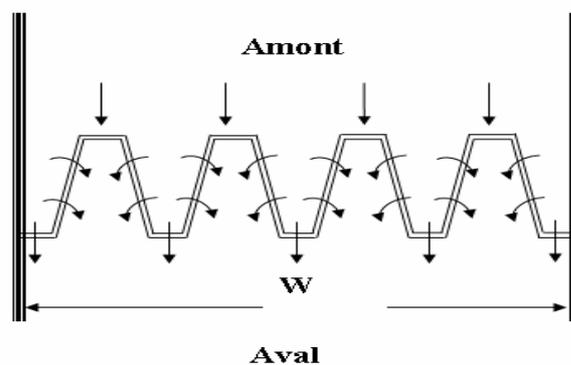


Figure II.01 : Déversoirs non rectiligne

II.2 Différentes formes des déversoirs non rectilignes

II-2.1 Déversoir en Labyrinthe

II.2.1.1 Définition

Le déversoir en labyrinthe (Figure II.02) se caractérise par une crête à axe discontinu (plié) en plan, ce qui favorise l'allongement de la crête de manière remarquable par rapport à la largeur disponible qu'occupe un déversoir linéaire. L'objectif de cette conception est d'augmenter la capacité de débit par unité de largeur pour une charge d'eau donnée.

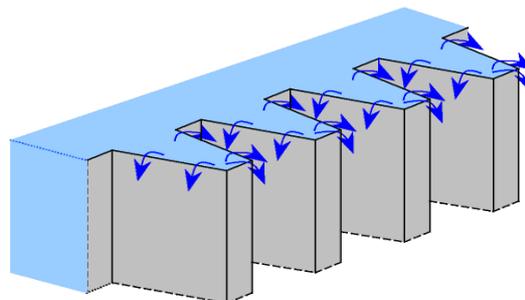


Figure II.02 : Vue en perspective d'un déversoir labyrinthe.

Ce type de déversoir représente la structure idéale pour faire passer de grandes crues à une charge comparativement faible, ceci, fait que ce type de déversoir représente une solution efficace quand la largeur du déversoir est limitée par la topographie et / ou la hauteur d'eau sur le seuil est limitée. Le déversoir en labyrinthe permet au seuil déversant d'être surélevé pour la même crue et le même niveau maximum, ainsi, il fait augmenter d'une manière significative la capacité de stockage du réservoir. La conception de déversoir en labyrinthe est aussi économiquement avantageuse à cause de la réduction des dépenses structurelles.

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 répondues sont les formes symétriques trapézoïdales, triangulaires, rectangulaires, curvilignes ou la combinaison de deux de ces formes (figure II.03).

Cependant, la forme trapézoïdale symétrique est considérée comme la forme la plus avantageuse à cause des facilités de construction et de sa performance hydraulique (Lempérière et al. 2003).

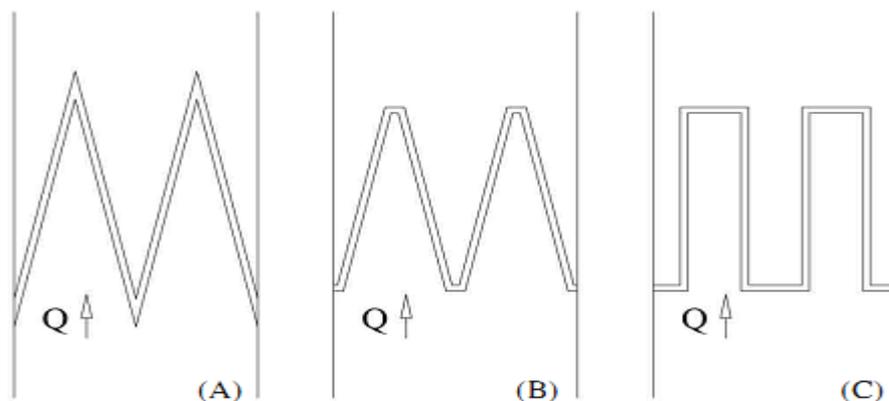


Figure II.03: Différentes formes de déversoir en labyrinthe: Triangulaire (A), trapézoïdale (B), et rectangulaire (C)

La figure (II.04) définit les paramètres utilisés généralement pour exprimer la géométrie d'un déversoir en labyrinthe. Cette géométrie est définie par, la longueur développée L , la longueur de la paroi latérale B , la largeur d'un cycle W , la largeur totale de déversoir Wt , la hauteur des parois P , la largeur de l'alvéole d'entrée a , la largeur de l'alvéole de sortie b , le nombre de cycles n et l'angle α formé par la paroi latérale et la direction de l'écoulement.

Pour un développement de la longueur donnée, 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/Wt .
- 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 de la crête.

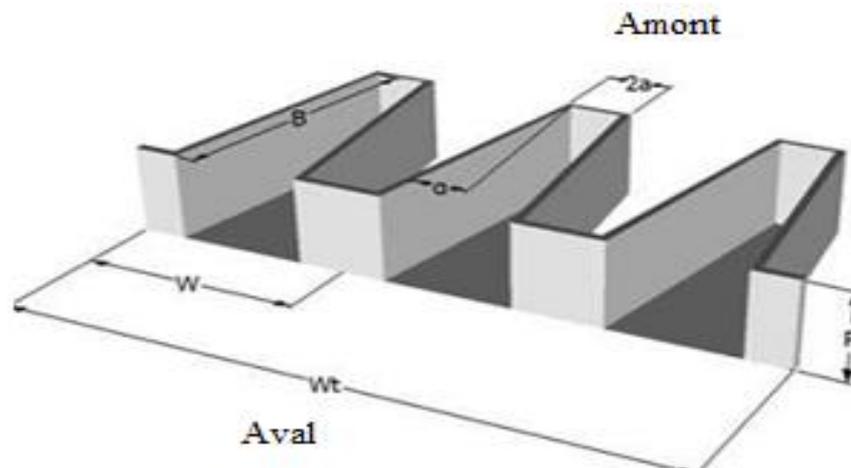


Figure II.04 : Représentation des paramètres du déversoir en labyrinthe (Ben Saïd et al. , 2011)

II.2.1.3 Paramètres affectant la performance de déversoir en labyrinthe

Plusieurs études ont été effectuées dans le domaine du labyrinthe pour déterminer expérimentalement l'influence des différents paramètres géométriques et d'écoulement sur la performance hydraulique du déversoir en labyrinthe.

La première étude rapportée par la bibliographie sur le déversoir en labyrinthe a été réalisée par Gentilini (1941), plusieurs configurations des déversoirs triangulaires en plan et crête mince non rectiligne ont été testés et comparés avec les déversoirs rectilignes inclinés et perpendiculaires au sens de l'écoulement (figure II.05). Gentilini (1941) a comparé le rapport du coefficient de débit de Bazin/Rehbock pour les déversoirs rectilignes avec ces configurations de déversoirs non rectilignes en fonction du rapport entre la charge et la hauteur de déversoir (figure.II.06).

Faisant suite au travail de Gentilini, Hay et Taylor (1970), ont étudié l'effet des différents paramètres (W/P , L/W , H/P , α et n) sur la performance du déversoir en labyrinthe. Les résultats de ces travaux ont été considérés comme une base pour la conception de ce type de déversoir.

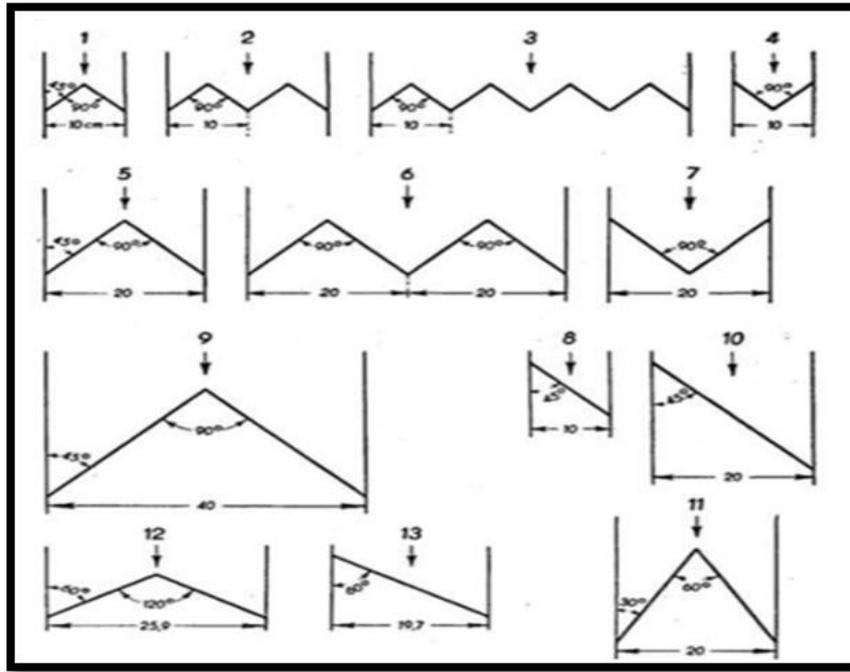


Figure II.05 : Différentes configurations triangulaires des déversoirs rectilignes et non rectilignes testées par Gentilini (1941).

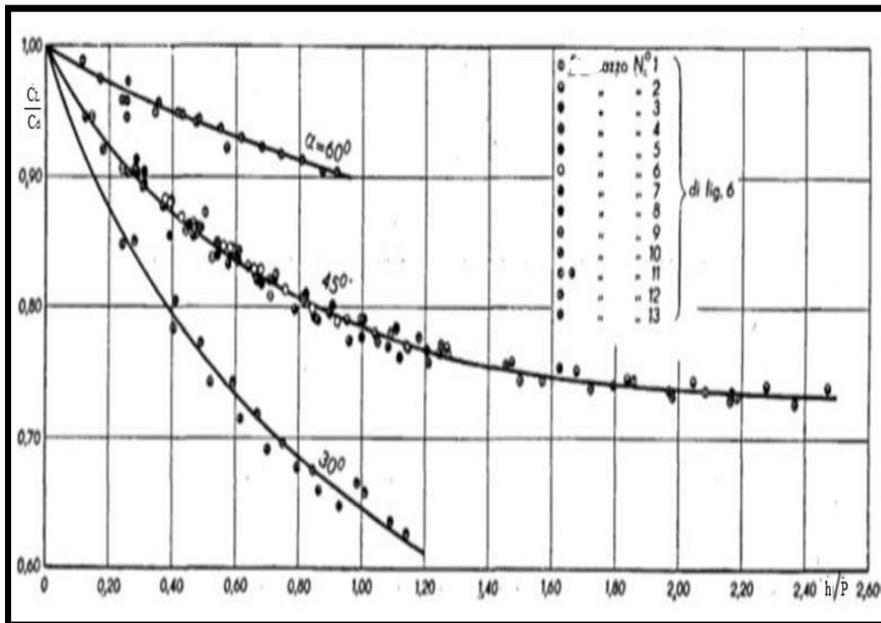


Figure II.06 : Rapport de coefficient de débit C_L / C_n en fonction de la charge relative (Gentilini, 1941).

II.2.1.3.1 Impact l'accroissement de la longueur L/W

Les caractéristiques géométriques du labyrinthe ont été présentées pour la première fois en termes adimensionnels par Hay et Taylor, ainsi, l'accroissement de la longueur L/W signifie l'allongement de la crête pour une largeur donnée du déversoir, Hay et Taylor (1970) ont indiqué que l'augmentation de la longueur de la crête augmente la performance du déversoir

en labyrinthe. Cependant, les essais effectués dans ce sens ont montré que cet avantage est limité à une charge relative $H/P=0,5$.

II.2.1.3.2 Impact la charge relative H/P

Les différents travaux de recherche qui ont été réalisés par Hay et Taylor, (1970), Magalhães, (1985), et Tullis (1995) ont montré que l'accroissement du coefficient de débit et par conséquent la performance est plus significatif lorsque la charge relative H/P est inférieure à 0,9. Ceci fait remarquer que l'accroissement de la charge de fonctionnement agit directement sur le coefficient de débit, ce qui fait diminuer l'efficacité du déversoir en labyrinthe qui approche celle d'un déversoir rectiligne. Par contre, le déversoir en labyrinthe peut encore fonctionner à des grandes charges mais l'avantage principal de la conception du labyrinthe disparaît progressivement au fur et à mesure que la charge augmente.

II.2.1.3.3 Impact du rapport d'aspect vertical W/P

L'influence du rapport d'aspect vertical W/P a fait l'objet d'étude par Hay et Taylor 1970, les résultats obtenus ont montré que la performance de déversoir en labyrinthe est indépendante de ce paramètre, les auteurs ont recommandé que, pour les déversoirs de forme trapézoïdale le rapport W/P doit être supérieur à 2. Ces recommandations ont également été faites par d'autres chercheurs, mais pour des intervalles des valeurs différents, on peut citer, Tullis et al (1995) ($3.0 \leq W/P \leq 4.0$), Magalhães et Lorena (1985) ($W/P \geq 2.5$), Lux et al (1985). Ces derniers ont précisé que le coefficient de débit diminue lorsque W/P décroît.

II.2.1.3.4 Impact d'angle de paroi latérale

La forme triangulaire paraît avoir une meilleure performance hydraulique, cependant, l'interférence de la nappe générée à partir du coin formé par l'intersection des deux parois est plus grande que celle de la forme trapézoïdale (Crookston, 2010. Hay et Taylor, 1970). Si la forme trapézoïdale en plan doit être utilisée, Hay et Taylor (1970) ont recommandé que l'angle de paroi latérale ne doive pas être inférieur à 0,75.

II.2.1.3.5 Impact de nombre de cycle n

Souvent le déversoir en labyrinthe est composé de plusieurs cycles de même configuration géométrique, les essais de Hay et Taylor, ont montré qu'aucun changement significatif de la performance n'est détecté si on fait varier le nombre de cycle du déversoir en labyrinthe, ainsi, on peut dire que la performance du labyrinthe est indépendante du nombre de cycles n

II.2.1.3.6 Impact de l'interférence en aval

Le déversoir en labyrinthe peut être affecté par la noyade si le niveau aval est proche de la hauteur du déversoir, ce qui est le cas quand le déversoir est utilisé comme régulateur de niveau dans les cours d'eau naturels. 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 charge d'eau totale en aval dans les conditions d'écoulement noyé. Selon l'étude effectuée par Hay (1970), la performance du déversoir en labyrinthe n'est affectée par le niveau d'eau aval que si ce dernier dépasse le niveau de la crête du déversoir.

Pour déterminer l'effet de la noyade sur la performance d'un déversoir en labyrinthe, Tullis (2007) a expérimenté trois déversoirs en labyrinthe de géométrie différente, avec un angle α de 7° , 8° et 20° et avec des longueurs de crête (L) respectivement, de 7.97 m, 7.03 m et 3.07m. Les autres paramètres géométriques des trois déversoirs testés ont été maintenus constants. Les résultats obtenus dans des conditions de noyade ont montré, quand le rapport adimensionnel H_d/H_o tend vers zéro (H_o est la charge totale amont dans les conditions d'écoulement libre), 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, $H^*/H_o = 1$, H^* étant la charge totale en amont dans les conditions d'écoulement noyé). 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.07), 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.

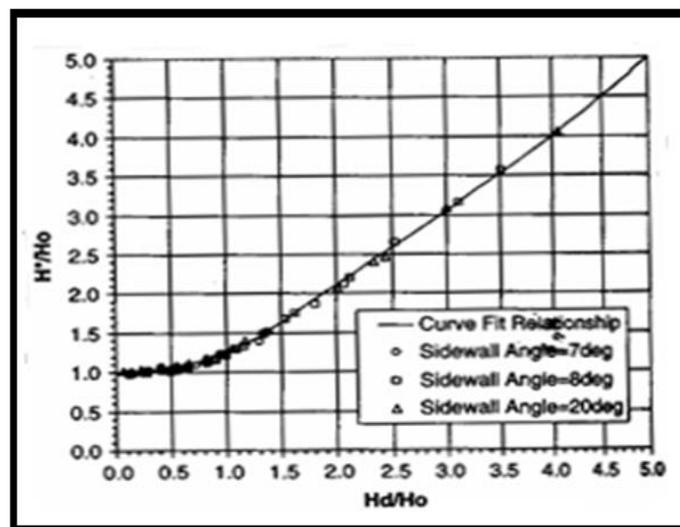


Figure II.07 : Rapport sans dimension décrivant la performance de déversoir en labyrinthe noyé (Tullis, 2007).

II.2.1.3.7 Impact de la largeur des alvéoles amont est aval

L'impact de la largeur des alvéoles amont est aval de la configuration rectangulaire du labyrinthe et la forme d'entrée ont été étudiées par Ben Said et Ouamane (2007) au laboratoire Aménagements Hydrauliques et Environnement à l'Université de Biskra. Cette étude a montré que l'accroissement du rapport a/b fait augmenter automatiquement les performances du déversoir en labyrinthe. Le coefficient de débit pour le rapport $a/b = 1,5$ est nettement supérieur à celui d'un rapport $a/b = 1$ et celui-ci est supérieure à celui du rapport $a/b = 0,67$. (figure II.08 A).

II.2.1.3.8 Impact de la forme d'entrée

L'étude de Ben Said et Ouamane (2007) a fait remarquer que l'écoulement sur le déversoir en labyrinthe est très sensible à la forme d'entrée, souvent ce type de déversoir est conçu avec une forme d'entrée plane, ceci peut provoquer une perturbation de l'écoulement au niveau de la section d'entrée des alvéoles amont ce qui engendre une diminution du rendement du déversoir. Selon cette étude (Ben Said et al. 2007), considèrent que les meilleures formes d'entrée de point de vue rendement hydraulique correspondent aux formes d'entrée arrondie et angulaire, qui donnent presque le même rendement pour toute la gamme des valeurs de H/P (figure II.08 B).

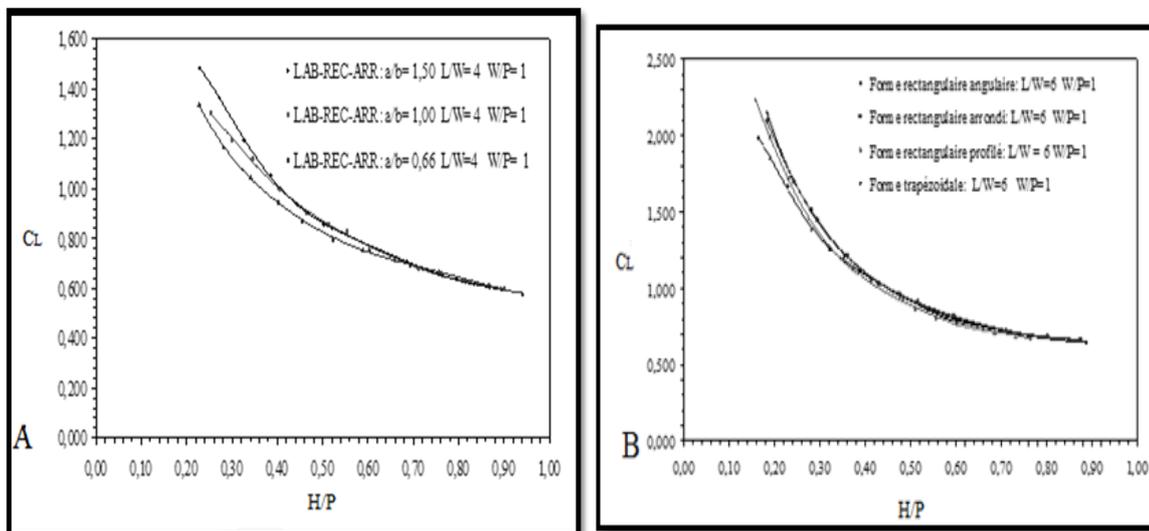


Figure II.08 : Coefficient de débit en fonction de largeur des alvéoles (A) et en fonction de la forme d'entrée du déversoir (B) (Ben Said et Ouamane, 2007)

II.2.1.4 Capacité hydraulique du déversoir en labyrinthe

De manière générale, l'écoulement sur le déversoir en labyrinthe est complexe, il est considéré comme tridimensionnel et le débit déversé dépend de plusieurs paramètres. La solution la plus directe pour exprimer mathématiquement la fonction du débit, implique une combinaison d'analyse dimensionnelle et expérimentale.

Donc, Il existe différentes approches pour calculer la débitante d'un déversoir en labyrinthe, qui se base sur la formule classique de débit

$$Q = CW_t \sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}} \quad (\text{II.01})$$

❖ Approche de Hay et Taylor (1970)

Hay et Taylor ont conduit une large étude (240 modèles) principalement sur un déversoir en labyrinthe triangulaire et avec un nombre limité de déversoirs en labyrinthe de formes trapézoïdales et rectangulaires. Deux formes de crêtes ont été étudiées, une crête mince et demi-circulaire. Ces déversoirs ont été testés pour un : $0.05 \geq H/P \leq 0.55$.

Hay et Taylor ont définies la performance hydraulique en termes d'amplification d'écoulement Q/Q_n (débit du déversoir labyrinthe / débit du déversoir rectiligne) en fonction de H/P , en négligeant la composante de vitesse dans toute les charges et concluent que le débit est relativement indépendant de W_t/P . Ils ont représenté l'efficacité (E) pour déterminer les avantages obtenues d'une augmentation de la longueur de la crête comme :

$$E(\%) = \frac{Q/Q_n}{L/W_t} * 100 \quad (\text{II.02})$$

Les études sur des déversoirs en labyrinthe réalisées par Hay et Taylor (1970) ont été limitées aux labyrinthes symétriques qui ont une forme en plan trapézoïdal ou triangulaire, une forme de crête mince ($R=0$) et une même hauteur du déversoir en amont et en aval ($D=P$). Pour simplifier la réalisation des modèles de déversoir en labyrinthe, tous les modèles ont été construits avec une épaisseur constante de la paroi ($T=12.7$ mm). Bien que le rapport T/P varie entre les modèles de déversoirs en labyrinthe expérimentés, la variation était faible et n'a pas d'effet considérable sur les résultats. En outre, deux valeurs du rapport A/W , ont été utilisées, la première égale zéro, pour la forme triangulaire et la deuxième valeur égale à 0.0765 pour la forme trapézoïdale en plan. La valeur du rapport A/W égal à 0.0765 correspond à 75 pour cent de l'angle maximum de la paroi latérale α (Hay et al. 1970).

En imposant que le du coefficient de débit en fonction des paramètres adimensionnelles :

$$C = f\left(\frac{L}{W_t}, \frac{W}{P}, \frac{H}{P}, \frac{H_d}{p}\right) \quad (\text{II.03})$$

❖ *Approche de Lux et Hinchliff (1985) :*

La première relation mathématique (II.04) qui exprime l'équation de débit pour un déversoir en labyrinthe a été déterminée par *Lux et Hinchliff (1985)* qui ont présenté des courbes de conception pour plusieurs types de déversoirs en labyrinthe, en utilisant une combinaison d'analyse dimensionnelle et expérimentale pour définir le coefficient du débit, on se basant sur l'analyse des moindres carrés.

$$Q = C_w \left(\frac{W/P}{W/P+k} \right) W \cdot \sqrt{g} \cdot H^{3/2} \quad (\text{II.04})$$

Où :

Le paramètre, k qui est une constante obtenue de l'analyse des moindres carrés, elle est égale à 0.18 et 0.10 pour les formes en plan respectivement triangulaire et trapézoïdale. Le coefficient de débit C_w , utilise l'indice (w), puisqu'il est basé sur la largeur du cycle w , et les corrélations du rapport de l'aspect verticales.

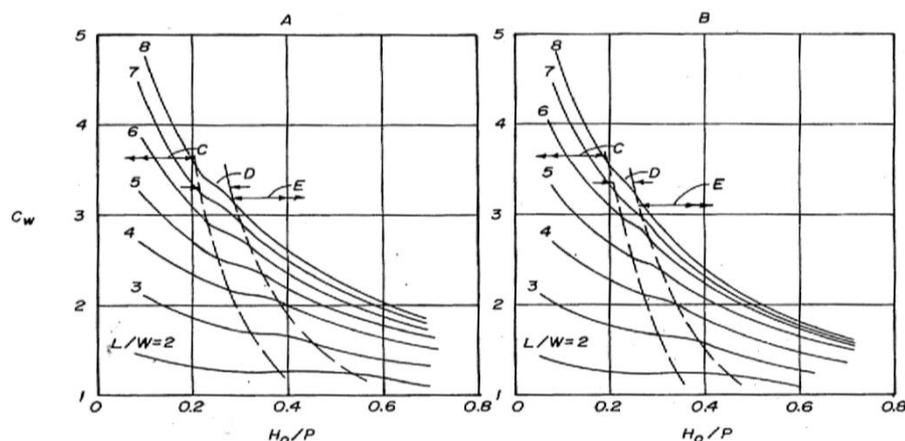


Figure II.09 : Coefficient de débit du déversoir en labyrinthe à crête en quart de cercle (*Lux et Hinchliff, 1985*)

L'utilisation de la crête arrondie a eu pour résultat un coefficient du débit légèrement plus grand qu'un déversoir à crête mince. Cette différence dans les formes de la crête a été

appliquée aux résultats de déversoir en labyrinthe à crête mince pour développer des courbes de la conception pour les crêtes arrondies en quart de cercle de forme triangulaire et trapézoïdale en plan (Figure II.09).

❖ *Approche de Tullis (1995) :*

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

$$Q = \frac{3}{2} CL_e \sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}} \quad (\text{II.05})$$

La charge totale H_t considérée être 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.

L_e désigne la longueur efficace.

Le coefficient de débit est dépendant des mêmes variables qui influencent un déversoir rectiligne en plus de la configuration du déversoir en labyrinthe, et l'angle formé par la paroi latérale et le sens de l'écoulement. A cet effet, l'établissement des données fiables pour le déversoir rectiligne est important pour l'analyse du coefficient de débit du déversoir en labyrinthe parce qu'il représente la limite supérieure des valeurs du coefficient de débit C (Tullis 1995).

Pour déterminer la variation du coefficient de débit de déversoir en labyrinthe, plusieurs modèles de déversoir 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 coefficients de débit pour un déversoir en labyrinthe sont montrés dans la figure (II.10)

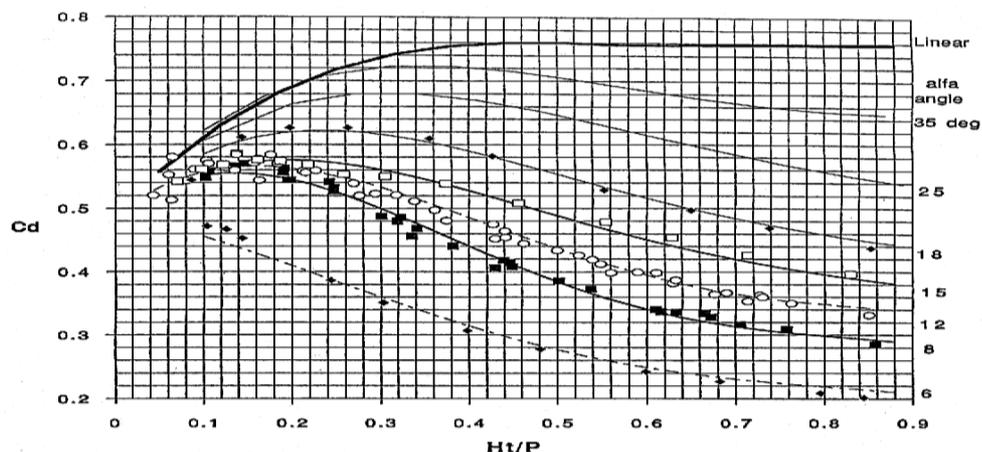


Figure II.10 : Coefficient de la crête pour le déversoir en labyrinthe (Tullis, 1995)

Pour déterminer le débit qui transite par un déversoir en labyrinthe, les équations de régression [(II.06)-(II.13)] ont été déterminées pour la variation de C en fonction de H_t/P .

Les équations sont valides 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 le côté amont); et le rayon de courbure de la crête $R = P/12$.

$$C = 0.49 - 0.24 (H_t/P) - 1.20(H_t/P)^2 + 2.17 (H_t/P)^3 - 1.03 (H_t/P)^4; \quad \text{pour } \alpha = 6^\circ \quad (\text{II.06})$$

$$C = 0.49 + 1.08 (H_t/P) - 5.27 (H_t/P)^2 + 6.79 (H_t/P)^3 - 2.83 (H_t/P)^4; \quad \text{pour } \alpha = 8^\circ \quad (\text{II.07})$$

$$C = 0.49 + 1.06 (H_t/P) - 4.43 (H_t/P)^2 + 5.18 (H_t/P)^3 - 1.97 (H_t/P)^4; \quad \text{pour } \alpha = 12^\circ \quad (\text{II.08})$$

$$C = 0.49 + 1.00 (H_t/P) - 3.57 (H_t/P)^2 + 3.82 (H_t/P)^3 - 1.38 (H_t/P)^4; \quad \text{pour } \alpha = 15^\circ \quad (\text{II.09})$$

$$C = 0.49 + 1.32 (H_t/P) - 4.13 (H_t/P)^2 + 4.24 (H_t/P)^3 - 1.50 (H_t/P)^4; \quad \text{pour } \alpha = 18^\circ \quad (\text{II.10})$$

$$C = 0.49 + 1.51 (H_t/P) - 3.83 (H_t/P)^2 + 3.40 (H_t/P)^3 - 1.05 (H_t/P)^4; \quad \text{pour } \alpha = 25^\circ \quad (\text{II.11})$$

$$C = 0.49 + 1.69 (H_t/P) - 4.05 (H_t/P)^2 + 3.62 (H_t/P)^3 - 1.10 (H_t/P)^4; \quad \text{pour } \alpha = 35^\circ \quad (\text{II.12})$$

$$C = 0.49 + 1.46 (H_t/P) - 2.56 (H_t/P)^2 + 1.44 (H_t/P)^3; \quad \text{pour } H_t/P < 0.7 \text{ et } \alpha = 90^\circ \quad (\text{II.13})$$

La valeur du coefficient de C ne varie pas considérablement avec les petites variations de α . Par conséquent, chacune des équations peut être utilisée pour des angles près de ceux inscrits. Pour les angles différents de plus de 1° des valeurs inscrites pour (II.06)-(II.13), une nouvelle équation de régression devrait être développée.

L'analyse réalisée par Tullis (1995) pour déterminer la validité des équations de régression comparées aux données expérimentales a montré que l'écart moyen entre les valeurs obtenues expérimentalement et les valeurs calculées pour les angles entre 6° et 18° était moins de 3% avec un maximum d'écart d'environ 6%. Par conséquent, les relations (II.06)-(II.13) fournissent une précision suffisante pour $0,1 < H/P < 0,9$. Aucune donnée n'a été utilisée au-dessus de $H/P = 0,9$ puisque le déversoir en labyrinthe devient de plus en plus inefficace pour des charges accentuées. Au-dessous $H/P = 0,1$, la valeur du coefficient de débit C_d est difficile à évaluer expérimentalement, puisque une légère erreur dans les mesures du niveau d'eau ou du niveau de la crête peut causer un changement considérable de la valeur du coefficient de débit.

❖ Approche de B. Tullis et al (2007) :

La méthode de prédiction de la submersion de déversoir linéaire a été développée par Villemonte (1947), généralement cette méthode peut être appliquée aux déversoirs en labyrinthe en absence d'une alternative plus appropriée. B. Tullis et al. (2007) ont développé une relation adimensionnelle de la charge H_d/H_t pour le déversoir en labyrinthe qui est simple à résoudre et a une moyenne d'erreur de prédiction de 0,9%.

$$\frac{H^*}{H_t} = 0.0322 \left(\frac{H_d}{H_t} \right) + 0.2008 \left(\frac{H_d}{H_t} \right)^2 + 1 \quad 0 \leq \left(\frac{H_d}{H_t} \right) \leq 1.53 \quad (\text{II.14})$$

$$\frac{H^*}{H_t} = 0.9379 \left(\frac{H_d}{H_t} \right)^2 + 0.2174 \quad 1.53 \leq \left(\frac{H_d}{H_t} \right) \leq 3.5 \quad (\text{II.15})$$

$$H^* = H_d \quad 3.5 \leq \left(\frac{H_d}{H_t} \right) \quad (\text{II.16})$$

Dans ces équations. H^* est la charge totale en amont sur le déversoir en labyrinthe submergé, H_T est la charge totale en amont sur le déversoir en labyrinthe non submergé, et H_d est la charge totale en aval du labyrinthe.

❖ Approche Kabiri-Samani et al.(2012)

Kabiri-Samani et al (2012) ont réalisé une étude analytique et expérimentale pour étudier le coefficient du débit d'un déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire. Cette approche analytique a été basée sur la combinaison entre les équations de deux déversoirs différents : l'un est vertical, l'autre est latéral. Cette méthode est basée sur la détermination de la contribution de chaque section citée (amont b , aval a et latéral L). À travers l'utilisation des deux méthodes analytique et expérimentale, la suivante équation (II.17) a été élaborée pour calculer le coefficient de débit de ce type de déversoir :

$$C_d = 0.389 + 0.424 \left(\frac{H_0}{P} \right)^{-0.632} \left(\frac{L}{B} \right)^{-0.403} \left(\frac{a}{B} \right)^{0.184} \left(\frac{b}{B} \right)^{-0.613} \quad (\text{II.17})$$

Kabiri-Samani et al. Ont démontré aussi que la largeur des alvéoles en amont du labyrinthe a un impact significatif sur le coefficient du débit : si la largeur des alvéoles continue à augmenter, elle réduit la longueur efficace L_e qui se répercute sur la capacité du labyrinthe.

II-2.2 Déversoir en touche de Piano (PK-Weir)

II.2.2.1 Généralité sur le déversoir PK-Weir

Le déversoir en Touches de Piano (Figure II.11) est une optimisation technico-économique du déversoir en labyrinthe traditionnels. Cette nouvelle forme de déversoir a été développée en 2003, par François Lempérière (Hydrocoop-France) et Ahmed Ouamane (Laboratoire Aménagements Hydrauliques et Environnement de l'Université de Biskra.



Figure II.11 : Piano Key Weir sur barrage Goulours (EDF – France)

Ce nouveau type de déversoir offre les avantages des déversoirs en labyrinthe traditionnels en multipliant par au moins quatre le débit spécifique des déversoirs standards, il offre un entretien et une utilisation aisés, permettant l'évacuation de débits allant jusqu'à $100\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ et favorisant un gain sur la hauteur de la retenue pour un même degré de sécurité. De plus, ils possèdent l'avantage d'avoir un faible coût de réalisation par rapport à un déversoir en labyrinthe. En effet, la présence de porte-à-faux, diminue le volume de béton. La simplicité de sa géométrie permet l'utilisation d'éléments préfabriqués, qui permet de réduire sensiblement les prix de construction de cette ouvrage (Ouamane et al, 2006). Contrairement au déversoir en labyrinthe, les parois frontales du déversoir en touches de piano ne sont pas verticales mais inclinées. Suivant les pentes choisies pour le radier des alvéoles d'entrée et de sortie, le PK-Weir possède des porte-à-faux plus au moins longs, il en résulte ainsi, une base plus réduite que celle du déversoir en labyrinthe avec des murs verticaux. Ceci, engendre une amélioration de la performance hydraulique, pouvant atteindre les 20%.

Depuis son invention, le PK-Weir a fait l'objet d'application sur plusieurs barrages à travers le monde. Le tableau (II.01) liste plusieurs constructions de PK-Weir avec leurs caractéristiques hydrauliques et géométriques principales. Les données qui n'étaient pas disponible en littérature sont indiquées par N/A.

L'utilisation de PK-Weir comme une solution pour la réhabilitation des évacuateurs de crues en service a commencé aux barrages Français, gérés par EDF (Leite Ribeiro et al, 2013). Une quinzaine de PK-Weir ont été construits sur les barrages Français, dont on peut citer : Barrage

Goulours, St-Marc, Gloriettes, Etroit, Malarce, Record, Campauleil, Razisse, Raviège, Beaufort et Gage II.

Plus récemment, plusieurs PK-Weir sont construit ou en phase de construction ou planifiés dans d'autres pays, comme l'Algérie, le Burkina Faso, l'Inde, la Suisse et le Vietnam. Pour certains cas, le débit dépasse 1000 m³/s, et atteint 8700 m³/s comme pour le cas du barrage Van Phong au Vietnam.

Tableau II.01 Les caractéristiques hydrauliques et géométriques principales, des PK-Weir 'existant et planifié' (Leite Ribeiro et al, 2013).

Projet	Pays	Type								Référence principale
			Q	Q=(Q/W)	H _d /P _i	L/W	P _i /W _i	W _i /W _o	S _i	
			m ³ /s	[m ² /s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	
Bambakari	Burkina Faso		1000	5.0	0.27	6.0	2.67	0.77	N/A	Lempérière et al. (2011)
Barrage Gage II	France	A	400	11.8	0.25	7.8	3.75	1.23	0.67	Dugué et al. (2011)
Barrage Raviège	France	B	400	10.4	0.32	0.68	6.8	2.08	1.50	Erpicum et al. (2011)
Malarce	France	A	525	12.3	0.34	8.1	2.67	1.04	0.64	Pinchard et al. (2011)
Goulours	France	A	68	5.7	0.31	4.9	1.15	1.80	0.53	Ribeiro et al. (2009)
St-Marc	France	A	138	7.7	0.32	4.3	1.35	1.41	0.48	Ribeiro et al. (2009)
Etroit	France	A	82	7.0	0.18	6.7	1.76	1.54	0.58	Ribeiro et al. (2009)
Gloriettes	France	A	90	4.9	0.27	4.7	1.30	1.53	0.48	Ribeiro et al. (2009)
Lhasi	India		115	1.0	0.13	6.0	2.17	1.25	N/A	Lempérière et al. (2011)
Barrage Van Phong	Vietnam	N/A	8700	28.9	N/A	5.8	2.09	1.19	N/A	Ho ta Khanh et al. (2011)
Ngan Truoi	Vietnam	N/A	1560	16.3	N/A	5.0	2.04	1.35	N/A	Ho ta Khanh et al. (2011)
Ouldjet mellegue	Algérie	N/A	5240	0.7	0.66	4.8	N/A	1.37	N/A	Pfister et al. (2012)

II.2.2.2 Configuration géométrique de PK-Weir

Sur la base des modèles réduits physiques la configuration géométrique finale du PK-Weir a été définie en l'année 2003 par Lempérière et Ouamane. Cette configuration géométrique se caractérise par : La largeur totale du déversoir (Wt), les hauteurs amont et aval (Po et Pi), les largeurs des alvéoles amont et aval (Wi et Wo), la largeur de cycle (Wu), les longueurs des porte-à-faux amont et aval (Bi et Bo), la largeur de la base (Bb), la longueur d'une paroi latérale ($B = Bi + Bo + Bb$), les pentes des alvéoles amont et aval (Si et So), l'épaisseur de la crête (t), la nombre de cycle (n) et la longueur totale du PK-Weir ($L = nB + n(Wi+Wo)$) (Figure II.12 et 13).

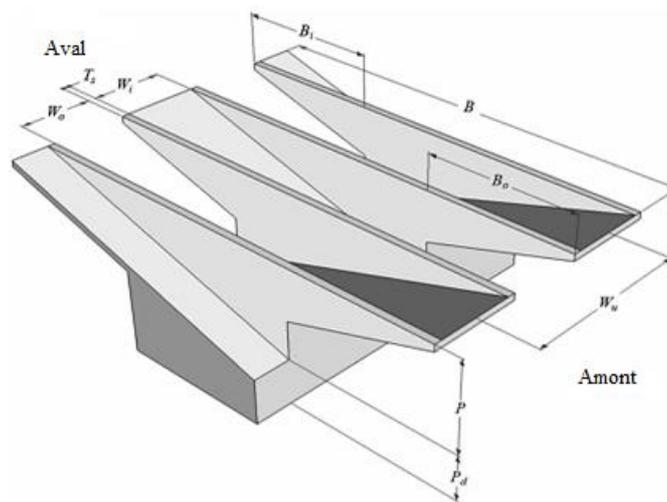


Figure II.12 : Représentation en 3D d'un élément de déversoir en touches de piano et définition de ses paramètres géométriques (. Pralong et al, 2011)

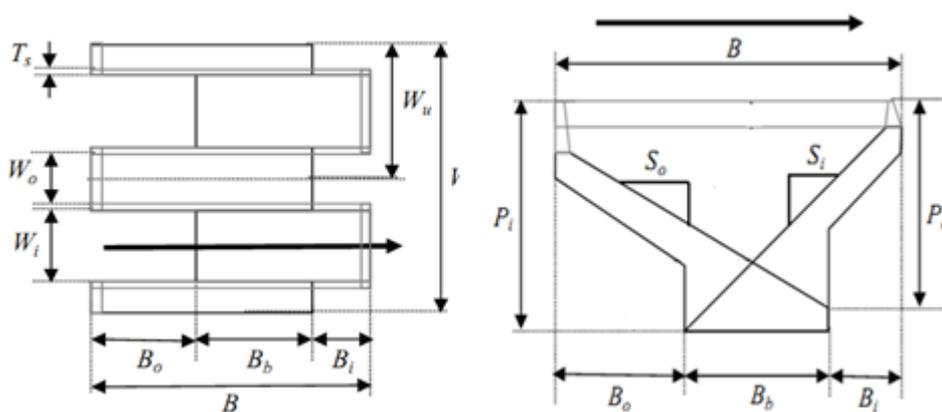


Figure II.13 : Paramètres fondamentaux du PK-Weir - vue en plan et en coupe transversale (Pralong et al, 2011)

II.2.2.3 Différents types de PK-Weir

La terminologie du déversoir en touche de piano désigne un déversoir en plusieurs cycles ayant une inclinaison des radiers de manière alternative vers l'amont et vers l'aval. Cette alternance fait alors penser à des touches de piano. Les parties de déversoir inclinées vers l'amont sont les entrées (alvéoles amont). À l'inverse, celles inclinées vers l'aval sont les sorties (alvéoles aval). Du fait de cette inclinaison, une partie amont et/ou une partie aval peut être en porte-à-faux, on identifie alors plusieurs types de déversoirs PK-Weir en fonction de la configuration géométrique, de la présence ou non de porte-à-faux en amont ou en aval de l'ouvrage (Figure II.14). Le type A avec des porte-à-faux dans les deux directions (amont et aval), le type B avec uniquement des porte-à-faux vers l'amont, le type C avec uniquement des porte-à-faux vers l'aval, le type D qui n'a pas des porte-à-faux.

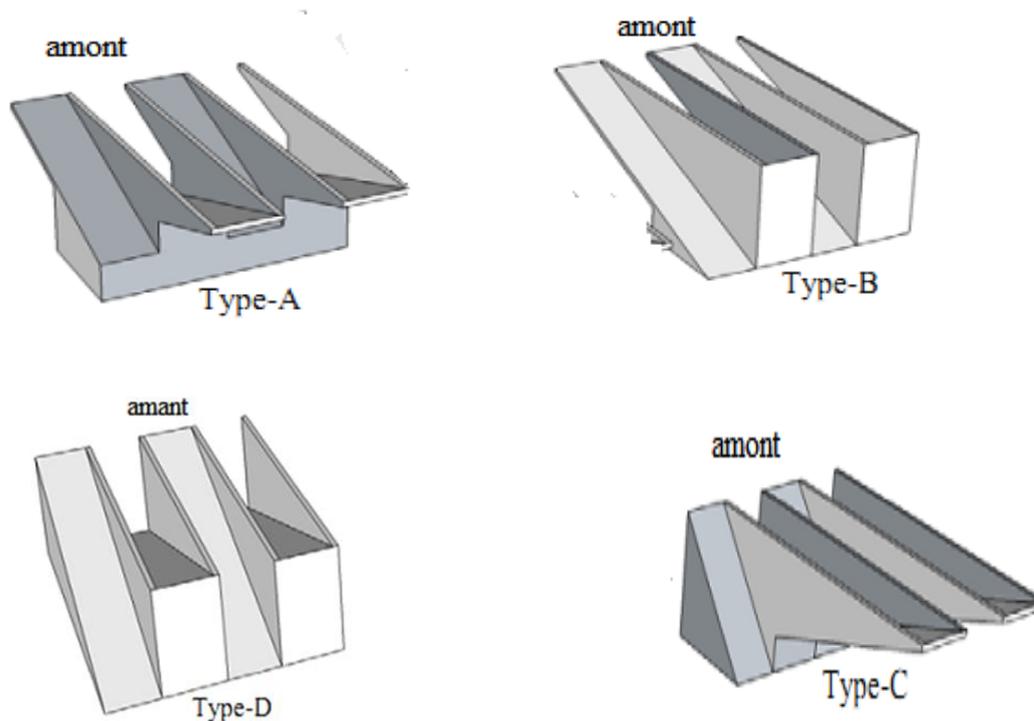


Figure II.14 : Différents types du PK-Weir (Machiels et al, 2013)

II.2.2.4 Paramètres affectant la performance de déversoir PK-Weir

Les caractéristiques hydrauliques du déversoir en touches de piano, et plus particulièrement sa performance, peuvent dès lors être évaluées sur base des paramètres sans dimensions suivants : W_i/W_o , L/W_t , B_i/B_o , W_u/P et H/P . Ces paramètres dérivent directement de la géométrie du PK-Weir et de la charge d'exploitation, ils sont donc d'importance

principale. La performance du PK-Weir peut être aussi influée par les paramètres d'importance secondaire et les conditions d'approche comme la forme d'entrée, la pente du radier, la longueur des parois latérales, la configuration géométrique de la sortie en aval, la forme géométrique de la partie supérieure des alvéoles, la contraction latérale et les corps flottants..

II.2.2.4.1 Effets des principaux paramètres géométriques sur le rendement du PK-Weir

- **Rapport d'aspect vertical, Wu/P**

Le rapport de l'aspect vertical représente la largeur d'un cycle de PK-Weir rapporté à la hauteur du déversoir, l'effet de ce paramètre adimensionnel sur la performance hydraulique a été étudié par Ouamane et al (2006). Les résultats des essais obtenus sur trois modèles de PK-Weir de même largeur de cycle et de hauteur différente ($Wu/P = 1.11$, $Wu/P = 1.33$, $Wu/P = 1.67$) ont montré que la performance hydraulique du PK-Weir est dépendante du paramètre Wu/p . Autrement dit, la capacité d'évacuation est liée étroitement à la hauteur du PK-Weir. (Figure II.15).

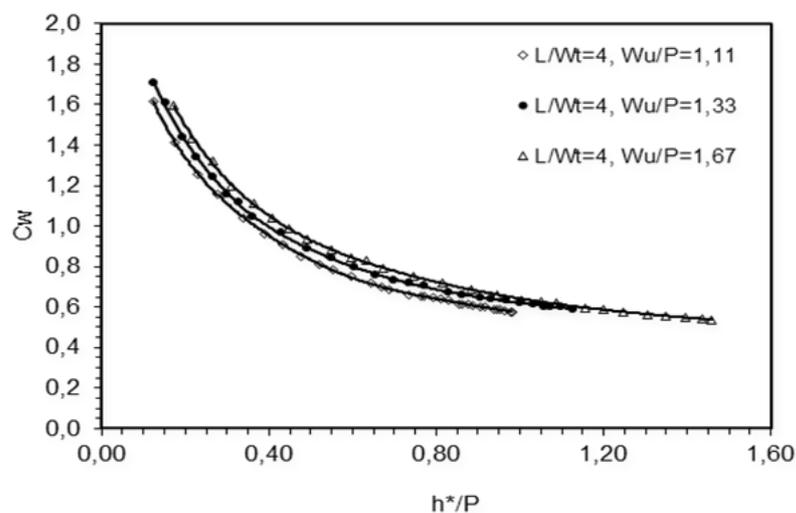


Figure II.15 : Coefficient de débit en fonction du rapport de l'aspect vertical Wu/P (Ouamane, 2006).

Le travail d'Ercicum et Machiels (2013), réalisé sur sept modèles de PK-Weir de différents rapports d'aspect vertical P/Wu (0.33, 0.5, 0.67, 0.8, 1, 1.1, 1.33, 2) a montré que l'efficacité du PK-Weir augmente avec l'accroissement de la hauteur. Néanmoins, pour les grandes hauteurs ($P/Wu \geq 1.33$) ; l'efficacité reste constante quelle que soit l'augmentation de la hauteur de PK-Weir (Figure II.16). Les auteurs (Ercicum et Machiels) ont recommandés que

le rapport entre la largeur de cycle et la hauteur $P/W_u = 1.33$ représente la valeur optimale hydrauliquement.

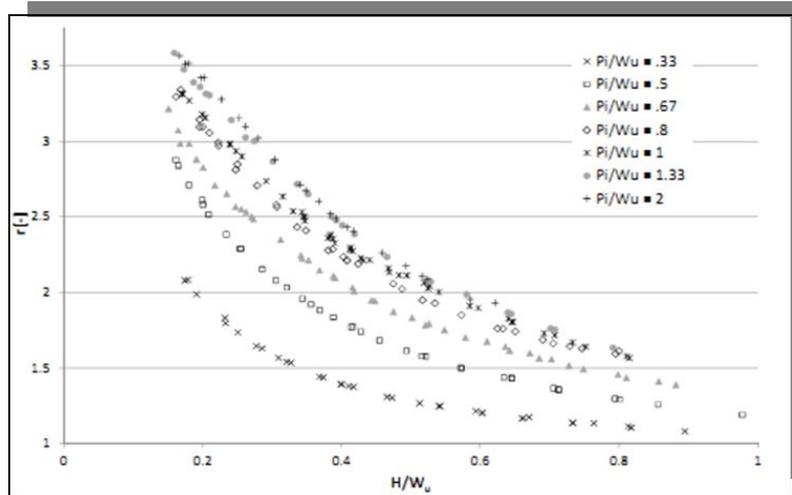


Figure I.16 : Effet de la hauteur de PK-Weir (Epicum et Machiels, 2013)

- **Longueur relative L/Wt**

Généralement, le ratio L/Wt qui exprime le rapport entre la longueur totale de la crête et la largeur du déversoir influe remarquablement sur l'écoulement. Le travail réalisé par Ouamane et al. (2006) a montré effectivement que l'accroissement de la longueur du PK-Weir fait augmenter la capacité d'évacuation d'une manière significative (Figure II.17), ainsi, faire augmenter le ratio L/Wt de deux fois cela conduit à un accroissement du coefficient de débit de plus de 50% pour les charges relatives $h^*/P < 0.4$. Cependant, l'efficacité diminue remarquablement pour les charges relatives $h^*/P > 0.6$. Un faible gain dans la capacité d'évacuation est enregistré pour les grandes valeurs de h^*/P . Ouamane et al. (2011) ont proposé que le rapport optimal se situe entre $L/Wt = 5$ et 6.

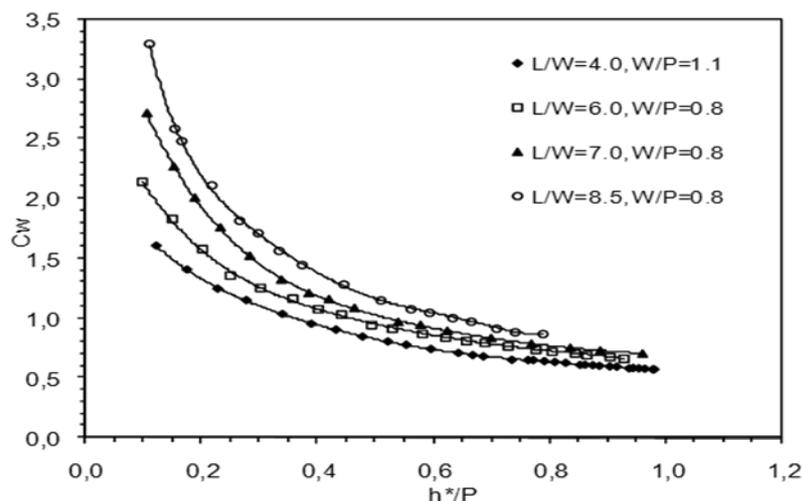


Figure II.17 : Coefficient de débit en fonction du ratio L/W (Ouamane et al, 2006)

Le travail attribué à Leite Ribeiro et al. (2011) montre que l'influence de L/Wt est très importante pour les faibles charges, lorsque la quasi-totalité de la longueur de la crête contribue au déversement. Cette influence diminue progressivement avec l'augmentation de la charge. Ainsi, pour $H/P=1$, le PK-Weir avec $L/Wt=7$ ne débite que 32% de plus que ceux de $L/Wt=3$, alors que ce rapport est d'environ 70% pour $H/P=0.25$ (Figure II.18).

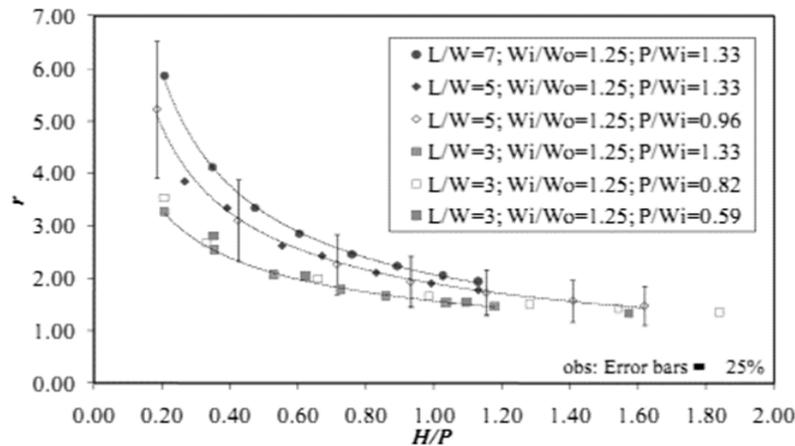


Figure II.18 : Rapport de débit r en fonction de H/P pour différentes valeurs de L/Wt (Leite Ribeiro et al. 2011).

• Impact de la largeur des alvéoles (W_i) et (W_o)

L'impact de la variation de la largeur des alvéoles a été étudié pour la première fois par Ouamane et Lemprière en 2006, il a été démontré que le choix de la largeur de l'alvéole amont supérieure à celle de l'aval permet d'avoir un rendement meilleur (Figure II.19). Ouamane (2011) a recommandé que la largeur optimale d'alvéole amont soit située entre 1.2, 1.5 fois la largeur de l'alvéole aval.

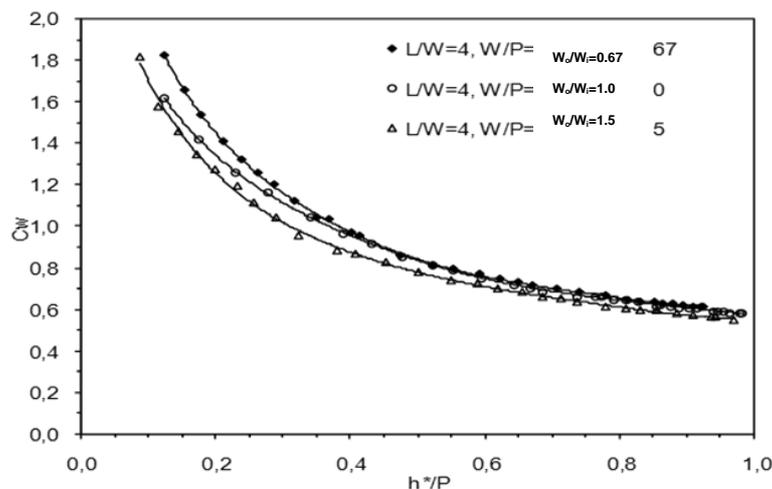


Figure I.19 : Coefficient de débit en fonction de la largeur des alvéoles (Ouamane et al, 2006)

- **Impact de la longueur des porte-à-faux**

Les porte-à-faux du PK-Weir peuvent prendre trois dispositions, 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. Les essais effectués pour ces trois dispositions de porte-à-faux ont montré que le cas sans porte-à-faux aval ($B_i/B_o=0$) se caractérise par un rendement plus élevé que les modèles avec porte-à-faux aval. Par contre, le rendement de la disposition avec des porte-à-faux symétriques ($B_i/B_o=1$) est plus grand que celui du modèle avec des porte-à-faux non symétriques (Figure II.20). A cet effet, le modèle sans porte-à-faux aval peut être considéré comme une solution pour les grands débits spécifiques (Ouamane et al, 2006).

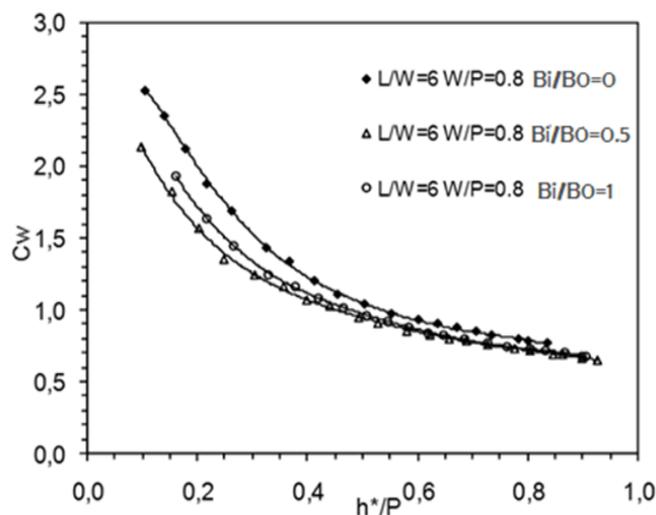


Figure II.20 : Coefficient de débit en fonction de la longueur des porte-à-faux (Ouamane et al, 2006)

Cependant, les essais réalisés par Machiels et al (2013) sur cinq modèles ont montré que :

- Quand la hauteur de déversoir est importante ($P/W_u = 1.33$), le PK-Weir caractérisé par des porte-à-faux non-symétrique ($B_o/B_i = 3$) donne le meilleur rendement comparé aux autres modèles testés.

II.2.2.4.2 Effets des paramètres secondaires

- **Effet de la rehausse**

L'utilisation de rehausse sur la crête de PK-Weir a été étudiée par Machiels et al (2012-2013), cet étude expérimentale a été réalisé sur plusieurs configurations de PK-Weir avec et sans rehausse, soit par augmentation de la hauteur ou en gardant la même hauteur totale du PK-Weir. Les résultats obtenus sont présenté sur la figure (II.21) et le Tableau (II.2), ces

résultats ont montré que l'utilisation de rehausse pour augmenter la hauteur totale du déversoir conduit à une augmentation de la capacité d'évacuation. Par contre, la capacité d'évacuation ne croît pas si la rehausse est placée sur un PK-Weir ayant déjà une hauteur égale ou supérieure la valeur optimale $P/W_u = 1.33$.

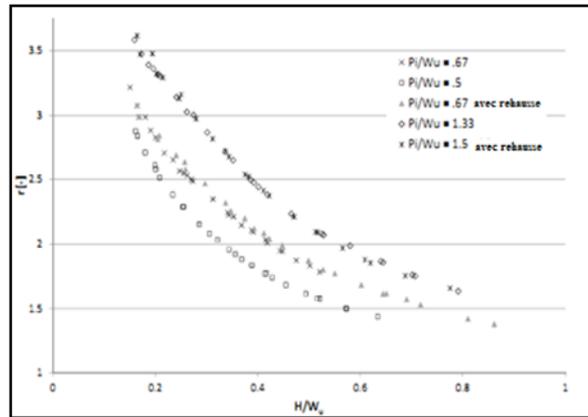


Figure I.21 : Effet de la rehausse (Machiels et al, 2013)

Tableau II-2 : Paramètres géométriques des modèles testés et le gain moyen de débit spécifique avec l'utilisation de rehausse (Machiels et al, 2012).

Modèle	Variante	P(m)	P _R (m)	S _I =S _O	P(B-B _O)	W _I /W ₀	L/W _T	Gain avec rehausse
1	1	0.525	0	0.18	0.18	1	4.15	0%
	2	0.625	0.1	0.18	1.4	1	4.15	
2	1	0.135	0	0.34	0.34	1	4.15	20%
	2	0.235	0.1	0.34	0.53	1	4.15	0%
	3	0.235	0	0.53	0.53	1	4.15	
3	1	0.4	0	1	1	1.5	5	0%
	2	0.45	0.05	1	1.125	1.5	5	
4	1	0.4	0	1	1	0.67	5	4%
	2	0.45	0.05	1	1.125	0.67	5	
5	1	0.15	0	0.375	0.37	1.5	5	15%
	2	0.2	0.05	0.375	0.5	1.5	5	0%
	2	0.2	0	0.5	0.5	1.5	5	
6	1	0.15	0	0.375	0.375	0.67	5	5%
	2	0.2	0.05	0.375	0.5	0.67	5	

Le travail de mémoire de master réalisé par Laiadi et Boumaaza (2012) sur une série de modèle de PK-Weir avec rehausse, a montré que les modèles avec rehausses amont et aval, permet d'accroître le débit d'une manière significative par rapport au modèle standard sans rehausse (Figure II.22). Cependant, il a été constaté aussi que les modèles avec rehausse amont sont les plus performant par rapport au modèle avec rehausse aval.

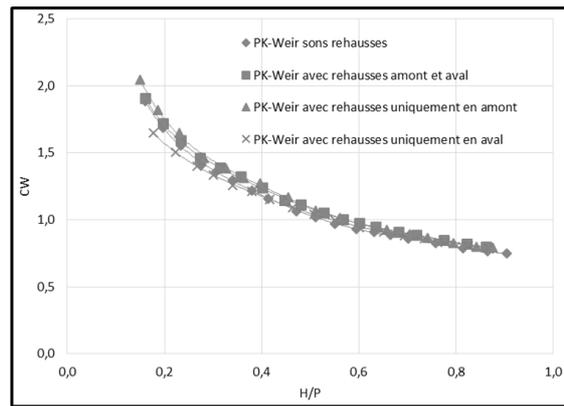


Figure I.22 : Coefficient de débit de PK-Weir en fonction de la rehausse (Laiadi et al, 2012)

• Impact des corps flottants

L'écoulement à travers le PK-Weir dans le cas de la présence des corps flottants a fait l'objet d'étude par Ouamane et al (2006). Ce travail a montré 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 restent bloqués jusqu'à une charge moyenne de l'ordre de $0.4H$ (figure II.23). Au-delà de cette charge les corps flottants commencent à être évacués systématiquement vers l'aval. La figure (II.24) montre l'impact des corps flottants qui se caractérise par une réduction du coefficient de débit pour des charges relatives $H^*/P < 0.5$, 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-23 : Fonctionnement du PK-Weir avec encombrement de l'entrée par des corps flottants (Ouamane et al, 2006).

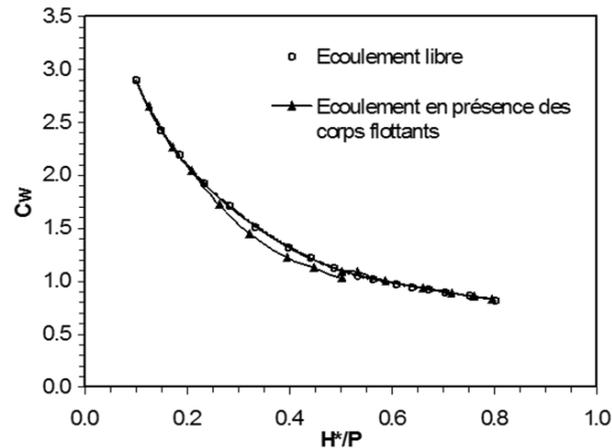


Figure II.24 : Coefficient de débit en fonction de la présence des corps flottants (Ouamane et al, 2006)

- **Effet de la contraction latérale**

Pour vérifier l'importance de l'effet de la contraction latérale sur le rendement hydraulique du déversoir en labyrinthe (Bouredji, 2012), a testé deux types d'implantation. La première disposition correspond à une largeur du canal égale à la largeur du déversoir $W_c = W_t$ (PK-Weir sans contraction latérale) et la seconde disposition correspond à une largeur du canal supérieure à la largeur du PK-Weir $W_c > W_t$ (PK-Weir avec contraction latérale). Les résultats des essais obtenus ont montré que l'écoulement dans un canal de même largeur que le déversoir se caractérise par un rendement supérieur à celui du déversoir avec contraction latérale Figure (II.25)

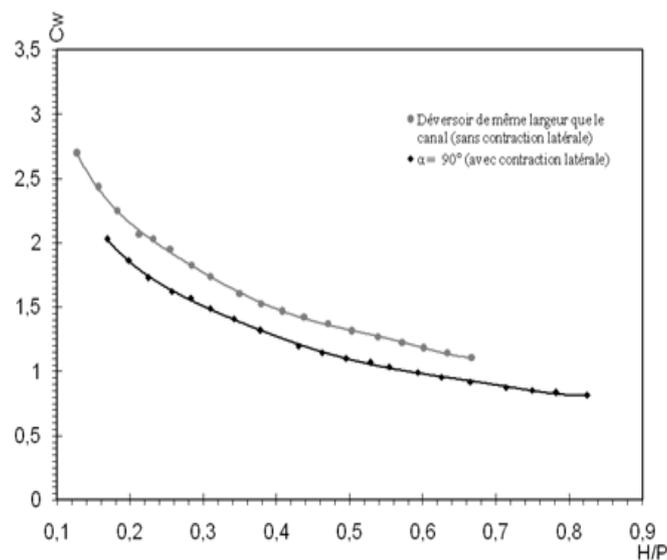


Figure II.25 : Coefficient de débit en fonction de la charge relative et la contraction latérale (Bouredji, 2012)

II.2.2.5 Capacité hydraulique du déversoir en labyrinthe

Les critères de conception préliminaires ont été présentés par Ouamane et al (2003, 2006) qui s'appuie sur des essais systématiques de différentes configurations géométriques et l'analyse dimensionnelle. Le coefficient de débit (C_w) a été exprimé par une fonction qui dépend des paramètres adimensionnels.

$$C_w = f\left(\frac{L}{W_t}, \frac{W_u}{P}, \frac{W_i}{W_o}, \frac{B_o}{B_i}, \frac{H}{P}\right) \quad (\text{II.18})$$

La formule qui a été proposée par Leite Ribeiro et al. (2009) se basent sur des résultats d'essais sur modèle de projets réels. Pour cette formule, le coefficient de débit (C) reste constant et proche du coefficient de débit d'un déversoir en paroi mince. Avec l'augmentation du niveau d'eau, une réduction continue de la longueur déversante efficace (L_{eff}) est prise en compte par un paramètre « n ». Les paramètres influent ce dernier ne sont pas encore définis quantitativement pour tous le cas.

$$\frac{L_{eff}}{W_t} = 1 + \frac{1}{\left(\frac{H}{W_t} + \frac{1}{\sqrt[n]{\frac{L_t}{W_t} - 1}}\right)^n} \quad (\text{II.19})$$

Le manque d'une relation générale entre la capacité d'évacuation, la charge hydraulique et les caractéristiques géométrique du PK-Weir implique le recours systématique aux essais sur modèle physique pour des projets réels. Des essais ont été menés au laboratoire Constructions Hydrauliques de l'Ecole Polytechnique de Lausanne (EPFL), afin de déterminer une relation générale entre la débitance, la charge hydraulique et la longueur déversant efficace pour des différentes géométries de PK-Weir (Leite Ribeiro et al. 2009).

Kabiri-Samani et Javaheri (2012), ont réalisé des essais expérimentaux pour étudié l'effet des différents paramètres adimensionnelles L/W_t , B/P and W_i/W_o sur la performance du PK-Weir. Les essais ont été réalisé sur un canal de largeur 0.4m et de longueur 12m dans des conditions d'écoulement libre et submergé c'est-à-dire avec un effet du niveau d'eau en aval. Sur la base des analyses dimensionnelles et mathématiques, Kabiri-Samani et Javaheri ont proposé le coefficient de débit de PK-Weir (C_w) en fonction des paramètres géométriques et hydraulique.

- L'équation dans des conditions d'écoulement libre est :

$$C_w = \left[0.212 \left(\frac{H}{P} \right)^{-0.675} \left(\frac{L}{Wt} \right)^{0.377} \left(\frac{H_d}{H_t} \right)^2 \left(\frac{W_i}{W_0} \right)^{0.426} \left(\frac{B}{P} \right)^{0.306} \exp \left(1.504 \frac{B_0}{B} + 0.093 \frac{B_i}{B} \right) \right] + 0.606 \quad (\text{II.20})$$

Avec $R^2 = 0.986$, et les limites d'application $H > 30$ mm, $0.1 \leq H/P \leq 0.6$, $2.5 \leq L/Wt \leq 7$, $1 \leq B/P \leq 2.5$, $0.33 \leq W_i/W_0 \leq 1.22$, $0 \leq B_i/B \leq 0.26$, $0 \leq B_0/B \leq 0.26$ and $H_d/H \leq 0.6$. L'erreur maximale pour les différents résultats expérimentaux est de l'ordre de 3% et la moyenne de 0.7%.

- L'équation du coefficient de débit dans des conditions d'écoulement submergé est défini par:

$$C_w = \left[1 - 0.858 \left(\frac{H_d}{H} \right) + 0.22628 \left(\frac{H_d}{H} \right)^2 - 2.489 \left(\frac{H_d}{H} \right)^3 \right] \left(\frac{L}{W_t} \right)^{0.055} \quad (\text{II.21})$$

Avec $R^2 = 0.97$, et les limites d'application : $2.5 \leq L/Wt \leq 6$, $1 \leq B/P \leq 2.5$, $0.33 \leq W_i/W_0 \leq 1.22$, $0 \leq B_0/B \leq 0.26$, $0 \leq B_i/B \leq 0.26$ et $H_d/H > 0.6$. L'erreur maximale pour les différents résultats expérimentaux dans des conditions submergées est de l'ordre 5% et la moyenne 1%.

Leite Ribeiro et al. (2012) ont réalisé des tests sur des modèles physiques dans un canal rectangulaire de 40 m de longueur, 2,0 m de largeur et 1,0 m de la hauteur. Au total, 380 essais ont été effectués, en considérant 49 modèles de PK-Weir type A, La variation des paramètres a été comme suit : $3.0 \leq L/W \leq 7.0$, $0.1 \leq H/P_i \leq 2.8$, $1.5 \leq B/P_i \leq 4.6$, $0.7 \leq P_i/P_0 \leq 1.4$, $0.2 \leq B_i/B = B_0/B \leq 0.4$, et $0.5 \leq W_i/W_0 \leq 2.0$, Le débit spécifique a été varié entre 26 et 440 l/s.

Les essais ont été réalisés pour étudier la performance de PK-Weir dans des conditions d'écoulement libre. Les courbes d'évaluation sont exprimées par le débit de PK-Weir (Q_{PKW}) et le débit de référence d'un déversoir en mince paroi. Ce dernier est exprimé par :

$$Q_n = 0.42W(2gH^3)^{0.5}$$

$$r = \frac{Q_{PKW}}{Q_n} = \frac{Q_{PKW}}{0.42W_t \sqrt{2g} H^{1.5}} \quad (\text{II.22})$$

Les valeurs de r (r exprime la performance de PK-Weir) ont été trouvés on fonction des paramètres principaux et secondaires. L'influence des paramètres secondaires a été exprimée par les facteurs de correction singuliers, comme w , p , b et a . L'analyse des données a indiqué que :

$$r = 1 + 0.24 \left(\frac{(L - W_i) P_i}{W_i H} \right)^{0.9} \quad (apba) \quad (\text{II.23})$$

Pour les termes (w , p , b et a) égale 1, l'équation (II-37) donne une précision fiable de r avec $R^2 = 0.96$ Si en tient compte de tous les essais. Ceci indique que les principaux paramètres sont dominants. Néanmoins, les paramètres secondaires peuvent être pris en compte pour augmenter la précision de l'équation. (II-37), pour que $R^2 = 0,98$. Les facteurs de correction singulière sont définis comme indiqué ci-dessous,

- ❖ Pour le rapport entre la largeur de l'alvéole amont et la largeur de l'alvéole aval :

$$\omega = \left(\frac{W_i}{W_0} \right)^{0.05} \quad (\text{II.24})$$

- ❖ Pour le rapport de la hauteur amont et aval :

$$p = \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^{0.25} \quad (\text{II.25})$$

- ❖ Pour le rapport de la longueur relative des porte-à-faux $(B_i + B_o) / B$:

$$b = 0.3 + \left(\frac{B_o + B_i}{B} \right)^{-0.50} \quad (\text{II.26})$$

- ❖ Pour le rapport relative de la hauteur de rehausse :

$$a = 1 + \left(\frac{R_o}{P_0} \right)^2 \quad (\text{II.27})$$

Conclusion

Selon l'alignement du seuil et la forme de la structure de déversoir on distingue plusieurs types de déversoirs. Ainsi le débit qui transite par un déversoir est en fonction de la forme. Il est calculé par l'application de la formule classique de Poleni, et le rendement de déversoir est exprimé par le rapport du débit d'un déversoir rectiligne pris comme référence. Le coefficient de débit varie en fonction de la charge H , la forme de la crête du déversoir, les caractéristiques géométriques du déversoir et les conditions d'approche.

L'étude la plus détaillée sur la performance du déversoir en labyrinthe, a été réalisée par HAY et TAYLOR en 1970, Elle est considérée comme une base de conception des déversoirs en labyrinthe. Le coefficient de débit est considéré par Hinchliff comme étant être une fonction des paramètres adimensionnelles $C = f[L/Wt, W/P, H/P, H_d/P]$.

Les approches proposées par Ouamane et Lempérière (2003, 2006), Leite Ribeiro et al. (2012), Kabiri-Samani et Javaheri (2012) et Machiels et al (2012) permettent de déterminer les premières dimensions du PK-Weir, cependant la plupart de ces approches sont difficiles à être appliquées. Ces différentes approches exposées précédemment font appel à l'analyse des résultats obtenus expérimentalement pour aboutir à une méthode de calcul des déversoirs non rectilignes. Le nombre important des paramètres géométriques et hydrauliques qui régissent l'écoulement sur ce type de déversoir n'a pas permis une analyse théorique directe de l'écoulement sur ce type de déversoir et par conséquent, les résultats obtenus par les différents auteurs ne donnent que des relations approchées pour l'évaluation des premières dimensions des déversoirs non rectilignes.

Chapitre III

Etude comparative

Chapitre III

Etude comparative

III.1 Introduction :

L'objectif principal de cette étude est la comparaison entre le déversoir rectiligne type Creager et le déversoir non rectiligne type labyrinthe et en touche de piano (PK-Weir) sur la capacité d'évacuation. Pour réaliser cette comparaison entre ces types des déversoirs sur sa capacité d'évacuation, un exemple d'application à de cas réels de barrage déversoir sur oued el Abiadh commune de M'chouneche a été effectué.

III.2 Évacuateur de crues d'Oued M'chouneche

Barrage déversoir (évacuateur de crues) d'Oued el Abiadh M'chouneche est Actuellement en construction pour l'irrigation de la ville M'CHOUNECHE wilaya de Biskra.

Le barrage déversoir comprend les ouvrages suivants (de l'amont vers l'aval) :

- Deux murs guideaux latéraux (Rive droite & Rive gauche)
- Canal d'approche.
- Corps du barrage : déversoir en seuil libre à crête courbe (section type Creager).
- Bassin de dissipation d'énergie.
- Canal de fuite raccordant l'ouvrage au lit d'oued
- Pont submersible.
- Piste d'accès.

III.2.1 Caractéristiques d'évacuateur de crues d'Oued M'chouneche

Site du barrage	Mchouneche
Destination de la retenue	Irrigation des palmeraies
Bassin versant	653.0Km ²
Apport moyen annuel	9.44 Hm ³
Cote du thalweg	310.70 m
Cote du niveau normal de la retenue NNR	318.00 m
Cote du niveau des plus hautes eaux PHE	320.96 m
Débit décennal	480.0m ³ /s
Débit vingtenal	584.0m ³ /s
Débit centennal	863.0m ³ /s
Cote en crête du barrage	318.00 m
Volume total de la retenue	4890m ³
Hauteur du barrage à partir du thalweg	7.30 m
Largeur de crête	40.0m

Selon l'étude hydrologique qui a été réalisée par le Bureau d'études M.A.T.H.E, les débits effluents prendront les valeurs $857,31\text{m}^3/\text{s}$ et $1323,47\text{m}^3/\text{s}$, respectivement pour les crues avec $T = 100$ ans et $T = 1000$ ans.

Tableau III. 1 : Les débits maxima fréquentiels au site de l'oued M'chounech sont :

Période de retour T (ans)	2	10	20	100	1000
Fréquences (%)	0,5	0,1	0,05	0,01	0,001
Valeurs adoptées Qmax (m ³ /s)	231,46	476,83	583,85	857,31	1323,47

Le déversoir qui a été réalisé sur le projet d'aménagement de l'oued M'chounech type Creager caractérisé par une hauteur égale 7.5m et une largeur égale la largeur de lit (40m).

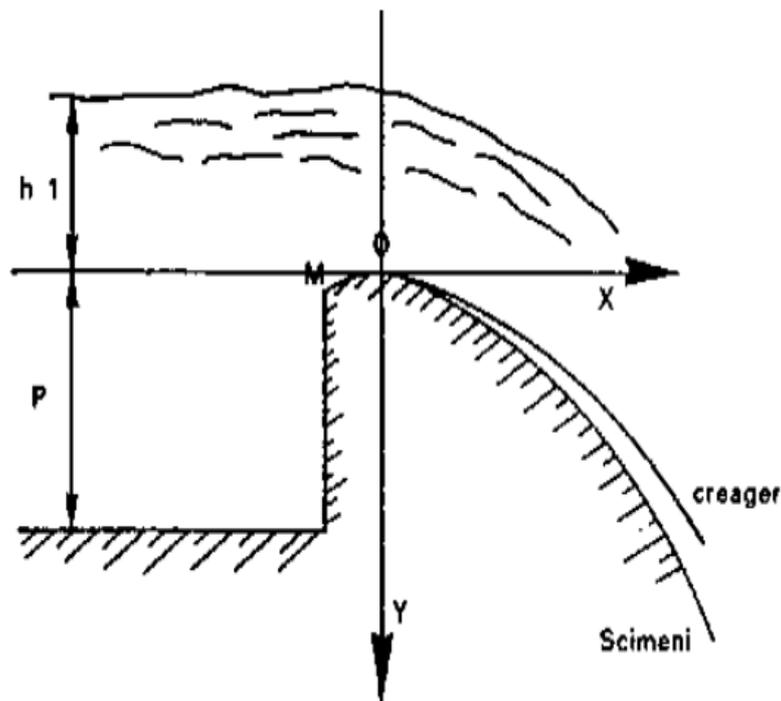


Figure III.01 : Coupe transversal du déversoir standard (Creager) pour l'aménagement d'oued M'chounech

III.2.2 La capacité d'évacuation de déversoir rectiligne type Creager

Pour calculer la capacité d'évacuation de ce type de déversoir nous avons basé sur la relation classique de débit, les résultats théoriques obtenus sont présentés dans le tableau (III.2) et la figure III.02.

$$Q = C_d b \sqrt{2gH}^{3/2}$$

C_d : est le coefficient de débit du déversoir standard qui dépend de la charge (H), le coefficient moyen est estimé d'environ : 0.47 à 0.49 (LADREYT et al., 2005).

Tableau III. 2 : Le débit en fonction de la charge sur le déversoir Creager

charge H (m)	Largeur W (m)	Coeff de débit C	Débit Q (m ³ /s)
0	40	0.49	0
0.5	40	0.49	30.6945011
1	40	0.49	86.8171596
1.5	40	0.49	159.493306
2	40	0.49	245.556009
2.5	40	0.49	343.174955
3	40	0.49	451.115194
3.5	40	0.49	568.470116
4	40	0.49	694.537277
4.5	40	0.49	828.751531
5	40	0.49	970.645352
5.5	40	0.49	1119.82358
6	40	0.49	1275.94645
7	40	0.49	1607.8763

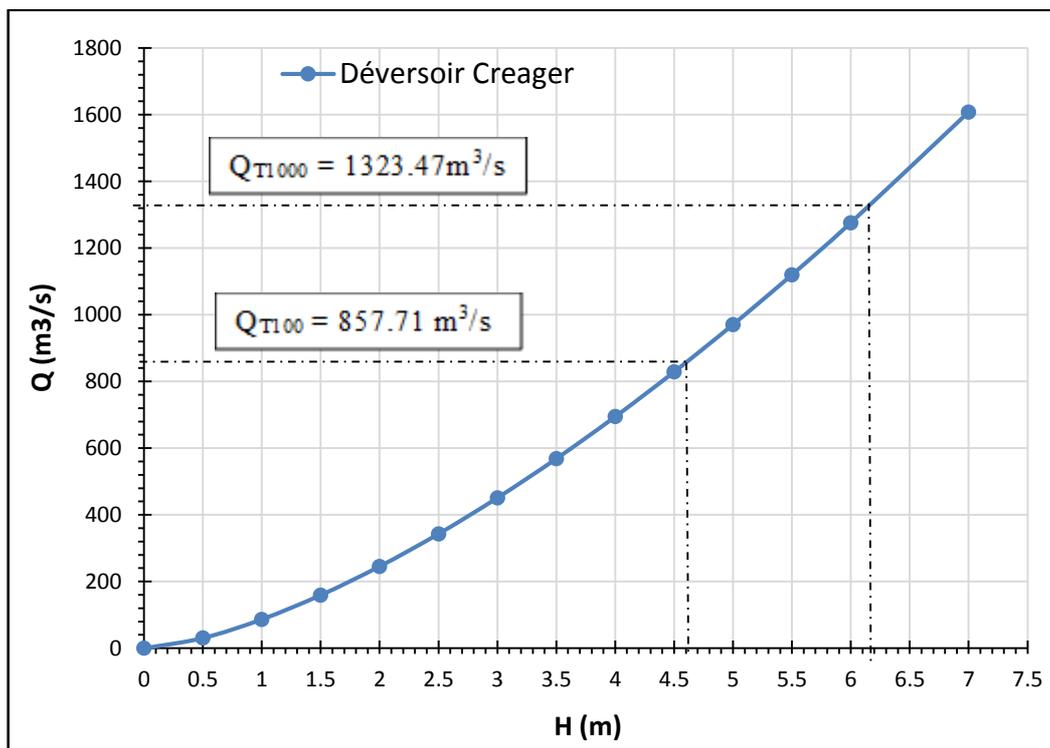


Figure III.02 : La capacité d'évacuation de déversoir Creager en fonction de la charge

La figure (III.02) qui représente le débit en fonction de la charge sur le déversoir, montré que le déversoir Creager avec la largeur 40m et une hauteur 7.5m évacuée les débits effluents

prendront les valeurs $476.83\text{m}^3/\text{s}$, $583.82\text{m}^3/\text{s}$, $857.71\text{m}^3/\text{s}$ et $1323.47\text{m}^3/\text{s}$ respectivement pour les crues avec $T = 10$ ans, $T = 20$, $T = 100$ ans et $T = 1000$ ans sur une charges suivent :

- Pour un temps de retour de 10 ans le débit égale $476.83 \text{ m}^3/\text{s}$ et la charge sur le déversoir Creager égale 3m
- Pour un temps de retour de 20 ans le débit égale $583.82 \text{ m}^3/\text{s}$ et la charge sur le déversoir Creager égale 3.6m
- Pour un temps de retour de 100 ans le débit égale $857.71 \text{ m}^3/\text{s}$ et la charge sur le déversoir Creager égale 4.6m
- Pour un temps de retour de 1000 ans le débit égale $1323.47\text{m}^3/\text{s}$ et la charge sur le déversoir Creager égale 6.15m

A partir des résultats obtenu par l'application de relation classique de débit à travers le déversoir Creager on constate que ce type de déversoir évacué le débit de temps de retour 10ans et 20 ans sur une charge acceptable et sons risque sur la stabilité des ouvrages d'aménagement, (selon l'axe d'implantation de déversoir et la morphologie de bassin versant d'Oued M'chounech). Mais pour le débit de temps de retour 100 ans et 1000 ans la charge sur le déversoir Creager est plus grande et cela provoque un risque sur la stabilité des ouvrages d'aménagement.

La solution pour augmenter la capacité d'évacuation de ce type de déversoir est l'accroissement de la largeur, mais la morphologie du terrain de choix de l'axe d'implantation de déversoir est limite (largeur de lit d'oued est égale à 40m) et ne permet pas d'augmenté la largeur. La solution qui a été proposé dans cette étude est l'utilisation de déversoir non rectiligne (labyrinthe ou PK-Weir)

III.3 La capacité d'évacuation de déversoir en labyrinthe

III.3.1 L'écoulement à travers le déversoir en labyrinthe

L'écoulement sur le déversoir en labyrinthe se distingue de celui d'un déversoir rectiligne. Pour un déversoir rectiligne l'écoulement prend la même forme quel que soit la charge sur le seuil du déversoir. Par contre, l'écoulement sur un déversoir en labyrinthe change de forme en fonction de la charge sur le seuil. Pour les faibles charges l'écoulement est idéal, la lame d'eau s'écoule le long des parois latérales et frontales, par conséquent le rendement du labyrinthe est dans les conditions les plus favorables. Quand la charge atteint des valeurs proches de la moitié de la hauteur du déversoir, le niveau d'eau à l'intérieur des alvéoles aval augmente ce qui entraine une réduction de la performance du déversoir en labyrinthe. Pour les charge égales ou supérieures à la hauteur du déversoir la lame d'eau devient solidaire et forme une seule nappe

qui à tendance de glisser sur la crête du déversoir, ceci engendre une réduction importante du rendement du déversoir en labyrinthe qui s'approche de celui d'un déversoir rectiligne.

Les figures (III.03) montrent le mode d'écoulement et les profils typiques de l'écoulement sur le déversoir en labyrinthe.

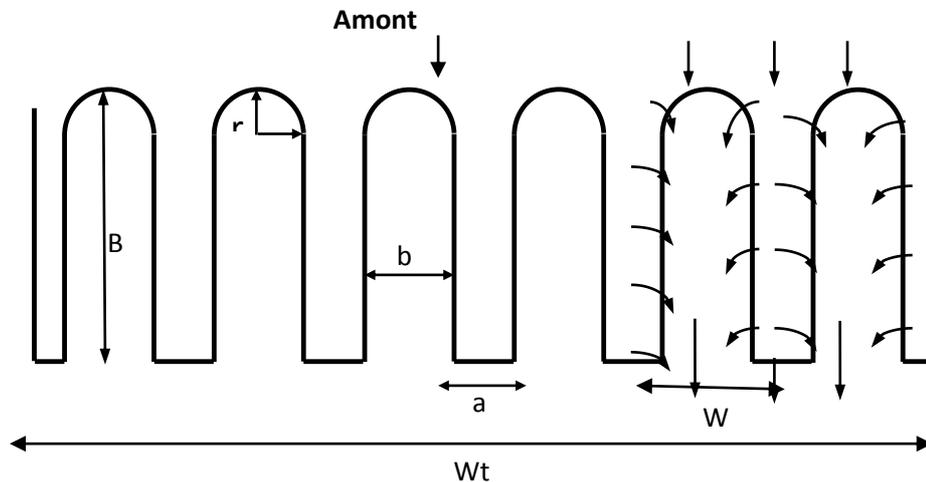


Figure.III.03. Schéma Descriptif de l'écoulement sur le déversoir en labyrinthe

III.3.2 Performance de déversoir en labyrinthe

Les différents travaux de recherche qui ont été réalisés sur des modèles réduits physique de déversoir en labyrinthe par Hay et Taylor, (1970), Magalhães, (1985), et Tullis (1995.2007) , Ben Said et Ouamane (2007) et Kabiri-Samani et al.(2012)(chapitre II) ,ont montré que la conception du déversoir en labyrinthe qui se caractérise par les paramètres adimensionnels suivants: $a/b = 1.5$, $L/Wt = 6$ donné une meilleure capacité d'évacuation. Ou L la longueur développée, B la longueur de la paroi latéral, W la largeur d'un cycle, la largeur totale de déversoir Wt , P la hauteur des parois, a la largeur de l'alvéole d'entrée, b la largeur de l'alvéole de sortie, n le nombre de cycles n

Les dimensions géométrique de déversoir en labyrinthe pour une largeur $Wt = 40m$ qui a été proposé pour l'aménagement d'Oued el Abiadh la ville M'chouneche présenté dans le tableau suivant :

- Ou :
- $L = (W + 2B). n$ et
 - $L/Wt = 6 = n$
 - $a/b = 1.5$ et $W = a+b = Wt / n$

Tableau III.3 : Caractéristique géométrique de labyrinthe

P (m)	Wt (m)	W (m)	L (m)	B (m)	a (m)	b (m)	n
7.5	40	6.6	240	16.6	3.96	2.54	6

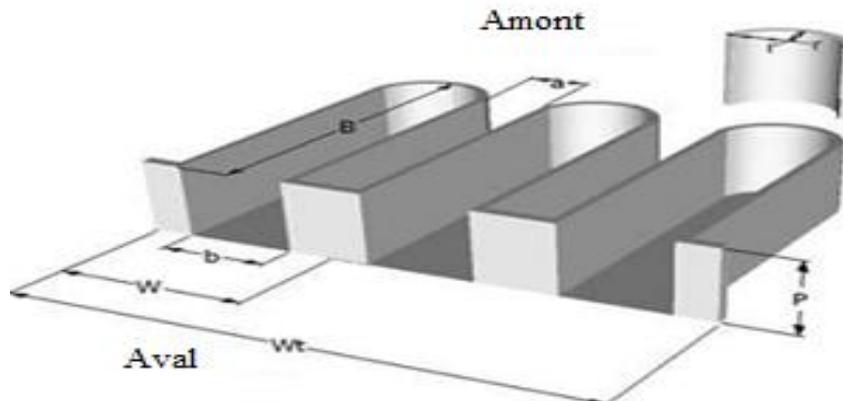


Figure.III.04. Représentation des paramètres du déversoir en labyrinthe

Pour calculer la capacité d'évacuation de déversoir en labyrinthe pour chaque charge nous avons basé sur l'équation qui a été proposée par Kabiri-Samani et al(2012, (chapitre II) Les résultats obtenus présentés dans le tableau et le graphique suivant :

$$Q = C W_t H \sqrt{2gH}$$

$$C_d = 0.389 + 0.424 \left(\frac{H_0}{P}\right)^{-0.632} \left(\frac{L}{B}\right)^{-0.403} \left(\frac{a}{B}\right)^{0.184} \left(\frac{b}{B}\right)^{-0.613}$$

Tableau III.4 : Le débit en fonction de la charge sur le déversoir en labyrinthe

Charge H (m)	Largeur W (m)	Coeff de débit C_d	Débit Q (m3/s)
0	40	0	0
0.5	40	2.33155434	146.052852
1	40	1.64249389	291.013579
1.5	40	1.35913583	442.394015
2	40	1.1978561	600.28727
2.5	40	1.0914641	764.414579
3	40	1.01501046	934.462528
3.5	40	0.95689915	1110.13994
4	40	0.91093967	1291.18685
4.5	40	0.87349791	1477.37292
5	40	0.84228691	1668.49362
5.5	40	0.81578879	1864.36636
6	40	0.79295281	2064.82718
7	40	0.75545467	2478.93399

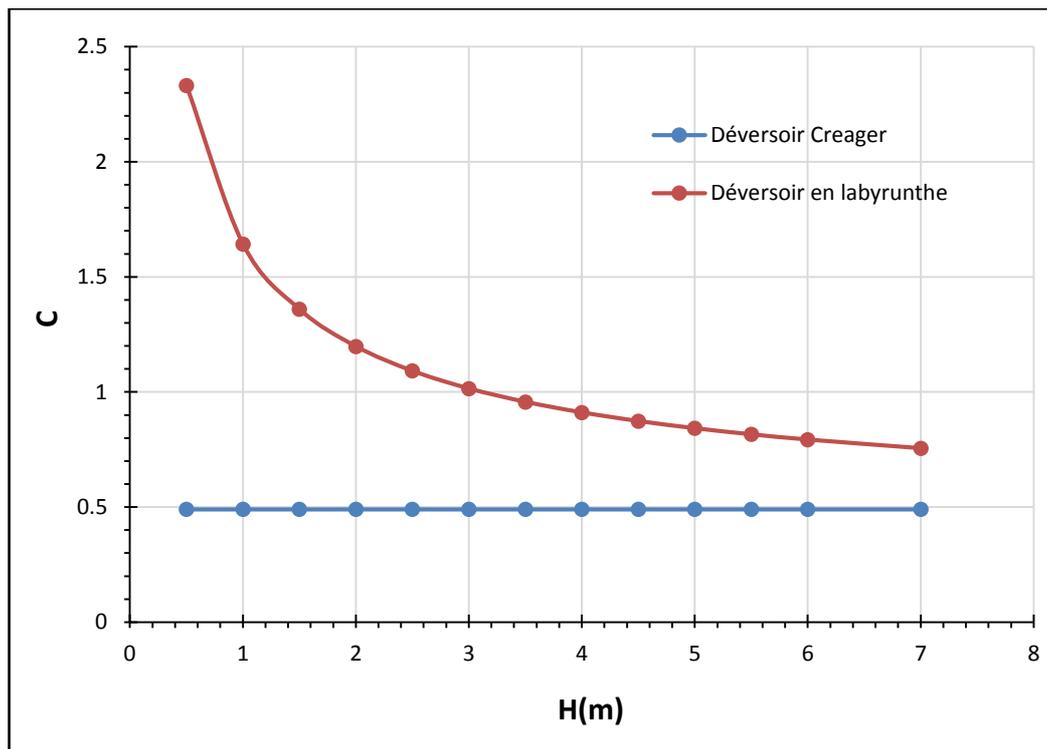


Figure.III.05 : Variation du coefficient de débit en fonction de la charge

Le déversoir en labyrinthe est souvent conçu pour fonctionner sous des charges d'exploitation faibles. Cette contrainte qui est liée à la forme du seuil qui est caractérisé par des alvéoles de volume limité provoquant ainsi une saturation de l'écoulement pour les grandes charges.

Le graphique (III.05) qui représente la variation du coefficient de débit du déversoir en labyrinthe en fonction de la charge. Cette représentation montre clairement que le coefficient de débit atteint des valeurs supérieures à trois fois ceux correspondant au déversoir rectiligne pour les faibles charges et a tendance d'approcher les valeurs du déversoir rectiligne quand la charge se rapproche de l'unité. Autrement dit, le déversoir en labyrinthe perd son efficacité si la charge d'eau sur le seuil devient égale ou supérieure à la hauteur du déversoir.

III.3.3 La comparaison en entre le déversoir Creager et labyrinthe

Le débit qui transite par le déversoir en labyrinthe est largement supérieur à celui du déversoir standard, en particulier pour les faibles et moyennes charges sur le seuil. La figure (III.06) qui représente une comparaison entre le déversoir en labyrinthe et le déversoir standard(Creager) indique que l'écart entre les deux courbes de débit est plus grand pour toutes les charges sur le déversoir. L'accroissement de débit du le déversoir en labyrinthe par rapport au déversoir Creager de même largeur varie de 2 à 1,5 fois pour les faibles, moyenne et grande charges. Ceci

montre que le déversoir en labyrinthe peut être une solution pour faire évacuer des grands débits sous des faibles charges. Il est plus recommandé de concevoir le déversoir en labyrinthe pour fonctionner sous des charges inférieures à la moitié de la hauteur de pelle.

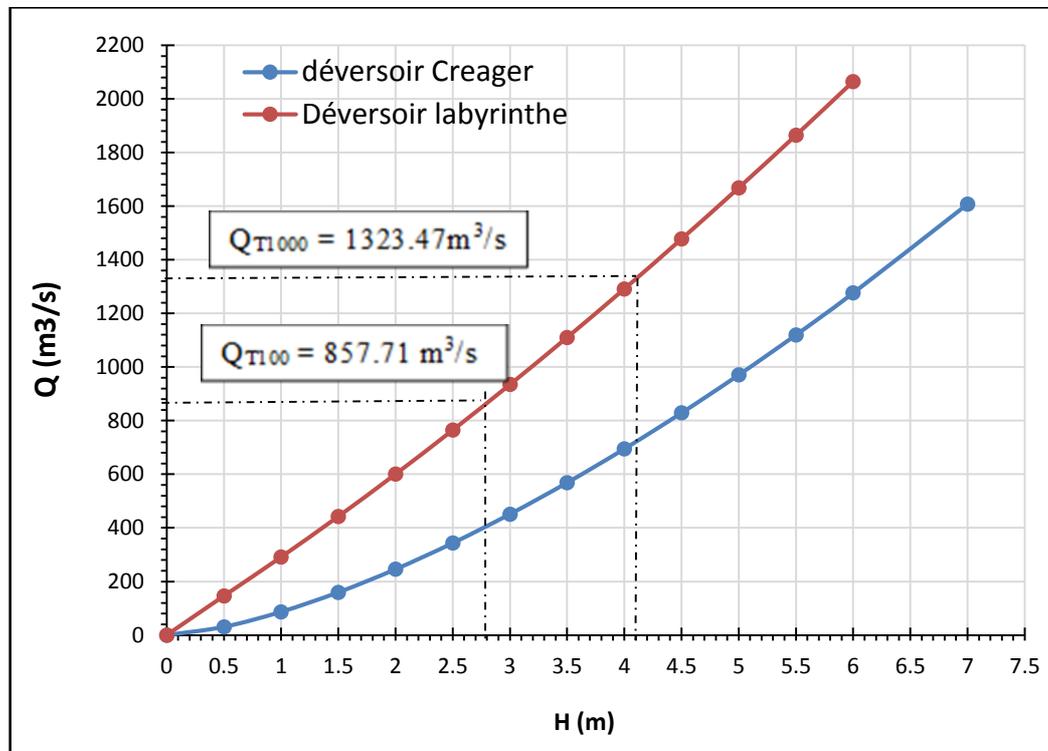


Figure.III.06 : La comparaison de capacité d'évacuation entre le déversoir labyrinthe et Creager

La figure (III.06) qui représente le débit en fonction de la charge sur le déversoir, montre que le déversoir en labyrinthe avec les Caractéristiques géométriques qui ont été représenté dans le Tableau (III.3) évacue les débits effluents prendront les valeurs $476.83\text{m}^3/\text{s}$, $583.82\text{m}^3/\text{s}$, $857.71\text{m}^3/\text{s}$ et $1323.47\text{m}^3/\text{s}$ respectivement pour les crues avec $T = 10$ ans, $T = 20$, $T = 100$ ans et $T = 1000$ ans sur une charges suivent

- Pour un temps de retour de 10 ans le débit égale $476.83\text{ m}^3/\text{s}$ et la charge sur le déversoir Creager égale 1.5m
- Pour un temps de retour de 20 ans le débit égale $583.82\text{ m}^3/\text{s}$ et la charge sur le déversoir Creager égale 1.9m
- Pour un temps de retour de 100 ans le débit égale $857.71\text{ m}^3/\text{s}$ et la charge sur le déversoir Creager égale 2.8m
- Pour un temps de retour de 1000 ans le débit égale $1323.47\text{m}^3/\text{s}$ et la charge sur le déversoir Creager égale 4.1m

A partir des résultats obtenu on constate que ce type de déversoir évacue le débit de temps de retour 10ans, 20 ans, 100ans et 1000ans sur une charge acceptable et sans risque sur la stabilité

d'ouvrage, (selon l'axe d'implantation de déversoir et la morphologie de bassin versant d'oued M'chounech).

III.4 La capacité d'évacuation de déversoir PK-Weir

III.4.1 L'écoulement sur le PK-Weir :

Le PK-Weir se caractérise par deux types d'écoulement différents selon la charge sur le seuil du déversoir :

- Pour les faibles et moyennes charges, l'écoulement se distingue par deux nappes déversante, la première sous forme d'un jet de fond qui s'écoule le long des alvéoles aval sur le radier incliné et la seconde sous forme d'une lame d'eau mince qui forme un écran superficiel couvrant toute la surface du déversoir et se jette au pied aval de ce dernier (fig. III-07). Ceci permet d'assurer une aération du déversoir.
- Pour les fortes charges les deux lames déversante deviennent solidaires constituant ainsi une seule nappe, par conséquent son rendement hydraulique diminue.

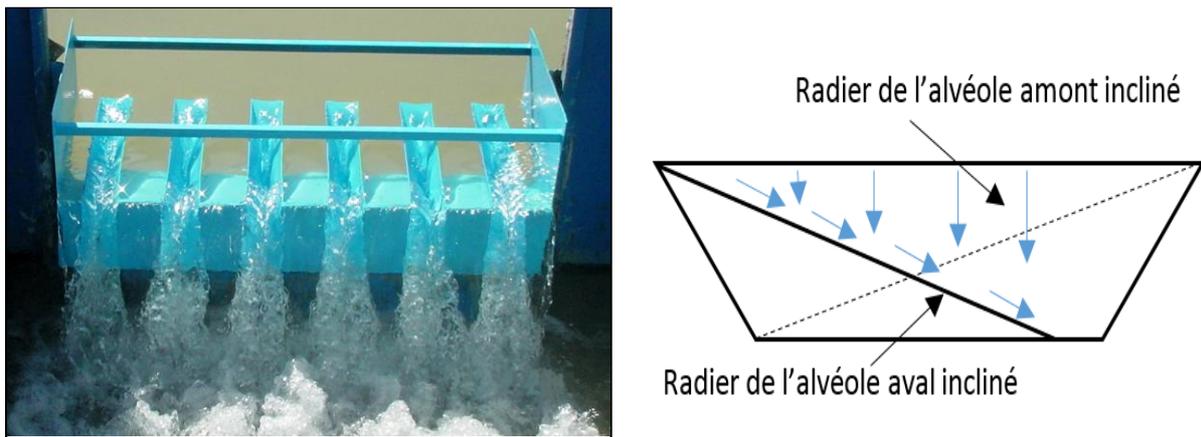


Figure .III.07 : L'écoulement à travers le PK-Weir

III.4.2 Performance du PK-Weir

Depuis son invention, le PK-Weir a fait l'objet de nombreuses études et recherches par des différents auteurs. Ces études ont été focalisées sur l'optimisation de la forme géométrique et l'étude de l'écoulement sur ce type de déversoir, afin de comprendre son fonctionnement.

L'étude de l'influence des différents paramètres géométriques sur le rendement hydraulique du PK-Weir a été l'ossature principale des différents travaux de recherche sur ce type de déversoir.

Les études qui ont été effectuées précédemment ont montré que la conception du déversoir en PK-Weir qui se caractérise par les paramètres adimensionnels suivants : $W_i/W_o = 1.5$, $L/W_t = 6$, $B_0/B_i = 1$ donné un meilleur rendement. Ou W_t = la largeur totale de déversoir, W_u =

largeur d'un cycle, W_i = la largeur de l'alvéole amont, W_o = la largeur de l'alvéole aval, P = la hauteur de déversoir, B_i = la longueur du porte-à-faux aval, B_o = la longueur du porte-à-faux amont, B = Longueur d'une paroi latérale

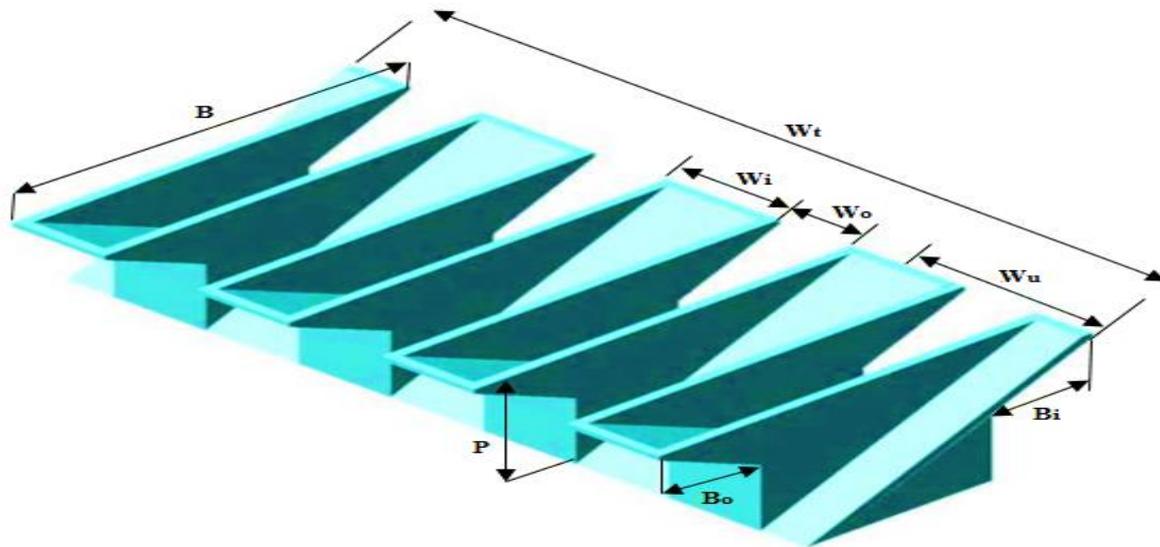


Figure .III.08 : Représentation en 3D d'un élément de déversoir en touches de piano

Les dimensions géométrique de déversoir PK-Weir pour une largeur $W_t = 40\text{m}$ qui a été proposé pour l'aménagement d'Oued el Abiadh de la ville M'chouneche présenté dans le tableau suivant :

Ou : - $L = (W_u + 2B) \cdot n$ et

$$- L/W_t = 6 = n$$

$$- W_i/W_o = 1.5 \text{ et } W = W_i + W_o = W_t / n$$

$$- B = B_o + B_i + B_b \text{ (} B_b \text{ est la longueur de base), } B_b = B/2$$

$$- B_o/B_i = 1$$

Tableau III. 5 : Caractéristique géométrique de PK-Weir

P (m)	W_t (m)	W_u (m)	L (m)	B (m)	W_i (m)	W_o (m)	B_i (m)	B_o (m)	B_b (m)	n
7.5	40	6.6	240	16.6	3.96	2.54	4.15	4.15	8.3	6

Pour calculer la capacité d'évacuation de déversoir PK-Weir pour chaque charge nous avons basé sur l'équation qui a été proposé par Leite Ribeiro et al. 2012, (Chapitre II) Les résultats obtenus présentés dans le tableau (III. 6) et la Figure .III.08.

$$r = \frac{Q_{PKW}}{Qn} = \frac{Q_{PKW}}{0.49W_t \sqrt{2g} H^{1.5}}$$

$$r = 1 + 0.24 \left(\frac{(L - W_t) P_i}{W_t H} \right)^{0.9} \quad (\omega p b a)$$

$$\omega = \left(\frac{W_i}{W_0} \right)^{0.05}$$

$$p = \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^{0.25}$$

$$b = \left(0.3 + \frac{B_o + B_i}{B} \right)^{-0.50}$$

$$a = 1 + \left(\frac{R_o}{P_0} \right)^2$$

Les valeurs de r (r exprime la performance de PK-Weir) ont été trouvés on fonction des paramètres principaux et secondaires. L'influence des paramètres secondaires a été exprimée par les facteurs de correction singuliers, comme w, p, b et a.

Tableau III.6 : Le débit en fonction de la charge sur le déversoir en PK-Weir

Charge H (m)	Largeur Wt (m)	Rendement r	Q _{creager} (m ³ /s)	Q _{PK-Weir} (m ³ /s)
0	40	0	0	0
0.5	40	10.0424728	30.6945011	308.248691
1	40	5.61368453	86.8171596	487.364146
1.5	40	4.05019166	159.493306	645.97846
2	40	3.24035569	245.556009	795.688811
2.5	40	2.74175385	343.174955	940.901256
3	40	2.4025006	451.115194	1083.80453
3.5	40	2.15604713	638.078702	1375.72776
4	40	1.96852025	779.582658	1534.62425
4.5	40	1.82081706	930.23131	1693.78104
5	40	1.70132614	1089.49989	1853.59464
5.5	40	1.6025734	1256.94483	2014.34636
6	40	1.51952483	1432.18479	2176.24035
7	40	1.38745368	1804.75911	2504.01967

La performance du déversoir en touches de piano peut le mieux être présentée en termes du déversoir standard de type Creager défini comme le déversoir rectiligne occupant la même largeur d'emprise et de même hauteur que le PK-Weir. Ceci peut être fait par la comparaison

directe de débit qui transite par le PK-Weir, Q_{PK} , avec le débit de déversoir standard correspondant, $Q_{Creager}$. La performance mesure le degré de l'avantage de la configuration géométrique du PK-Weir, ceci dit, l'avantage de l'augmentation de la longueur de crête.

Le PK-Weir se caractérise essentiellement par la présence des porte-à-faux ce qui permet d'avoir une longueur de crête plus longue que celle d'un déversoir standard, en conséquent, cet avantage conduit à une performance meilleure. Le graphique III.09 montre que le PK-Weir se distingue par une performance élevée pour les faibles et moyennes charges et qui diminue remarquablement quand la charge sur le déversoir atteint des valeurs proches à la grandeur de la hauteur du PK-Weir.

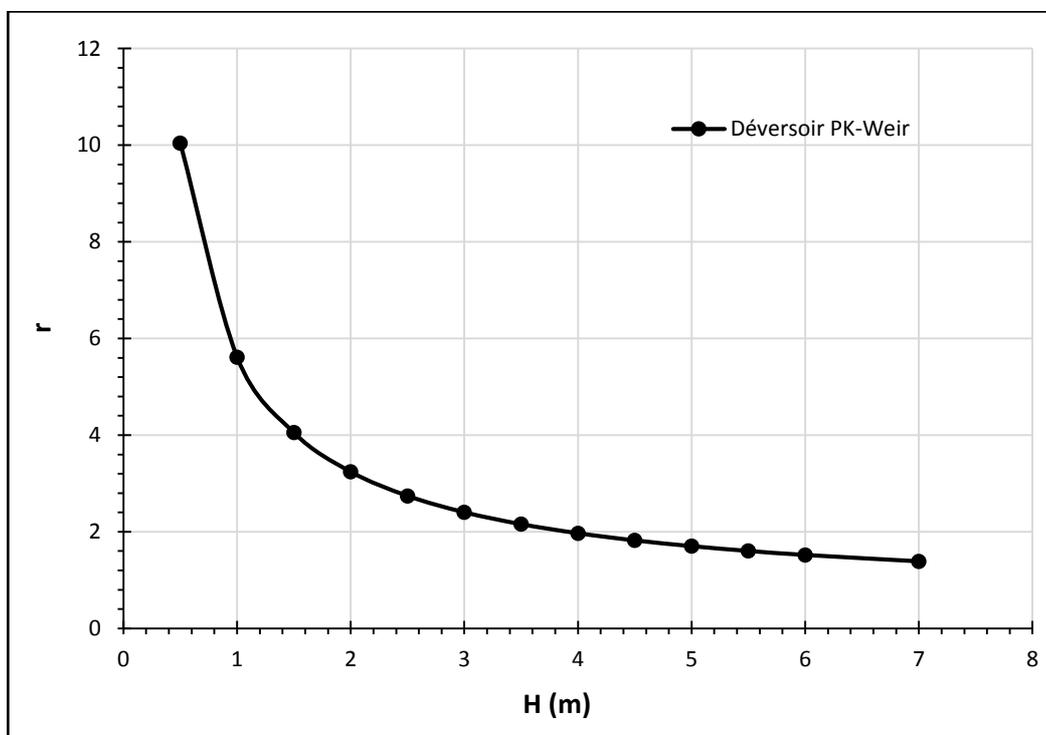


Figure III.09 : Performance du PK-Weir en fonction de la charge

III.4.3 La comparaison en entre le déversoir Creager et PK-Weir

Le graphique qui représente la comparaison entre le déversoir PK-Weir et le déversoir Creager ont montré que le déversoir PK-Weir augmenté le débit évacué d'environ 3 fois pour les faibles charges, 2,5 fois pour les moyennes charges et 1,5 pour les grandes charges par rapport au déversoir Creager. Ceci montre que le déversoir en PK-Weir pour faire évacuer des grands débits sous des faibles charges. Il est plus recommandé de concevoir le déversoir PK-Weir pour fonctionner sous des charges inférieures à la moitié de la hauteur de déversoir.

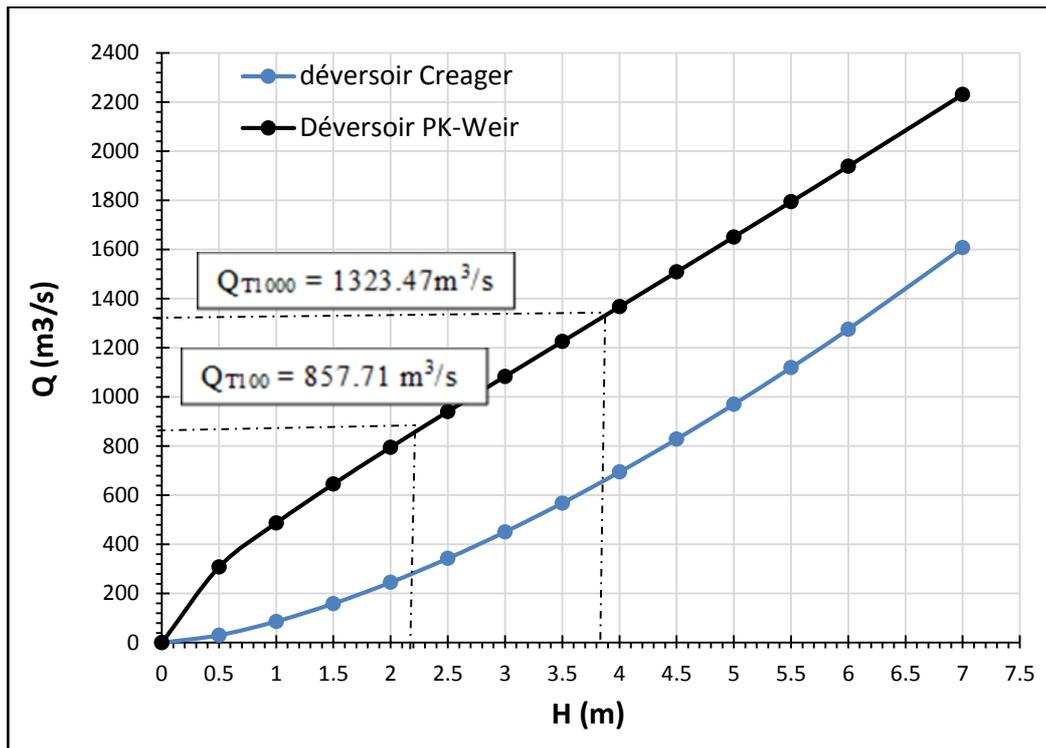


Figure.III.10 : La comparaison de capacité d'évacuation entre le déversoir PK-Weir et Creager

La figure (III-10) qui représente le débit en fonction de la charge sur le déversoir, montré aussi clairement que le déversoir PK-Weir avec les Caractéristiques géométriques qui ont été représenté dans le Tableau (III.5) évacué les débits pour les crues avec $T = 10$ ans, $T = 20$, $T = 100$ ans et $T = 1000$ ans sur une charges suivantes :

- Pour un temps de retour de 10 ans le débit égale $476.83 \text{ m}^3/\text{s}$ et la charge sur le déversoir Creager égale 1m
- Pour un temps de retour de 20 ans le débit égale $583.82 \text{ m}^3/\text{s}$ et la charge sur le déversoir Creager égale 1.3m
- Pour un temps de retour de 100 ans le débit égale $857.71 \text{ m}^3/\text{s}$ et la charge sur le déversoir Creager égale 2.2m
- Pour un temps de retour de 1000 ans le débit égale $1323.47 \text{ m}^3/\text{s}$ et la charge sur le déversoir Creager égale 3.85m

A travers les résultats obtenus on constate que ce type de déversoir évacué les débits des temps de retour 10ans, 20 ans, 100ans et 1000ans sur une charges acceptables et sans risque sur la stabilité des ouvrages, (selon le choix d'implantation de l'axe du barrage déversoir sur Oued M'chounech).

III.5 La comparaison en entre le déversoir PK-Weir et labyrinthe

Pour avoir comparé la capacité d'évacuation entre les deux types de déversoir non rectiligne PK-Weir et labyrinthe, Ces déversoir représentent les mêmes caractéristiques géométriques. Le PK-Weir avec un porte-à-faux amont et aval de même longueur et avec des alvéoles inclinées vers l'amont et vers l'aval, le deuxième type de déversoir (labyrinthe) avec une inclination horizontale des alvéoles amont et aval et sous des porte-à-faux.

La représentation graphique des courbes de débits obtenus sur ces deux types de déversoir montre que la présence des portes à faux amont et aval (PK-Weir) augmente le débit d'une manière significative d'environ 1.3 fois pour les faibles et moyennes charges. Ceci montre que le PK-Weir donne des débits supérieurs que ceux du déversoir labyrinthe (A).

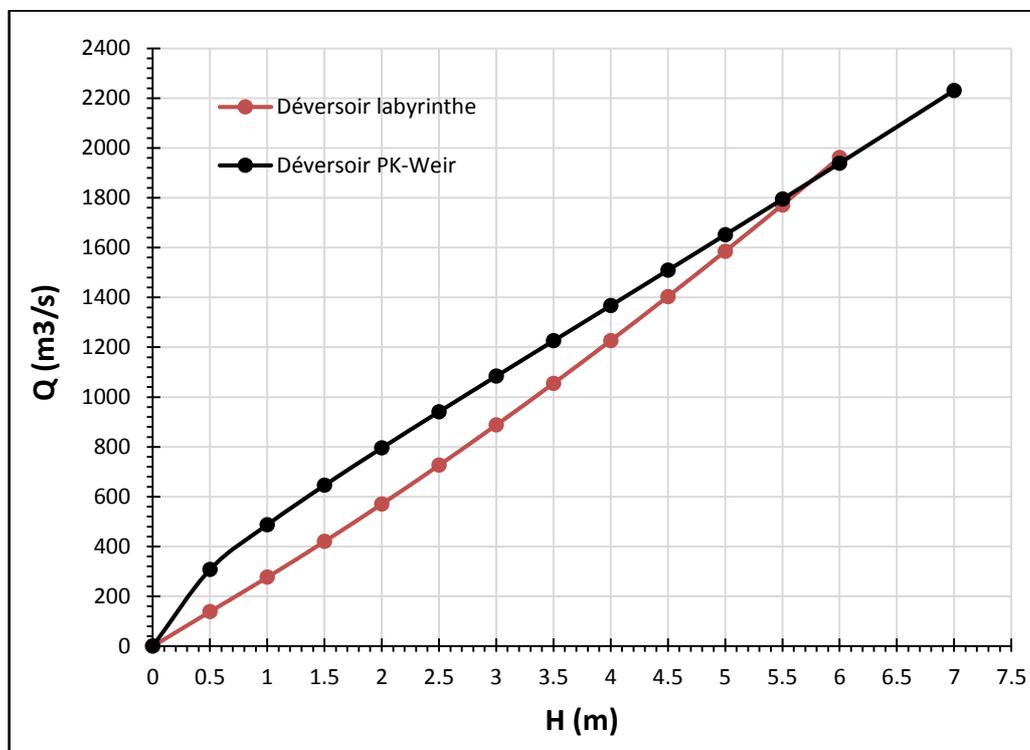


Figure.III.11 : La comparaison de capacité d'évacuation entre le déversoir labyrinthe et Creager

III.6 Conclusion

L'étude théorique qui a été réalisée sur la comparaison entre le déversoir rectiligne type Creager et le déversoir non rectiligne type labyrinthe et le PK-Weir, pour déterminer le déversoir le plus efficace qui évacue un grand débit sur une faible charge et sans risque sur les ouvrages de projet d'aménagement d'Oued M'chounech. Les résultats obtenus ont montré que

- Le déversoir Creager qui a été réalisé sur l'aménagement de d'Oued M'chounech, évacué le débit de temps de retour, 100 ans et 1000 ans sur une charge plus grande (4.6 et 6.15m) et cela provoque un risque sur la stabilité des ouvrages d'aménagement

- Le déversoir en labyrinthe augmenté le débit évacué par rapport au déversoir Creager de même largeur varie de 2 à 1,5 fois pour les faibles et moyennes charges, et le déversoir en labyrinthe évacué le débit de temps de retour, 100 ans et 1000 ans sur une acceptable (2.8 et 4.1m) et sans risque sur la stabilité des ouvrages d'aménagement.

- Le déversoir PK-Weir augmenté le débit évacué d'environ 3 fois pour les faibles charges, 2.5 fois pour les moyennes charges et 1.5 fois pour les grandes charges par rapport au déversoir Creager, et 1.3 fois pour les faibles et moyennes charges par rapport au déversoir en labyrinthe.

À travers les résultats obtenus dans cette étude on peut dire que le déversoir non rectiligne type PK-Weir est une solution rentable des points de vue hydraulique et économique pour l'aménagement du barrage déversoir sur Oued M'chounech. Ce type de déversoir évacué un grand débit sur une faible charge.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La recherche bibliographique du présent travail a eu pour objectif de passer en revue les principaux travaux effectués dans le domaine de déversoir rectiligne et non rectiligne. Cette étude nous a permis de définir la géométrie, le mode d'écoulement des différents types de déversoirs et leur rendement de point de vue hydraulique. Selon l'alignement du seuil et la forme de la structure de déversoir on distingue plusieurs types de déversoirs. Ainsi le débit qui transite par un déversoir est en fonction de la forme. Il est calculé par l'application de la formule classique de Poleni,

Ainsi, la bibliographie a montré que des déversoirs peuvent utilisés comme dispositifs de mesure de débit (Débitmètre), et peuvent utilisés comme des évacuateurs de crues. Leurs rendements hydrauliques sont très faibles devant les déversoirs non rectilignes.

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'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 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 troisième chapitre de ce travail a été consacré à l'étude comparative entre le déversoir rectiligne type Creager et le déversoir non rectiligne type labyrinthe et le PK-Weir, pour déterminer le déversoir le plus efficace qui évacué un grand débit sur une faible charge et sans risque sur les ouvrages de projet d'aménagement d'Oued M'chounech. Les résultats obtenus dans cette étude ont montré que le déversoir non rectiligne type PK-Weir caractérisé par une capacité d'évacuation plus grande d'environ 3 fois par rapport le déversoir Creager, et 1.3 fois pour par rapport le déversoir en labyrinthe, et une solution rentable des points de vue hydraulique et économique pour l'aménagement d'Oued M'chounech.

NOTATIONS

Symbole	Désignation	Unité
a	Largeur de l'alvéole amont	[m]
A	longueur de la paroi frontale de déversoir en labyrinthe	[m]
b	Largeur de l'alvéole aval	[m]
B	Longueur d'une paroi latérale	[m]
B _i	Longueur du porte-à-faux amont	[m]
B _o	Longueur du porte-à-faux aval	[m]
B _b	Longueur de base	[m]
C	Coefficient de débit	[-]
C _n	Coefficient de débit de déversoir	[-]
C _L	Coefficient de débit de déversoir en labyrinthe	[-]
C _w	Coefficient de débit du déversoir PK-Weir	[-]
D	Hauteur aval des parois de déversoir en labyrinthe	[m]
E	Efficacité de déversoir	[%]
g	Accélération de la pesanteur	[m/s ²]
h*	Charge totale sur le déversoir	[m]
h ₁	Charge piézométrique amont	[m]
h ₂	Charge piézométrique aval	[m]
h _d	Charge piézométrique aval	[m]
H	La charge totale sur le déversoir	[m]
H _D	Charge de dimensionnement	[m]
H*	Charge totale en amont (condition d'écoulement noyé)	[m.c.e]
h _c	Charge cinétique	[m.c.e]
H _d	Charge total en aval (condition d'écoulement noyé)	[m.c.e]
H ₀	Charge total en amont (conditions d'écoulement libre)	[m.c.e]
H _e	Charge " effective " du déversoir	[m.c.e]
H _t	Charge total sur la crête	[m.c.e]
i	l'angle d'inclinaison de Déversoir incliné	[-]
L	Longueur développée du déversoir (L=a+b+2B)	[m]
L _e	Longueur efficace	[m]
K	coefficient de noyade du déversoir	[-]
n	Le nombre de cycles	[m]
P	Hauteur maximale de déversoir	[m]
P _i	Hauteur amont de déversoir	[m]
P _R	Hauteur de la rehausse	[m]
P _o	Hauteur aval de déversoir	[m]
P _d	hauteur du barrage (socle) en dessous du PK – Weir	[m]
Q	Débit évacué (m ³ /s)	[m ³ /s]
QL	Débit qui transite sur un déversoir en labyrinthe	[m ³ /s]
Q _n	Débit qui passe sur un déversoir rectiligne	[m ³ /s]
Q _{P.K.Weir}	Débit mesuré	[m ³ /s]
q	Débit spécifique	[m ² /s]
R _i	Hauteur de la rehausse en amont	[m]
R _o	Hauteur de la rehausse en aval	[m]
S _i	Pente d'inclinaison de radie d'alvéole amont	[°]
S _o	Pente d'inclinaison de radie d'alvéole aval	[°]
T	Epaisseur des parois	[m]

v	Vitesse d'écoulement	[m/s]
W	Largeur d'un cycle du déversoir en labyrinthe	[m]
W_t	Largeur total du déversoir	[m]
W_i	Largeur de l'alvéole amont	[m]
W_o	Largeur de l'alvéole aval	[m]
W_u	Largeur de cycle de déversoir PK-Weir	[m]
W_c	Largeur de canal	[m]
W_e	largeur " effective" du déversoir	[m]
α	Angle des parois latérales	[°]
α	Angle d'ouverture de l'échancrure	[°]
β	fonction empirique sans dimension de l'angle ε	[-]

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Anderson, R.M. & Tullis, B. (2011). Influence of Piano Key Weir geometry on discharge. Intl Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs PKW 2011, CRC Press London, 75–80.
- Afshar, A. 1998. The development of labyrinth spillway designs, Water Power & Dam Construction, pp. 36-39.
- Bouredji, S. 2012. Mémoire Magister en Hydraulique, Contribution à l'étude de l'effet des conditions amont sur l'écoulement du déversoir en touche de piano (PK-Weir), Biskra.
- Ben Said, M. 2007. Mémoire Magister en Hydraulique, Etude de l'optimisation des évacuateurs de crues en labyrinthe, Biskra.
- Ben Said, M. & Ouamane, A. 2011. Study of optimization of labyrinth weir. Intl Workshop on Labyrinth and piano key weirs PKW 2011, CRC press, London, 67-74.
- Belaabed, F. 2011. Mémoire Magister en Hydraulique, Contribution à l'étude des déversoirs en touches de piano (PK-Weir) noyés par l'aval en labyrinthe, Biskra.
- Belaabed, F. & Ouamane, A. 2011. Contribution to the study of the Piano Key Weirs submerged by the downstream level. Intl Workshop on Labyrinth and piano key weirs PKW 2011, CRC press, London, 89-98.
- BOUSSINESQ., 1871, « Théorie de l'intumescence liquide, appelée onde solitaire ou de translation, se propageant dans un canal rectangulaire », Comptes rendus de l'Académie des sciences, vol. 72, 1871, p. 755–759
- CARLIER, M. 1980. Hydraulique générale et appliquée, Eyrolles, pp. 189-215.
- CAROL, S. & KATHLEEN, L. 1982. A Site Specific Study of a Labyrinth Spillway, Proceeding of the conference Applying Research to Hydraulic Practice, Hydraulics Division of ASCE, pp. 86-95.
- Crookston, B.M. & Tullis, B.P. 2008. Labyrinth Weirs. 2nd International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures, Pisa, Italy, August 2008.
- Erpicum, S., Machiels, O., Archambeau, P., Dewals, B. & Pirotton M. 2011, Energy dissipation on a stepped spillway downstream of a Piano Key Weir. Intl Workshop on Labyrinth and piano key weirs-PKW 2011, London: CRC Press, 105-111.

- Gentilini, B. 1941. Stramazzi con cresta a pianta obliqua e a zig-zag. Memorie e studi dell' Instituto di Idraulicae Costruzioni Idrauliche del Regio Politecnico di Milano. No. 48. (In Italian).
- 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.
- Hager W.H. & Schleiss J. 2009. Constructions Hydrauliques, Écoulements stationnaires. Presses polytechniques et universitaires Romandes. Volume 15, 597 pages.
- Ho Ta Khanh, M., Sy Quat, D., Xuan Thuy, D. 2011a. P.K. weirs under design and construction in Vietnam. Proc. Intl Workshop on Labyrinths and Piano Key Weirs- PKW 2011, CRC press, London, 225-232.
- 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.
- Karimi, M., Saneie, M. & Jalili Ghazizadeh, M.R. (2017). Experimental study of discharge coefficient of a Piano Key Side Weir. Labyrinth and Piano Key Weirs III – PKW 2017 (pp. 109–116). Leiden: CRC Press
- Kabiri-Samani, A. & Javaheri, A. (2012). Discharge coefficients for free and submerged flow over Piano Key Weirs. Journal of Hydraulic Research, 50, 114–120.
- Lencastre, A. 1957. Hydraulique Générale, EYROLLES, pp. 324-337.
- Laiadi, A., Athmani, B., Belaabed, F. & Ouamane, A. (2017). The effect of the geometric shape of the alveoli on the performance of Piano Key Weirs. Labyrinth and Piano Key Weirs III- PKLW 2017 (pp. 93–100). Leiden: CRC Press.
- Laiadi, A., Boumaaza, H. & Ouamane A. 2012. Mémoire de fine d'étude, Etude de l'impact de la géométrie des alvéoles sur la performance du déversoir (PK-Weir), Biskra.
- Ladreyt, S. & Laborie V. 2005. Notice sur les déversoirs, Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales (CETMEF), France, pp 21-71.
- LADREYT S., LABORIE V., (2005), Notice sur les déversoirs, Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales (CETMEF), France, pp 21-71.
- Lux III, F. & Hinchliff, D.L. 1985 Design and Construction of Labyrinth Spillways, 15th Congress on Large Dams, ICOLD, Vol. IV, Q59, R 15, pp. 249-274, Lausanne.

- Lempérière, F., Sharma, N., Mourya, R. N., Shukla R. & Gupta, U. P. 2003. Experimental Study on Labyrinth Spillways. Proc. International Conference on Engineering of Dams and Appurtenant Works Including Power.
- Lempérière, F. & Ouamane, A. 2003. The Piano Keys Weir: a new cost-effective solution for spillways, The International Journal on Hydropower & Dams, Issue Four.
- Leite Ribeiro, M. Michael, P. & Schleiss, J. 2013. Overview of Piano Key weir prototypes and scientific model investigations. Intl Workshop on Labyrinth and piano key weirs -PKW 2013, CRC press, London, 273-281.
- Leite Ribeiro, M., Bieri, M., Boillat, J. L., Schleiss, A.J., Singhal, G. & Sharma, N. (2012). Discharge capacity of Piano Key Weirs. J. Hydraulic Eng. 138(2), 199–203
- Magalhaes, A.P & LORENA. Hydraulic desing of labyrinth weirs, laboratoire nationale de engenharia CIVIL, Memoria n°736, Lisbona 1989.
- Magalhaes, A. 1985. Labyrinth-Weir Spillways. 15th Congress on Large Dams, ICOLD, Vol. IV, Q59, R 24, pp. 395-407, Lausanne.
- Machiels, O. & Erpicum, S. 2012. Parapet wall effect on Piano Key Weirs efficiency. In Journal of Irrigation & Drainage Engineering. 139(6). 506-511
- Machiels, O., Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B. & Piroton, M. (2010). Analyse expérimentale de l'influence des largeurs d'alvéoles sur la débitance des déversoirs en touches de piano. La Houille Blanche, 2, 22–28 (in French).
- Noui A. 2007. Mémoire Magister en Hydraulique, Etude de l'optimisation de l'évacuateur de crues en touches de piano (PK-Weir), Biskra.
- Noui, A & Ouamane, A. 2011. Study of optimization of the Piano Key Wei. Intl Workshop on Labyrinth and piano key weirs PKW 2011, CRC press, London, 175-182.
- Le Doucen, O., Leite Ribeiro, M., Boillat, J.L., Schleiss, A.J. & Laugier, F. (2009). Etude paramétrique de la capacité des PK-Weirs [Parametric study of the discharge capacity of PK-Weirs. Modèles physiques hydrauliques – outils indispensables du XXI^e siècle (CD-ROM). SHF, Lyon F.
- Ouamane, A. & Lempérière, F., 2006. Amélioration de la forme des déversoirs en labyrinthe pour l'évacuation des grands débits, Séminaire National sur les ressources en eaux et leurs utilisations, Centre Universitaire Khemis Meliana.
- Ouamane, A. & Lempérière, F. 2006. Nouvelle conception de déversoir pour l'accroissement de la capacité des retenues des barrages, Colloque International sur la protection et la préservation des ressources en eau, Blida.

- Ouamane, A. & Lempérière, F., 2006. Design of a new economic shape of weir, International Symposium on Dams in the Societies of the XXI Century. Barcelona.
- Ouamane, A. 2006. Hydraulic and Costs data for various Labyrinth Weirs, 22th Congress on Large Dams, ICOLD, Q84, Barcelona.
- Ouamane, A. & Lempérière, F., 2007. Increase of the safety of existing dams - Rehabilitation of weir, Symposium: Dam Safety Management. Role of State, Private Companies and Public in Designing, Constructing and Operating of Large Dams» ICOLD 75th Annual Meeting Saint Petersburg, Russia.
- Ouamane, A. 2011. Nine years of study of the Piano Key Weir in the university laboratory of Biskra “lessons and reflections”. Intl Workshop on Labyrinth and piano key weirs PKW 2011, CRC press, London, 51-58.
- Ouamane, A. 2013. Improvement of labyrinth weirs Shape. Intl Workshop on Labyrinth and piano key weirs -PKW 2013, CRC press, London, 15-22.
- Pfister, M., Erpicum, S., Machiels, O. Schleiss, A.J., Pirotton, M. 2012. Discussion Discharge coefficient for free and submerged flow over Piano Key weirs, Journal of Hydraulic Research 50(6), 642-643.
- Schleiss, A.J. 2011. From Labyrinth to Piano Key Weirs – A historical review, Labyrinth and piano key weirs PKW 2011, CRC press, London, 03-16.
- SINNINGER R., HAGER W. (1989), Construction hydrauliques. Presse Polytechniques Romandes, Vol. 15, pp. 143-181.
- TISON, L. J. (1950), Cours d'hydraulique. Centerick.
- Tullis, B., Amanian, N. & Waldron, D. 1995. Design of Labyrinth Spillways, Journal of hydraulic engineering, Vol. 121, N° 3, pp. 247-255.
- Tullis, B. 2007. Predicting submergence effects for labyrinth weirs, International Symposium on Dams in the Societies of the XXI Century, Barcelona.
- Tullis, B.P. & Crookston, B.M. (2017). Physical modelling size-scale effects of labyrinth weirs with half-round crests. Labyrinth and Piano Key Weirs III - PKW 2017 (pp. 185–192). Leiden: CRC Press.
- Villemonte J.R. 1947. Submerged weir discharge studies, Engineering News Record December, pp. 866-869.4
- Bureau d'études M.A.T.H.E