

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département : Génie Civil &Hydraulique
Réf:.....



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية والري
المرجع :

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat en Sciences

Spécialité : Hydraulique

Option : Ouvrages Hydrauliques

Thème

Optimisation des déversoirs en labyrinthe

Présentée par :

Ben Saïd Mosbah

Soutenue publiquement le : 28 / 06 / 2018

Devant le jury composé de :

Mr REMINI Boualem	Professeur	Président	Université de Blida
M ^{me} BEN MEBAREK Naima	Professeur	Examinatrice	Université de Biskra
Mr GHOMRI Ali	Maitre de conférences	Examineur	Université d'El Oued
Mr OUAMANE Ahmed	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra

إهداء

إلى كل من

العائلة الصغيرة والكبيرة

إلى

الأصدقاء والزملاء

إلى

كل من عرفنا وعرفناه.

شكر و عرفان

بانتهاه هذا العمل الذي تم انجازه بمخبر تهيئة منشآت الري و البيئة التابع لقسم الهندسة المدنية والري لجامعة محمد خيضر-بسكرة, أود أن أتقدم بالشكر بعد الله تعالى لكل من :

الأستاذ المشرف على هذا العمل البروفسور احمد ومان على ما تفضل به من مجهود متواصل ونصائح سديدة و صبر كبير طوال مشوار هذا العمل.

الأستاذ رميني بوعلام, بروفيسور بجامعة البليدة لما أولاه من اهتمام لهذا العمل وكذا لترأسه لجنة التحكيم.

الأستاذة خزار نعيمة, بروفيسور بجامعة بسكرة لاهتمامها و قبولها مناقشة هذا البحث.

الأستاذ غمري علي, أستاذ محاضر بجامعة الوادي لاهتمامه و قبوله مناقشة هذا البحث.

أود أن اشكر كذلك الأستاذ فريجة عبد الحفيظ للمساعدة التي خصني بها وكذلك الشكر موصول لكل الزملاء سواء بمركز البحث العلمي والتقني بالمناطق الجافة - بسكرة أو بجامعة محمد خيضر- بسكرة.

ملخص

لا تزال الفيضانات تشكل مصدر قلق لمصممي ومشغلي السدود على حد سواء. بل زاد هذا القلق في العقود الأخيرة نتيجة لتغير المناخ ولاستحداث أساليب جديدة لتقدير كمية التدفقات للفيضانات الاستثنائية. وقد اظهر هذان العاملان عجز عدد كبير من الهدارات عن تصريف التدفقات المقدر حديثا التي يمكن أن تنتج عن الفيضانات الاستثنائية. ونتيجة لذلك فإن البحث لا يزال مستمرا من طرف مستغلي السدود لإيجاد حلول تمكن من زيادة سعة التصريف للهدارات المستغلة حاليا وكذلك توفير هدارات أكثر كفاءة لتجهيز السدود المراد انجازها.

من بين الحلول الممكنة لهاته المشكلة هو اعتماد الشكل الغير مستقيم في إعادة تصميم الهدارات المستغلة حاليا, كما يمكن كذلك تبني هذا الحل في انجاز سدود جديدة.

يهدف هذا العمل البحثي إلى تحسين الهدار المتاهي وخاصة ذا الشكل المستطيل (منظر أو مسقط علوي). ولأجل ذلك تم إجراء عدة تغييرات على الهدار ذي الشكل المتاهي بهدف تحسين الأداء الهيدروليكي وتقليص كلفة البناء. حيث شملت التغييرات كل من شكل المدخل قاعدة أو أساس المتاهة وكذلك ارتفاع الجدران الجانبية للهدار.

وكمساهمة في الدراسة النظرية للأداء الهيدروليكي للهدار المتاهي تم اقتراح علاقتين تطبيقيتين. الأولى تتعلق بحساب الأداء أو المردود الهيدروليكي للهدار والثانية لتسهيل حساب الأبعاد اللازمة لتصميم النماذج الأولية لهذا النوع من الهدارات.

كلمات مفتاحية : هدار متاهة نماذج فيزيائية علاقات تجريبية تصميم.

Abstract

Flood control remains a major concern for dam designers and operators. This concern has grown in recent decades as a result of climate change and the development of new methods for extreme flood estimation, which have shown the inadequacy of a significant number of spillways to evacuate increased extreme floods. Consequently, dam operators are seeking solutions that can increase the capacity of existing spillways and provide more efficient spillways for new dams. One possible solution is the remodeling of the existing spillway in non-rectilinear form and the adoption of this type of spillway for new dams.

The objective of this work is to optimize the labyrinth spillway, in particular the rectangular plan form. In this framework, standard labyrinth weir shape modifications are aimed to improve the hydraulic performance and to reduce the construction cost. These modifications concern the entrance shape, the basis length and the height of the side walls. During this research, a contribution to the theoretical study of the labyrinth weir efficiency is proposed. Two new practical relationships have been developed: the first one is developed to evaluate the labyrinth efficiency. The second one is proposed to facilitate the preliminary design of this type of weir.

Keywords: Spillway, Labyrinth, Physical Models, Empirical Relations, Design.

Résumé

La maîtrise des crues reste toujours un souci majeur pour les concepteurs et les exploitants des barrages. Ce souci a pris de l'ampleur durant ces dernières décennies et cela à cause du changement climatique et du développement de nouvelles méthodes d'estimation des crues extrêmes. Ces facteurs cités ont montré l'incapacité et l'insuffisance d'un grand nombre de déversoirs pour évacuer les crues extrêmes actualisées. Par conséquent, les exploitants des barrages cherchent des solutions qui permettent d'augmenter la capacité des évacuateurs de crues existants et de prévoir des évacuateurs de crues plus performants pour les nouveaux barrages. L'une des solutions possibles pour résoudre ce problème réside dans le remodelage en forme non rectiligne des évacuateurs de crues des barrages existants, cette solution peut être aussi adoptée pour les nouveaux barrages.

L'objectif de ce travail est d'optimiser l'évacuateur de crues en labyrinthe, en particulier la forme rectangulaire en plan. Dans ce sens, des modifications de la forme du déversoir en labyrinthe standard ont été effectuées visant l'amélioration de la performance hydraulique et la réduction du coût de la construction. Ces modifications ont concerné la forme d'entrée du labyrinthe, la longueur à la base du labyrinthe et la hauteur des murs latéraux.

Au cours de cette recherche, une contribution à l'étude théorique de la performance hydraulique du déversoir en labyrinthe est proposée. Deux relations de première estimation pratiques ont été développées : l'une est destinée à l'estimation de la performance du déversoir en labyrinthe. L'autre pour le pré-dimensionnement du même type de déversoir.

Mots clés : Déversoir, Labyrinthe, Modèles physiques, Relations Empirique, Dimensionnement.

Sommaire

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

Première Partie Etude bibliographique

Chapitre I Déversoir rectiligne

I.1 Introduction	4
I.2 Déversoir rectiligne à paroi mince	5
I.2.1 Déversoir à crête perpendiculaire au sens de l'écoulement	6
I.2.2 Déversoir à crête oblique par rapport au sens de l'écoulement.....	7
I.2.3 Déversoir latéral	8
I.3 Déversoir standard	9
I.3.1 Développement du déversoir standardisé.....	9
I.4 Déversoir à seuil épais	10

Chapitre II Déversoir non rectiligne

II.1 Introduction	11
II.2 Différentes formes des déversoirs non rectilignes	11
II.2.1 Déversoir à crête circulaire	11
II.2.2 Déversoir en labyrinthe	13
II.2.2.1 Définition.....	13
II.2.2.2 Liste des barrages équipés par déversoir en labyrinthe dans le monde	14
II.2.2.3 L'écoulement sur le déversoir en labyrinthe	15
II.2.2.4 Paramètres affectant la performance	17
II.2.2.4.1 Ratio d'accroissement de la longueur L/W	17
II.2.2.4.2 Effet de la charge relatif Ht/P	19
II.2.2.4.3 Rapport d'aspect vertical, W/P	19
II.2.2.4.4 Le ratio de l'épaisseur relative P/tw	19
II.2.2.4.5 Forme de la crête	19
II.2.2.4.6 Impact de l'inclinaison des murs latéraux	20
II.2.2.4.7 Le nombre de cycle N	21
II.2.2.4.8 Effet de la variation de largeur des alvéoles.....	21
II.2.2.4.9 Impact de la forme d'entrée et de l'emplacement de labyrinthe	22
II.2.2.4.10 Impact de remplissage des alvéoles.....	24

II.2.2.4.11	Effet de la forme en plan sur le rendement de labyrinthe.....	26
II.2.2.4.12	Impact de l'interférence en aval	28
II.2.2.4.13	Aération de la nappe.....	31
II.2.2.5	Capacité hydraulique du déversoir en labyrinthe	31
II.3	Déversoir en labyrinthe fusible	43
II.3.1	Définition	43
II.3.2	Fonctionnement des hausses fusibles.....	44
II.4	Déversoir en touches de Piano (P.K.Weir)	46
II.4.1	Définition	46
II.4.2	Mode d'écoulement sur le P.K.Weir.....	49
II.4.3	Performance hydraulique	50
II.4.3.1	Longueur relative, L/W	50
II.4.3.2	Impact de la largeur des alvéoles W_e et W_o	51
II.4.3.3	Rapport d'aspect vertical W/P	52
II.4.3.4	Impact de la longueur des porte-à-faux	53
II.4.3.5	Impact des corps flottants.....	53
II.4.3.6	Effet de la forme d'entrée.....	54
II.4.3.6.1	Sous les porte-à-faux amont.....	54
II.4.3.6.2	Au pied du déversoir	55
II.4.4	Estimation du coefficient de débit par voie de calcul	57
II.5	Conclusion de la première partie	60

Deuxième Partie
Etude expérimentale

Chapitre I

Description du dispositif et protocole expérimentaux

I.1	Introduction	62
I.2	La station d'expérimentation	64
I.3	Appareillage de mesure.....	65
I.4	Les modèles des déversoirs	66
I.5	Procédure expérimentale	70
I.6	Calcul de la charge total.....	70

Chapitre II

Résultats et discussions

II.1	Introduction	73
II.2	Résultats et discussions	73
II.2.1	Impact de la forme d'entrée du labyrinthe	73
II.2.2	Effet de Largeur des alvéoles a/b	75
II.2.3	Influence du rapport L/W	76
II.2.3.1	Labyrinthe de forme rectangulaire	76
II.2.3.2	Labyrinthe de forme trapézoïdale.....	78
II.2.3.3	Comparaison des formes du labyrinthe rectangulaire et trapézoïdale	79
II.2.4	Conception de la crête en porte-à-faux	81
II.2.5	Impact de la forme du radier des alvéoles aval	84
II.3	Conclusion de la deuxième partie.....	86

Troisième Partie

Contribution à l'étude théorique

Chapitre I

Développement Théorique

I.1	Introduction	87
I.2	Développement Théorique	87
I.3	Méthode de la conception préliminaire	92

Chapitre II

Comparaison et Discussion

II.1	Introduction	95
II.2	Application et comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux ...	95
II.2.1	Impact de la forme d'entrée du labyrinthe	100
II.3	Méthode de conception préliminaire	101
II.3.1	Exemple d'application.....	103
II.4	Conclusion de la troisième partie	104
Conclusion générale.....		106
Référence Bibliographiques.....		110

Liste des figures

Première Partie
Etude bibliographique

Figure I.1. Ecoulement sur un déversoir rectiligne.	4
Figure I.2. Schéma de l'écoulement sur un déversoir à crête mince.	5
Figure I.3. Déversoir en mince paroi standard.	6
Figure I.4. Déversoir à crête oblique par rapport à l'axe.	7
Figure I.5. Déversoir en mince paroi latéral.	8
Figure I.6. Déversoir correspondant.	9
Figure I.7. Déversoirs à seuil épais.	10
Figure II.1. L'écoulement sur un déversoir en touches de piano.	11
Figure II.3. Evacuateur de crues de forme circulaire du barrage du Hamiz (Algérie).	12
Figure II.2. Déversoir à crête circulaire.	12
Figure II.4. Vue de déversoir en labyrinthe du barrage Beni Bahdel –Algérie	13
Figure II.5. . Déversoirs en labyrinthe formes trapézoïdale	15
Figure II.6. Ecoulement à faible charge.	16
Figure II.7. Ecoulement à grande charge.	17
Figure II.8. Performance du labyrinthe, $L/W = 2$	18
Figure II.9. Performance du labyrinthe, $L/W = 6$	18
Figure II.10. Effet de la forme de la crête sur la performance (Hay et Taylor).	20
Figure II.11. Exemple des formes de la crête.	20
Figure II.12. Configuration géométrique du déversoir en labyrinthe (Gentilini 1941)	21
Figure II.14. Déversoir en labyrinthe une forme d'entrée profilée à gauche et une forme d'entrée plate à droite	22
Figure II.13. Débit en fonction de la largeur des alvéoles pour $L/W = 4$	22
Figure II.15. Coefficient du débit en fonction de la forme d'entrée (Ouamane 2013)	23
Figure II.16. Schémas du déversoir en labyrinthe avec et sans contraction latérale	23
Figure II.17. Coefficient du débit en fonction de l'emplacement de modèle.	24
Figure II.18. Coefficient de débit du déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire arrondi en fonction	24
Figure II.19. Coefficient de débit du déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire arrondie en fonction des conditions de remplissage des alvéoles de $\frac{1}{2} B$ et de $L/W = 5.97$ $W/P = 1$	25
Figure II.20. L'effet du remplissage (Ouamane 2013).	26

Figure II.21. Déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire avec une forme d'entrée arrondie et avec des alvéoles partiellement remplis (Ouamane, 2013).....	26
Figure II.22. Coefficient du débit en fonction de la forme en plan du déversoir (Ouamane 2013).....	27
Figure II.23. Déversoir en labyrinthe avec des porte-à-faux (Ouamane 2013).....	27
Figure II.24. Coefficient du débit du déversoir en labyrinthe et du déversoir linéaire.....	28
Figure II.25. L'interférence de la nappe Indlekofer and Rouvé (1975).....	29
Figure II.26. Longueur de la zone de l'interférence de la nappe Crookston and Tullis (2010).....	30
Figure II.27. Les formes des déversoirs ont été testées par Gentilini (1941).....	32
Figure II.29. L'effet de la charge relative h/l et l'angle α sur le ratio Q/Q_n (Gentilini 1941).....	33
Figure II.28. L'effet de la charge relative h/l et l'angle α sur la capacité de l'évacuation μ/μ_n (Gentilini 1941).....	33
Figure II.30. Représentation des résultats obtenus par Kozák et Sváb (1961).....	34
Figure II.31. Géométrie des déversoirs en labyrinthe étudiés par Hay et Taylor (1970).....	35
Figure II.32. L'efficacité (E) en fonction de h/p Geoffrey Taylor (1968).....	36
Figure II.33. Coefficient de débit d'un déversoir en labyrinthe en fonction de l/w et h/P Darvas 1971.....	37
Figure II.34. Coefficient de débit μ_w de labyrinthe.....	38
Figure II.35. Schémas de déversoir en labyrinthe (Lux et Hinchliff, 1984).....	39
Figure II.36. Coefficient de débit du déversoir en labyrinthe à crête en quart de cercle (A- Triangulaire, B- Trapézoïdale (Lux & Hinchliff, 1985).....	40
Figure II.36. Coefficient de débit du déversoir en labyrinthe à crête en quart de cercle (A- Triangulaire, B- Trapézoïdale (Lux & Hinchliff, 1985).....	40
Figure II.37. Coefficient de débit des déversoirs en labyrinthe (Tullis, 1995).....	41
Figure II.38. Schéma d'un élément des hausses fusibles.....	44
Figure II.39. Fonctionnement d'une hausse fusible avant renversement.....	44
Figure II.40. Fonctionnement d'une hausse fusible lors de dépassement.....	45
Figure II.41. Hausse fusible en phase de renversement.....	45
Figure II.42. Un barrage avec un déversoir de type Piano Key Weir.....	47
Figure II.43. Vue en perspective d'un déversoir du P.K. Weir.....	47
Figure II.44. Configuration géométrique de P.K.W. type A et B.....	48
Figure II.45. Écoulement en deux nappes déversantes sur un cycle de P.K. Weir (Ouamane, 2006b).....	49
Figure II.47. La charge relative amont en fonction de la charge relative aval.....	51
Figure II.46. Coefficient de débit en fonction du ratio L/W (Ouamane, 2006b).....	51
Figure II.48. Coefficient de débit en fonction de la largeur des alvéoles.....	52
Figure II.49. Coefficient de débit en fonction du rapport de l'aspect vertical W/P	52
Figure II.50. Coefficient de débit en fonction de la longueur.....	53

Figure II.51. Fonctionnement du PK-Weir avec la présence des corps flottants.....	54
Figure II.52. Coefficient de débit en fonction de la forme d'entrée sous les porte-à-faux (Ouamane, 2006b).....	55
Figure II.53. Différents aspects de la forme sous les porte-à-faux.....	55
Figure II.54. Emplacement avec et sans socle.....	56
Figure II.55. Fonctionnements du PKW avec les deux d'emplacements.....	56
Figure II.56. Les formes d'entrée au pied amont du déversoir.....	57
Figure II.57. Fonctionnement du PK-Weir en fonction de la forme amont du Socle.....	57

Deuxième Partie
Etude Expérimentale

Figure I.1. Vue extérieure de la station d'expérimentation.....	62
Figure I.2. Vue en aval du bassin de simulation.....	63
Figure I.3. Vue en aval du canal de simulation.....	63
Figure I.4. Schéma du canal d'expérimentation.....	64
Figure I.5. Les deux types de débitmètres utilisés.....	65
Figure I.6. Détecteur de niveau à ultrason.....	66
Figure I.7. Labyrinthe rectangulaire avec une forme d'entrée plate.....	68
Figure I.8. Labyrinthe rectangulaire arrondie en amont.....	68
Figure I.9. Labyrinthe Trapézoïdale.....	68
Figure I.10. Labyrinthe avec des porte-à-faux amont et aval.....	69
Figure I.11. Labyrinthe avec des porte-à-faux uniquement en amont.....	69
Figure I.12. Labyrinthe avec des porte-à-faux uniquement en aval.....	69
Figure II.1. Effet de la forme de l'entrée sur le coefficient de débit.....	74
Figure II.2. Effet de la forme d'entrée sur l'écoulement pour un débit de 80 l/s.....	74
Figure II.3. Effet du ratio des largeurs des alvéoles amont et aval sur le coefficient de débit pour $L/W = 4$	75
Figure II.4. L'effet du ratio de longueur de la crête L/W	77
Figure II.5. L'effet du ratio de longueur de la crête L/W	78
Figure II.6. Déversoir en labyrinthe (à gauche labyrinthe trapézoïdale – à droite labyrinthe rectangulaire).....	79
Figure II.7. Effet de la forme en plan sur le rendement du labyrinthe pour $L/W = 4$	79
Figure II.8. Effet de la forme en plan sur le rendement du labyrinthe pour $L/W = 5$	80
Figure II.9. Effet de la forme en plan sur le rendement du labyrinthe.....	81
Figure II.10. L'effet de la géométrie des porte-à-faux.....	82

Figure II.11. Ecoulement d'un labyrinthe avec des porte-à-faux amont et aval pour un débit de 165 l/s.	83
Figure II.12. Ecoulement d'un labyrinthe avec des porte-à-faux uniquement en amont pour un débit de 165 l/s.	83
Figure II.13. Ecoulement d'un labyrinthe avec des porte-à-faux uniquement en aval pour un débit de 165 l/s. ...	83
Figure II.14. Schémas des deux variantes de remplissage partiel des alvéoles aval.	84
Figure II.15. Effet de la forme du radier de l'alvéole aval.	85

Troisième Partie
Contribution à l'étude théorique

Figure I.1. Schéma du modèle de déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire arrondie en amont	88
Figure I.2. Performance du labyrinthe en fonction de la charge relative ($L/W= 4$).	89
Figure II.1. Comparaison entre les valeurs du rendement expérimental et théorique.	97
Figure II.2. Comparaison entre les valeurs du rendement expérimental et théorique.	99
Figure II.3. Comparaison entre les valeurs du rendement expérimental et théorique. Avant l'adaptation (Gauche) et après l'adaptation (Droite).	101

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Caractéristiques des modèles réduits	67
Tableau II.1 : Valeurs expérimentales et théoriques du rendement r calculé selon l'équation (I.8).	100

Principales Notations

Symbole	Désignation	Unité
a	Largeur de l'alvéole amont	[m]
A	Section de l'écoulement dans le bassin de simulation	[m ²]
b	Largeur du déversoir	[m]
b	Largeur de l'alvéole aval	[m]
B	La longueur de la paroi latérale de la crête	[m]
β	Coefficient empirique	[-]
c	Longueur du porte-à-faux aval	[m]
C_d	Coefficient de débit	[-]
$\overline{C_d}$	Coefficient de débit	[-]
C_w	Coefficient de débit du déversoir	[-]
D	Hauteur maximale aval du P.K.Weir	[m]
\mathcal{E}	Coefficient empirique	[-]
g	Accélération de l'apesanteur	[m/s ²]
h :	Charge piézométrique mesurée	[m]
H*	Charge totale sur le seuil du déversoir	[m]
h _c	Charge cinétique	[m]
Q	Débit évacué	[m ³ /s]
q	Performance du déversoir expérimenté	[-]
Q _{cr} :	Débit qui passe par un déversoir de creager	[m ³ /s]
Q _{P.K.Weir}	Débit évacué par le P.K.Weir	[m ³ /s]
Q _L	Débit évacué par le labyrinthe	[m ³ /s]
Q _N	Débit qui passe par un déversoir rectiligne	[m ³ /s]
r	Rendement du déversoir	[-]
L	Longueur développée du déversoir (L=a+b+2B)	[m]
P	Hauteur du déversoir	[m]
W _t	Largeur totale du déversoir	[m]
w	Largeur d'un cycle du labyrinthe	[m]
μ	Coefficient de débit d'un déversoir standard de type Creager	[-]
a/b	Rapport de la largeur du déversoir	[-]
L/W	Rapport de la longueur du déversoir	[-]
H*/P	Rapport de la charge	[-]
B _i /B	Rapport de longueur des Porte-à-faux aval	[-]
B _o /B	Rapport de longueur des Porte-à-faux amont	[-]

Introduction générale

Introduction générale

Ces dernières décennies, le changement climatique et le développement de nouvelles méthodes d'estimation des crues extrêmes ont montrées l'incapacité d'évacuation d'un grand nombre des déversoirs existants, ce qui pose un vrai problème pour les opérateurs et les concepteurs de barrages. Pour remédier à cette situation, les exploitants des barrages cherchent une solution qui permet d'augmenter la capacité des évacuateurs de crues existants et de prévoir des évacuateurs de crues plus performants pour les nouveaux barrages. L'une des solutions la plus adéquate est d'adopter une forme non rectiligne de l'évacuateur de crues des barrages existants qui peut être aussi suivie et appliquée pour les nouveaux barrages.

Le déversoir en labyrinthe se caractérise par une forme en plan non rectiligne. Il représente une alternative fiable et économique ; on peut l'utiliser pour accroître la capacité d'évacuation des crues et/ou augmenter la capacité de stockage des retenues des barrages existants. Comme il représente aussi une structure économique pour les nouveaux barrages. Le déversoir en labyrinthe est souvent conçu sous forme triangulaire ou de forme trapézoïdale en plan avec des murs verticaux (Ouamane et Lemperière. 2013). Cependant, la forme rectangulaire peut être aussi performante du point de vue hydraulique et structurel. Dans ce sens, on cite l'évacuateur de crues du barrage Bakhadda en Algérie comme exemple qui a une forme basée sur des éléments presque rectangulaires avec des parois frontales inclinées et un alignement curviligne.

Le déversoir en labyrinthe peut être à la fois une structure moins couteuse et plus rentable. Il se caractérise par une forme en plan non linéaire représentée par des répétitions géométriques souvent : trapézoïdales, triangulaires ou rectangulaires en plan. Cette configuration permet d'augmenter la longueur du seuil du déversoir de manière significative (Crookston et al. 2010).

Les paramètres les plus importants pour déterminer la capacité d'un déversoir linéaire sont la hauteur, la forme de la crête, et la longueur de la crête (Falvey et al.1995).Cependant, la capacité des déversoirs en labyrinthe dépend de plusieurs paramètres géométriques qui rendent difficile la résolution du problème par voie mathématique Lux III et al. (1985).

Plusieurs études ont été réalisées pour identifier les paramètres géométriques qui affectent la performance du déversoir en labyrinthe. On peut évoquer les travaux de Gentilini (1940) et Kozák et al. (1961). Quelque années plus tard, une autre étude plus approfondie a été menée par Taylor (1968) et Hay et Taylor (1970) qui a abouti à une procédure de conception des déversoirs en labyrinthe de forme triangulaire et trapézoïdale.

D'autres études ont été réalisées par l'USBR dont les résultats ont été interprétés et analysés par Hinchliff et al. En 1984 et Lux et al. en 1985. Ces dernières études ont été complétées par de nombreux travaux expérimentaux réalisés par Tullis et al en 1995, qui ont développés une méthode de conception simplifiée en utilisant l'équation du déversoir standard.

En 2013, A. Ouamane et F. Lemperière ont mené une étude dans laquelle ils ont justifié que la forme rectangulaire en plan du déversoir en labyrinthe est aussi efficace que celle d'un déversoir trapézoïdale surtout pour les charges relatives inférieures à 0,5 (Ouamane et Lemperière. 2013).

Malgré ces nombreux travaux expérimentaux et théoriques réalisés dans ce domaine, l'évaluation de la performance ou le rendement et la conception du déversoir en labyrinthe demeure toujours un premier souci voir même un défi pour les concepteurs de ce type de déversoir. Ceci est principalement dû à la complexité de l'expression des formules proposées qui utilisent souvent les méthodes statistiques, pour le calcul du rendement ou du coefficient de débit de l'écoulement. En plus de la complexité des méthodes de calcul citées au préalable, en remarque l'absence d'une méthode explicite et simple qui permet la détermination des dimensions nécessaires à la conception du modèle initiale de projets.

A partir de ce constat, il était intéressant d'entamer une étude qui porte sur l'optimisation de l'évacuateur de crues en labyrinthe. Dans un premier temps, notre travail de recherche consiste à présenter quelques améliorations sur la forme du déversoir en labyrinthe standard qui peuvent avoir un effet positif sur la performance hydraulique et économique. Dans un second temps, proposer une relation simple pour l'estimation du rendement de déversoir en labyrinthe et de suggérer une relation explicite permettant le pré-dimensionnement du déversoir en labyrinthe.

Afin d'atteindre les objectifs fixés, cette étude a été subdivisée en trois parties :

La première partie concerne une synthèse bibliographique ayant deux chapitres. Le premier chapitre est consacré à l'état de connaissances de la performance hydraulique qui caractérise les déversoirs rectilignes et à la présentation des différentes formules théoriques usuelles destinées à l'évaluation du coefficient de débit des trois types de déversoirs, à savoir, le déversoir rectiligne à paroi mince, le déversoir standard et le déversoir à seuil épais.

Le deuxième chapitre traite l'état de l'art concernant le déversoir en labyrinthe, le déversoir en labyrinthe fusible et le déversoir en touche de piano (Piano Key Weir) inventé en 2003 par A. Ouamane et F. Lemperière. Dans ce chapitre, nous présenterons les différents travaux expérimentaux et théoriques réalisés dans le cadre de l'optimisation de la forme du Piano Key Weir et le déversoir en labyrinthe, ainsi qu'un aperçu sur le mécanisme de rupture d'un

élément et la relation de calcul du coefficient de débit qui caractérise le déversoir en hausse fusible.

La deuxième partie est consacrée à l'étude expérimentale du déversoir en labyrinthe. Cette partie contient deux chapitres. Le premier est réservé à la méthodologie expérimentale, l'instrumentation et le protocole de la réalisation des essais.

Le second chapitre est consacré à la représentation des résultats des essais effectués sur les différentes configurations géométriques dans l'objectif d'améliorer la performance hydraulique par le remodelage de la forme géométrique du déversoir en labyrinthe.

La troisième partie est réservée à la représentation d'une contribution théorique qui se rapporte à la proposition de relations mathématique pour le pré-dimensionnement du déversoir en labyrinthe. Cette partie est scindée en deux chapitres. Le premier est exclusivement consacré au développement théorique : il s'agit de proposer une relation liant les principaux paramètres géométriques et hydraulique, permettant le calcul de la performance hydraulique du déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire en plan.

Le deuxième chapitre est consacré à l'application et la comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux. Et en outre, un exemple explicatif de la méthode de dimensionnement d'un déversoir en labyrinthe est présenté.

Première Partie

Etat des connaissances sur les évacuateurs des crues

Chapitre I

Déversoir rectiligne

Chapitre I

Déversoir rectiligne

I.1 Introduction

Le déversoir, est une structure hydraulique édifée à travers les cours d'eau, les canaux, les rivières et les barrages réservoirs. Il a pour objectif de :

- Mesurer le débit d'eau.
- Dévier le cours d'eau.
- Contrôler le niveau d'eau.

Le déversoir est généralement conçu pour qu'il soit utilisé dans des conditions d'écoulement libre. Sa disposition peut être perpendiculaire par rapport à la direction de l'écoulement comme elle peut être oblique permettant le prolongement de la longueur du seuil du déversement.

Il existe deux types de déversoirs qui se différencient par la forme du seuil :

L'un à seuil mince qui engendre la perturbation d'eau, l'autre à seuil épais facilitant l'écoulement d'eau.



Figure I.1. Ecoulement sur un déversoir rectiligne.

I.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).

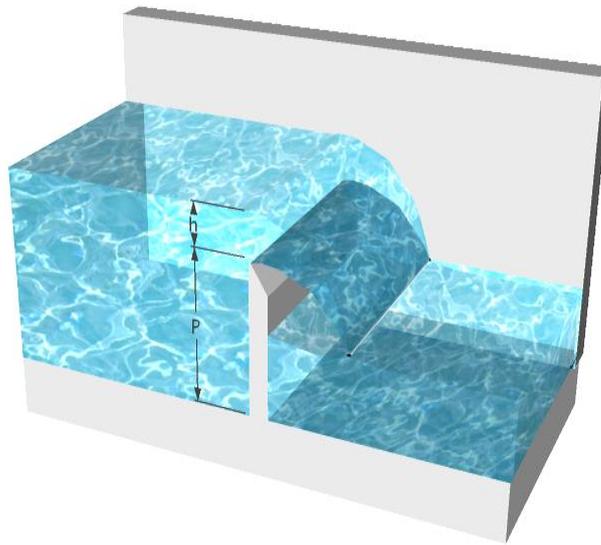


Figure I.2. Schéma de l'écoulement sur un déversoir à crête mince.

Un seuil peut être considéré à paroi mince lorsque $H/L > 1,5$, L est 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. (Bos, 1976).

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.

$$Q = C_d b \sqrt{2gh^3} \quad (I.1)$$

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.2.1 Déversoir à crête perpendiculaire au sens de l'écoulement

Un déversoir rectangulaire à mince paroi avec une largeur b permet la mesure de débit d'eau. Quand la paroi est placée verticalement dans un canal rectangulaire prismatique et la crête a la forme de la figure(I.3) en plus que la nappe inférieure soit suffisamment aérée, ces trois critères permettent de dire que cette structure est appelée déversoir standard à paroi mince. Le débit d'eau déversé dans ce type de déversoir se calcule selon la relation de Poleni, 1683-1761.

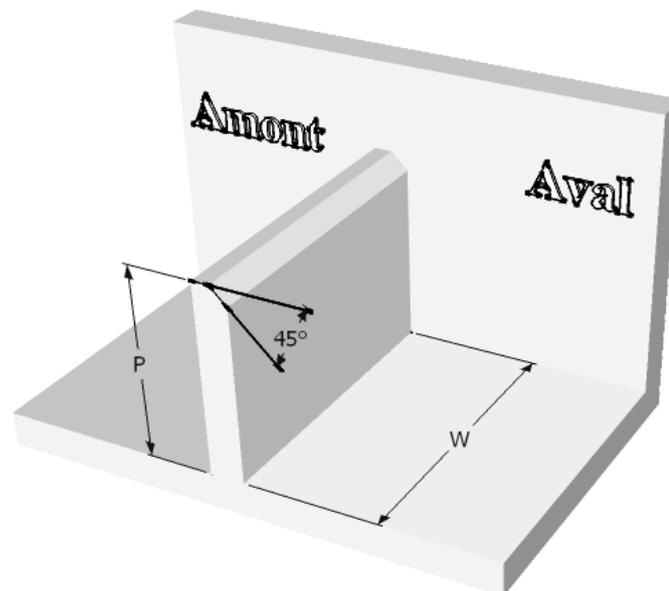


Figure I.3. Déversoir en mince paroi standard.

I.2.2 Déversoir à crête oblique par rapport au sens de l'écoulement

Le déversoir oblique ou incliné à paroi mince se qualifie par l'écoulement libre d'eau. Il se place obliquement par rapport à l'axe longitudinal du canal (Fig. I.4). Parmi ses avantages, sa position augmente la longueur efficace de la crête qui favorise l'évacuation d'un grand débit d'eau et cela en gardant la même la largeur du canal en plus de la même hauteur P . Dans ce contexte, l'idée du déversoir en labyrinthe est survenue. Pour la concrétiser, il suffit de placer obliquement certains nombres de sections. Historiquement, Ce type de déversoir représente une étape très avancées dans la réalisation des déversoirs en labyrinthe (G.Taylor 1968).

Le déversoir oblique est considéré comme une forme minime égale à un demi de cycle N par rapport au nouveau déversoir en labyrinthe ayant une forme triangulaire (G.Taylor 1968).

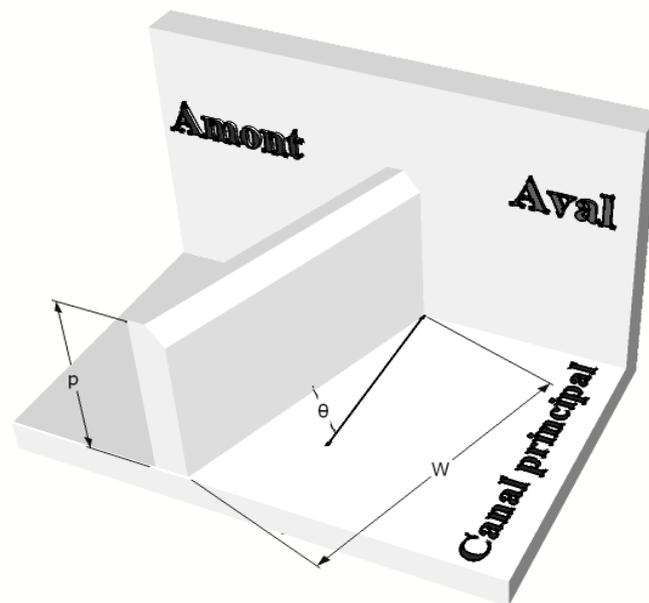


Figure I.4. Déversoir à crête oblique par rapport à l'axe.

I.2.3 Déversoir latéral

Le déversoir latéral est linéaire. Il se place parallèlement à la direction de l'écoulement principale. Ce dispositif de déviation se caractérise par le libre déversement au-dessus de la crête. Il est largement utilisé dans l'irrigation, le drainage des terres et le système d'égouts urbains. Selon Hager(1987), la capacité de l'évacuation est affectée par la variation de la charge sur le déversoir, la vitesse de l'écoulement et l'angle de déversement. Basé sur ces trois paramètres, Hager a proposé une formule générale du coefficient du débit C_{dLs} :

$$C_{dLs} = C_{dL} \left(\frac{h}{H}\right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{H}{3H - 2h}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (I.2)$$

C_{dL} : Coefficient de débit de déversoir traditionnel.

H : La charge sur la crête de déversoir latéral.

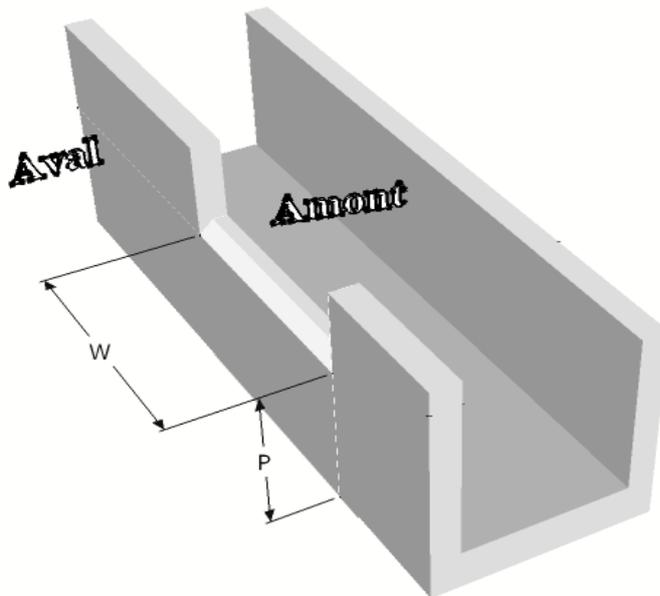


Figure I.5. Déversoir en mince paroi latéral.

I.3 Déversoir standard

I.3.1 Développement du déversoir standardisé

Pour améliorer les conditions de l'écoulement d'eau et d'éviter l'effet négatif de la vibration causée par les zones de sous-pression, une solution alternative a été effectuée visant le remplissage en béton du vide situé sous la lame d'eau est permet à l'écoulement d'eau de suivre la trajectoire de la nappe libre évacuée.

Ces deux types de déversoirs gardent pratiquement le même fonctionnement. La charge H est mesurée à partir de la crête du déversoir standard. L'équation (I.1) devient :

$$Q = C_d b \sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}} \quad (I.3)$$

C_d est le coefficient de débit du déversoir standard.

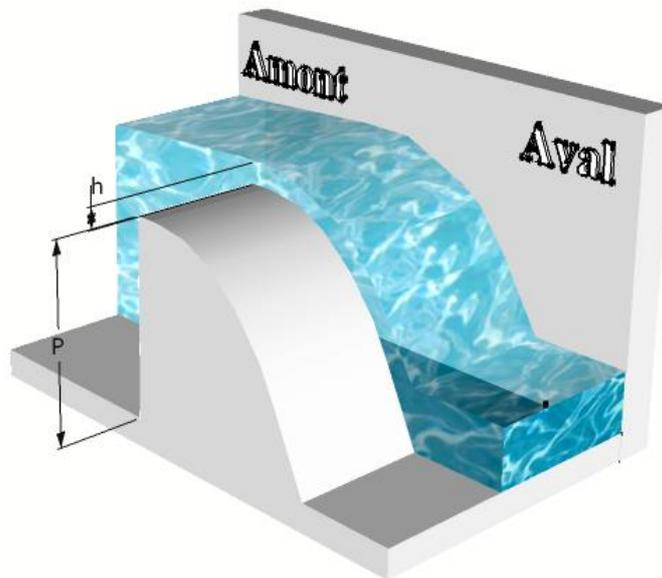


Figure I.6. Déversoir correspondant.

I.4 Déversoir à seuil épais

Un déversoir à seuil épais se caractérise par une crête horizontale et plus large dont les filets liquides sont parallèles sur la crête du déversoir (Bos, 1976).

Ce type de déversoir (Fig. I.7) se distingue par une pente amont avec un angle θ et une longueur de la crête L_c . Il fait partie des ouvrages de contrôle. Sa capacité d'évacuation peut être calculée à partir de la formule (I.4), où, C_e , est un coefficient de correction (Bos, 1976).

$$Q = \overline{C_d} c_e \sqrt{2g} H^2 \quad (I.4)$$

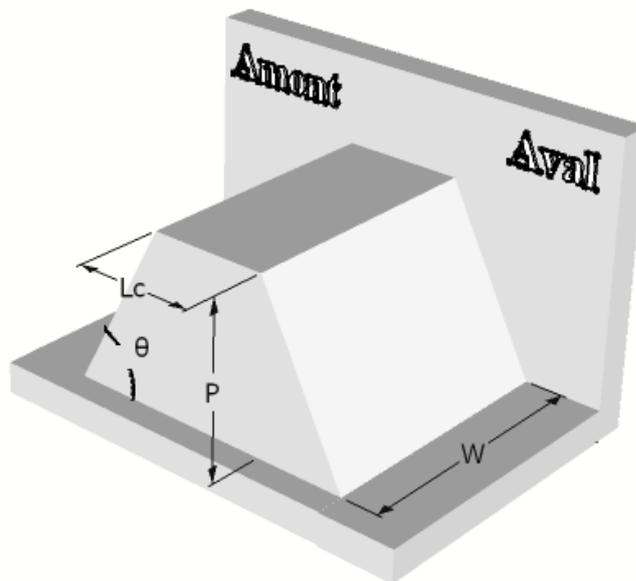


Figure I.7. Déversoirs à seuil épais.

Chapitre II

Déversoir non-rectiligne

Chapitre II

Déversoir à crête non rectiligne

II.1 Introduction

Le déversoir à crête non rectiligne se caractérise par une forme en plan non linéaire. Par conséquent, l'écoulement d'eau diffère de celui d'un déversoir rectiligne.

Son efficacité dépend de la longueur et la forme de sa crête. Au fil des années, de nombreuses formes de déversoir non rectiligne ont été développées, citant comme exemple ;

- L'évacuateur de crue à crête circulaire.
- Les hausses fusibles.
- Le déversoir en labyrinthe.
- Le déversoir en touches de piano (Piano Key Weir) dernier développement.



Figure II.1. L'écoulement sur un déversoir en touches de piano.

II.2 Différentes formes des déversoirs non rectilignes

II.2.1 Déversoir à crête circulaire

La forme en plan de la crête de ce type de déversoir est généralement circulaire. Elle est suivie d'un puits et d'une galerie horizontale placée aux abords du barrage. Deux modes d'écoulement se distinguent, l'un à faible débits, l'autre au débit élevé. Pour le premier cas, l'eau tombe librement au tour des parois du puits, laissant au centre un espace vide qui évite

la perturbation de l'eau qui pénètre dans la galerie. En ce qui concerne le deuxième cas, le déversoir est entièrement chargé et dit noyé (Gardel, A. 1949).

Le déversoir à crête circulaire a de nombreux avantages d'utilisation, parmi lesquels:

- La situation hors barrage.
- La simplicité de l'ouvrage dans sa forme et sa structure.
- Des dimensions réduites.
- La simplification du vannage par rapport au déversoir rectiligne (Gardel, A. 1949).

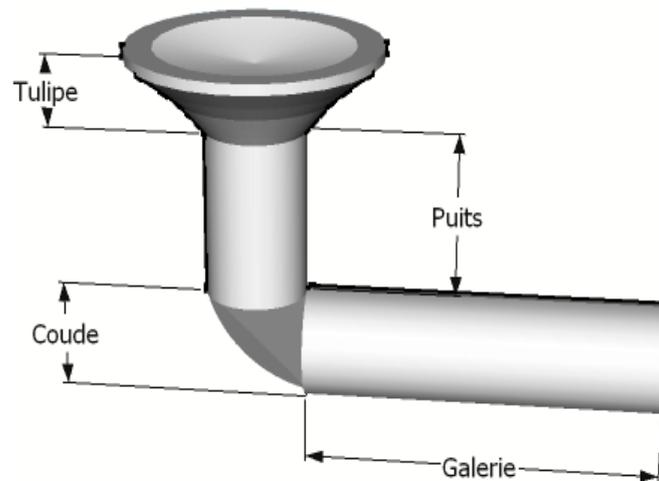


Figure II.2. Déversoir à crête circulaire.

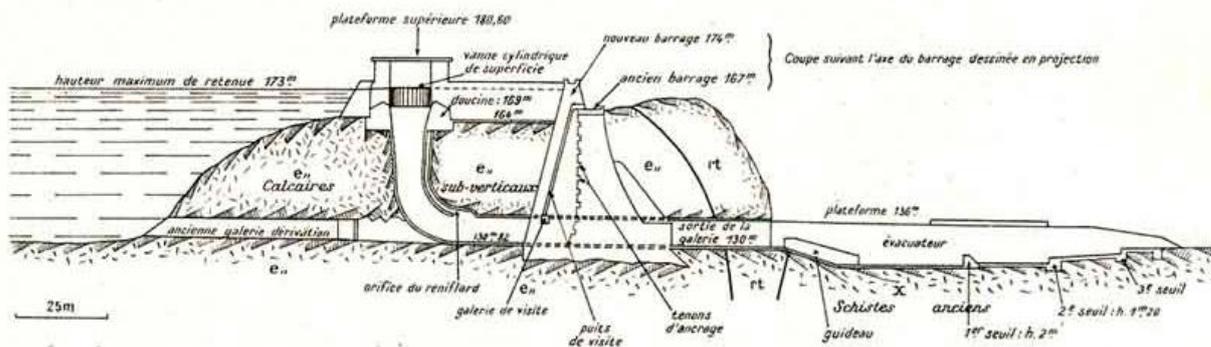


Figure II.3. Evacuateur de crues de forme circulaire du barrage du Hamiz (Algérie).

II.2.2 Déversoir en labyrinthe

II.2.2.1 Définition

Le déversoir en labyrinthe est souvent une solution efficace pour augmenter la capacité de l'évacuation d'eau. Néanmoins, l'emplacement du labyrinthe est soumis aux conditions particulières du site. Ce type de déversoir a une forme en plan non linéaire connue par la répétition de multiples formes en plan le plus souvent rectangulaire, triangulaire ou trapézoïdale (Crookston, 2010).

- Le labyrinthe de forme rectangulaire est un déversoir dont les parois latérales ont une forme d'un angle égal à zéro par rapport à la direction de l'écoulement; elles sont aussi perpendiculaires aux extrémités.
- Le labyrinthe de forme triangulaire est un déversoir dans lequel les parois latérales se rencontrent à un point qui finit par la formation d'un triangle.
- Le labyrinthe de forme trapézoïdale est un déversoir qui a une forme mixte regroupant les deux types précédents si pourquoi, il fonctionne selon leurs caractéristiques (G. Taylor, 1968).

Par conséquent, ces différentes formes citées permettent l'augmentation de la longueur totale de la crête du déversoir. Cette augmentation se répercute sur la multiplication de la capacité de l'évacuation en comparaison avec le déversoir linéaire ayant la même largeur du canal et fonctionnent sous la même charge.



Figure II.4. Vue de déversoir en labyrinthe du barrage Beni Bahdel –Algérie

II.2.2.2 Liste des barrages équipés par déversoir en labyrinthe dans le monde

Nom du barrage	Locale	Source
Avon	Australie	Darvas 1971
Woronora	Australia	Darvas (1971)
Navet Pumped Storage	Trinidad	Phelps (1974)
Boardman	USA	Babb (1976), Lux (1985)
Mercer	USA	CH ₂ M-Hill (1976)
Bartlett ferry	USA	Mayer (1980)
Ohau Canal	New Zealand	Walsh (1980)
Ute	USA	Houston (1982)
Hyrum	USA	Houston (1983)
Cimia	Italie	Lux et Hinchliff (1985)
Garland Canal	USA	Lux & Hinchliff (1985)
Rollins Dam	USA	Tullis (1986)
Beni bahdel	Algérie	Afshar (1988)
Carty	USA	Afshar (1988)
Juturnaiba	Brazil	Afshar (1988)
Sarno	Algérie	Afshar (1988)
Saco	Brazil	Quintela et al. (1988)
Aljio	Portugal	Magalhães et Lorena (1989)
Castelleto-Nerv. canal	Italie	Magalhães et Lorena (1989)
Belia	zaïre	Magalhães et Lorena (1989)
Dungo	Angola	Magalhães et Lorena (1989)
Estancia	Venezuela	Magalhães et Lorena (1989)
Forestport	USA	Lux (1989)
Gema	Portugal	Magalhães & Lorena (1989)
Harrezza	Algérie	Lux (1989)
Infulene Canal	Mozambique	Magalhães & Lorena (1989)
Keddara	Algérie	Magalhães & Lorena (1989)
Quincy	USA	Magalhães & Lorena (1989)
Pacoti	Brazil	Magalhães & Lorena (1989)
São Domingos	Portugal	Magalhães & Lorena (1989)
Santa Justa	Portugal	Magalhães & Lorena (1989)
Skelton Grange Canal	England	Magalhães & Lorena (1989)
Ritschard	USA	Vermeyen (1991)
Sam Rayburn Lake	USA	USACE (1991)
Weatherford	USA	Tullis (1992)
Standley Lake	USA	Tullis (1993)
Kizilcapinar	Turkey	Yildiz (1996)
Sarioglan	Turkey	Yildiz (1996)
Agua Branca	Portugal	Quintela et al. (2000)
Alfaiates	Portugal	Quintela et al. (2000)
Arcosso	Portugal	Quintela et al. (2000)
Calde	Portugal	Quintela et al. (2000)
Pisão	Portugal	Quintela et al. (2000)
Prado	USA	Copeland and Fletcher (2000)
Teja	Portugal	Quintela et al. (2000)
Dog river	USA	Savage et al. (2004)
Boyd lake	USA	Brinker (2005)
Brazos	USA	Tullis et Young (2005)
María Cristina Dam	Spain	Page et al. (2007)
Lake Townsend	USA	Tullis & Crookston (2008)
Fontaine des Gazelles	Algérie	ANBT
Bakhadda	Algérie	Bensaid et Ouamane (2018)

Le déversoir en labyrinthe est également utilisé d'un côté comme une structure de protection pour les canaux et d'un autre coté comme un dissipateur d'énergie (Falvey 2003).

Son rendement optimal peut être obtenu par des charges relativement faibles, Cependant, sa performance diminue quand la charge augmente (G. Taylor, 1968).

En générale, la conception d'un déversoir en labyrinthe nécessite l'introduction des paramètres géométriques suivants ; la longueur L , la largeur du labyrinthe W_t , la hauteur des murs P , l'angle formé par les murs θ , la direction de l'écoulement, le nombre de cycles N . Comme elle demande aussi d'autres variables d'une importance secondaire tels que l'épaisseur des murs, la forme de la crête et les conditions d'approche. Ces variables énumérés ci-dessus peuvent être réduits à des paramètres non-dimensionnels suivant : La charge relative h/P , l'accroissement de la longueur L/W , le rapport de l'aspect vertical W/P , l'angle formé par les parois latéraux, et le nombre de cycle N (Hay et Taylor 1970).

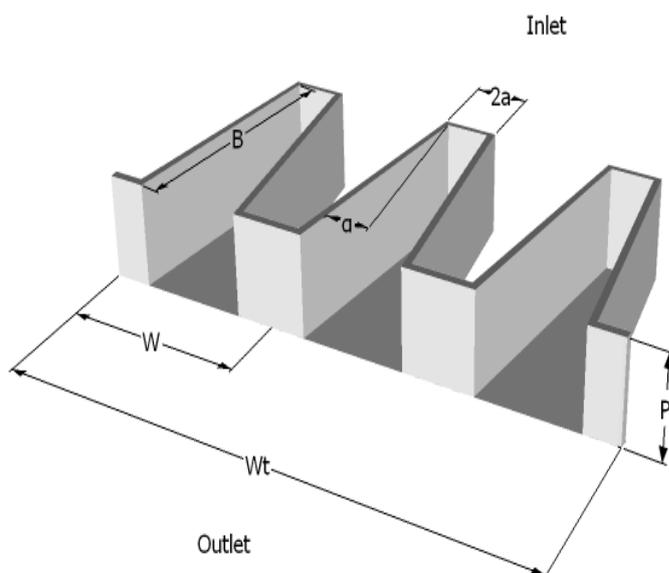


Figure II.5. . Déversoirs en labyrinthe formes trapézoïdale

II.2.2.3 L'écoulement sur le déversoir en labyrinthe

L'écoulement d'eau sur le déversoir en labyrinthe, devrait augmenter de manière proportionnelle avec l'accroissement de la longueur de la crête. Cependant, cet avantage n'existe que dans le cas d'un labyrinthe à faible charge. Dans le cas contraire, la performance diminue en fonction de l'augmentation de la charge H sur la crête.

Selon Lux & Hinchliff (1985), l'écoulement sur le labyrinthe passe généralement par quatre phases fondamentales et successives citées ci-dessous :

1. Phase complètement aérée : dans ce cas le débit tombe librement sur toute la longueur de la crête, l'épaisseur de la nappe et la profondeur d'eau à l'aval n'ont aucune influence sur la capacité du labyrinthe. Son rendement est presque le même que celui d'un déversoir linéaire ayant la même largeur.
2. Phase partiellement aérée : dans cette phase, l'augmentation de la charge sur le déversoir provoque l'apparition de l'interférence de la nappe sur la crête qui se traduit par une réduction du coefficient du débit. Durant l'écoulement, on constate l'abondance d'eau en amont et des poches d'air stables sur le sommet du labyrinthe et sur le long de chaque paroi latérale.
3. Phase de transition, dans cette étape : l'augmentation de la charge en amont engendre l'extension progressive de la zone déprimée. La nappe devient instable à cause de la présence des petites poches d'air en amont sur tout le long des murs latéraux. Cette phase se caractérise principalement par la discontinuité dans la courbe du coefficient du débit.
4. Phase déprimée : on dit phase déprimée, lorsque la charge dépasse la hauteur du déversoir. Dans ce cas une nappe solide et non aérée se produit au-dessus de la crête, ce qui se répercute sur l'efficacité du labyrinthe qui s'approche à celle d'un déversoir linéaire ayant une longueur égale à la largeur du canal (Fig. II.7).



Figure II.6. Ecoulement à faible charge.

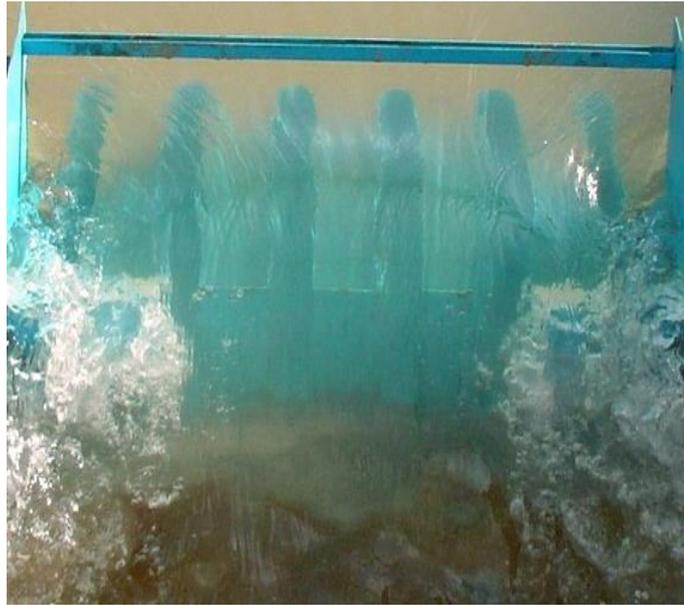


Figure II.7. Ecoulement à grande charge.

II.2.2.4 Paramètres affectant la performance

Les dernières études, dans le domaine de la conception des différentes formes du déversoir en labyrinthe, ont contribué positivement à l'amélioration de sa performance hydraulique.

Ces études ont traité l'influence de chaque paramètre sur la capacité d'évacuation du déversoir en labyrinthe. La complexité de l'écoulement sur le déversoir est à l'origine des différents essais expérimentaux sur des modèles physiques.

Selon Hay et al (1970), les paramètres L/W , H/P , W/P , α et N sont déterminants et fondamentaux dans la conception du labyrinthe.

Dans ce cadre, il est toujours recommandé de vérifier l'impact d'autres paramètres d'une importance secondaire comme : les détails de construction (la forme de la crête, la présence de tapis de réception) et les conditions de fonctionnement (Hay et Taylor, 1970).

II.2.2.4.1 Ratio d'accroissement de la longueur L/W

Ce paramètre est d'une importance fondamentale parce qu'il représente le rendement théorique maximal. Les essais de Geoffrey Taylor, 1968 ont montré que cette option est valable que pour la valeur de $L/W = 2$ (Fig. II.8). Cependant, ces essais ont montré que l'efficacité diminue remarquablement pour les charges relatives H/P supérieurs à 0,5 pour des

ratios L/W supérieurs à 4 et $h/p > 0,25$ lorsque le rapport de L/W est plus grand que 6 (fig. II.9).

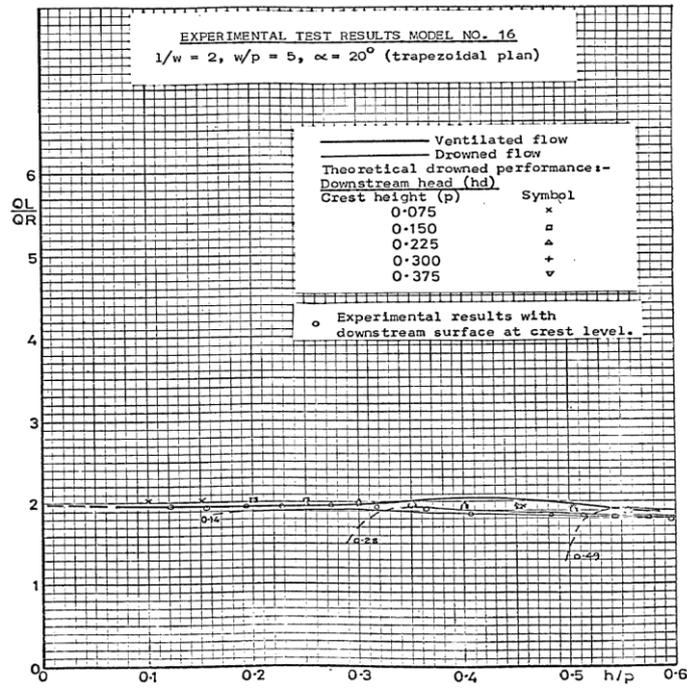


Figure II.8. Performance du labyrinthe, $L/W = 2$.

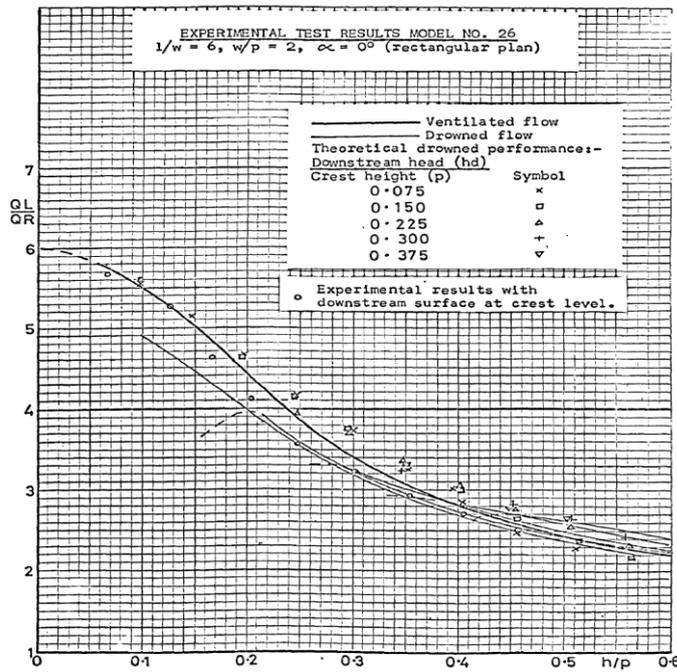


Figure II.9. Performance du labyrinthe, $L/W = 6$.

II.2.2.4.2 Effet de la charge relatif Ht/P

Ce ratio est la charge totale ($Ht = h + V^2/2g$), mesurée par rapport à la hauteur de la crête du déversoir. Le labyrinthe fonctionne d'une manière idéale lorsque la charge dimensionnelle relative Ht/P s'approche de zéro, par conséquent, le rendement Q_L/Q_N s'approche de la valeur du ratio L/W . Pour les grandes valeurs de Ht/P , la performance diminue remarquablement et essentiellement pour les déversoirs de grande valeur de ratio L/W (Hay et Taylor, 1970).

Plusieurs chercheurs ont recommandé une limitation de la charge relative Ht/P pour un déversoir en labyrinthe. Pour Tullis (1995), la charge maximale est égale à 0.9.

II.2.2.4.3 Rapport d'aspect vertical, W/P

Le ratio de la largeur relative des cycles a été examiné par Taylor (1968) par rapport aux deux valeurs de W/P comprises entre 2 et 3. Il a conclu qu'aucune influence significative n'est sur la performance W/P . Selon d'autres chercheurs, la performance du labyrinthe peut être affectée remarquablement pour les faibles valeurs de W/P . Dans ce contexte, Magalhães et al (1989) ont recommandé une valeur de $W/P \geq 2.5$, Lux (1989) a recommandé une valeur de $W/P \geq 2.0$ et Tullis et al (1995) ont proposé la gamme $3.0 \leq W/P \leq 4.0$.

II.2.2.4.4 Le ratio de l'épaisseur relative P/tw

La variation de la largeur des murs peut affecter la performance du déversoir en labyrinthe. L'augmentation de la largeur des murs provoque une réduction de la capacité des alvéoles, cela se répercute négativement sur le rendement du labyrinthe.

II.2.2.4.5 Forme de la crête

La forme de la crête peut avoir une influence significative sur le rendement hydraulique d'un déversoir en labyrinthe. Cette partie du déversoir a connue plusieurs formes : crête mince, crête épaisse, crête en demi-cercle, crête en quart de cercle et d'autres configurations. Hay et Taylor, (1970) ont montré qu'un déversoir à crête de forme arrondie est plus rentable que celui d'une crête mince ou d'une crête épaisse. Du point de vue pratique, Tullis et al. (1995), ont choisi la crête en quart de cercle.

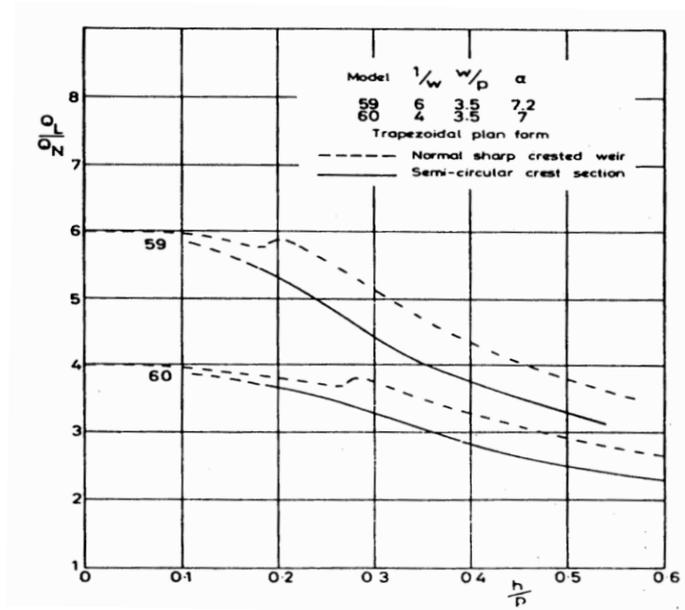


Figure II.10. Effet de la forme de la crête sur la performance (Hay et Taylor)

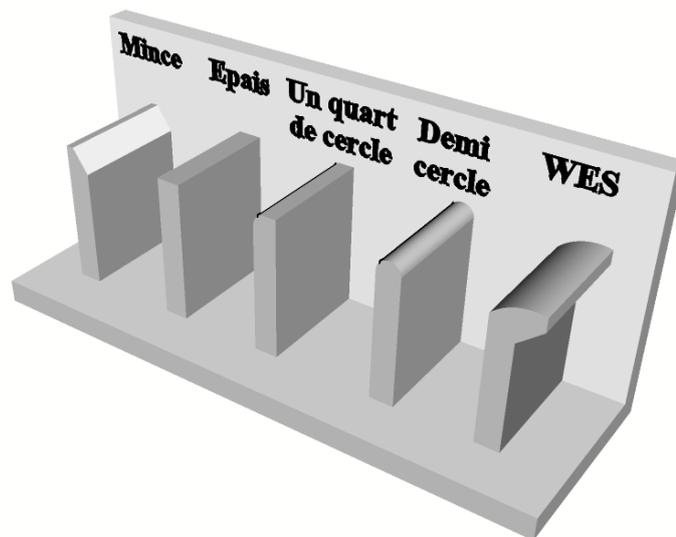


Figure II.11. Exemple des formes de la crête.

II.2.2.4.6 Impact de l'inclinaison des murs latéraux

L'inclinaison des murs correspond à un angle α formé de la paroi latérale du labyrinthe et la ligne médiane d'un cycle de labyrinthe. L'influence de ce paramètre se distingue clairement et en particulier pour les grandes valeurs de d'accroissement de la longueur de la crête. En effet la variation de l'angle de la paroi latérale peut avoir un impact très important sur la performance du déversoir. Cette inclinaison a aussi un grand effet qui peut même dépasser celui du ratio d'accroissement de la longueur de la crête. En ce qui concerne les

valeurs du ratio $W/P > 3$, la valeur de l'angle de la paroi latérale doit être plus grande que possible et cela dans le but d'avoir une performance optimale Geoffrey Taylor (1968).

II.2.2.4.7 Le nombre de cycle N

Ce paramètre représente le nombre de cycles d'un déversoir en labyrinthe. Son impact sur la performance hydraulique a été vérifié pour la première fois par Gentilini (1941). Ce dernier a constaté que la performance du labyrinthe est constante et cela malgré la variation du nombre de cycles N . Le schéma ci-dessous (II.12), décrit et explique la configuration géométrique des déversoirs en labyrinthe étudiés par Gentilini.

En 1970 Hay et Taylor ont confirmés les résultats obtenus par Gentilini et cela après des essais effectués sur des modèles identiques et ayant les mêmes paramètres de conception.

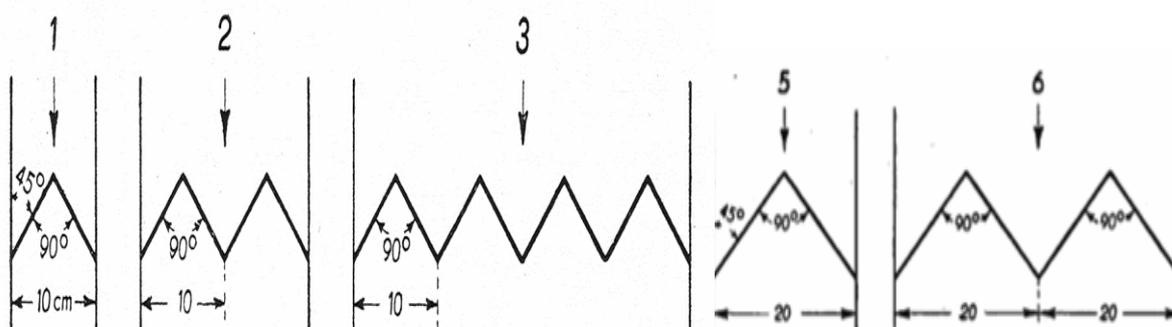


Figure II.12. Configuration géométrique du déversoir en labyrinthe (Gentilini 1941)

II.2.2.4.8 Effet de la variation de largeur des alvéoles

Plusieurs recherches ont étudié la performance des déversoirs en labyrinthe de forme trapézoïdale et triangulaire. Cependant ces recherches n'ont concerné que quelques cas de la forme rectangulaire en plan.

Pour ce dernier type, un paramètre adimensionnel a été introduit (Ouamane & Ben Saïd 2008), dans le but de vérifier l'impact de la variation de la largeur des alvéoles amont et aval. Les résultats obtenus ont montré que l'augmentation de la largeur de l'alvéole amont et la réduction de la largeur de l'alvéole aval pour un rapport $a/b = 1.5$, fait croître le débit d'environ de 10% pour les faibles et moyennes charges. Pour les grandes charges, une variation presque négligeable égale à (2%) est constatée. Ceci peut être bénéfique du point de vue pratique et économique car le volume du béton reste le même et la modification ne touche que le déplacement des murs latéraux pendant la phase de la conception.

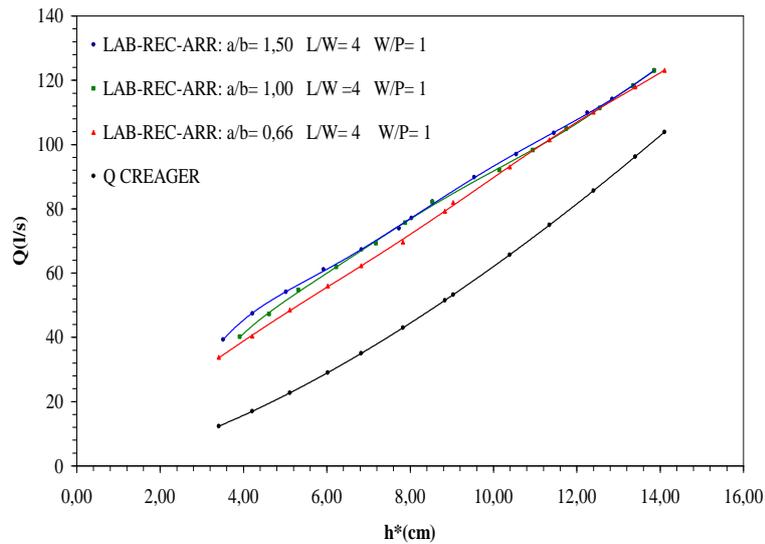


Figure II.13. Débit en fonction de la hauteur des alvéoles pour $L/W = 4$.

II.2.2.4.9 Impact de la forme d'entrée et de l'emplacement de labyrinthe

La performance du déversoir en labyrinthe peut être affectée par la forme d'entrée. Le paramètre principal favorisant la perturbation qui réduit à son tour la performance du déversoir en labyrinthe correspondant à la discontinuité de la crête du déversoir (Ouamane2013). Les résultats obtenus pour les deux modèles d'entrée (forme arrondie, forme plate) ont montré que l'utilisation de la forme arrondie conduit à une amélioration du rendement d'environ de 10%. Ceci peut être expliqué, d'un côté par la forme citée qui facilite l'écoulement de chaque côté de la paroi latérale et d'un autre côté par l'élimination des points de discontinuité. Qui réduit l'effet de la perturbation au sommet du déversoir.

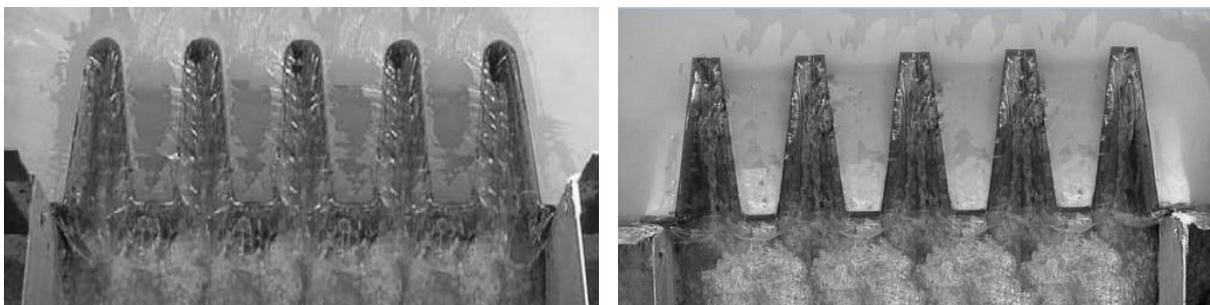


Figure II.14. Déversoir en labyrinthe une forme d'entré profilée à gauche et une forme d'entré plate à droite

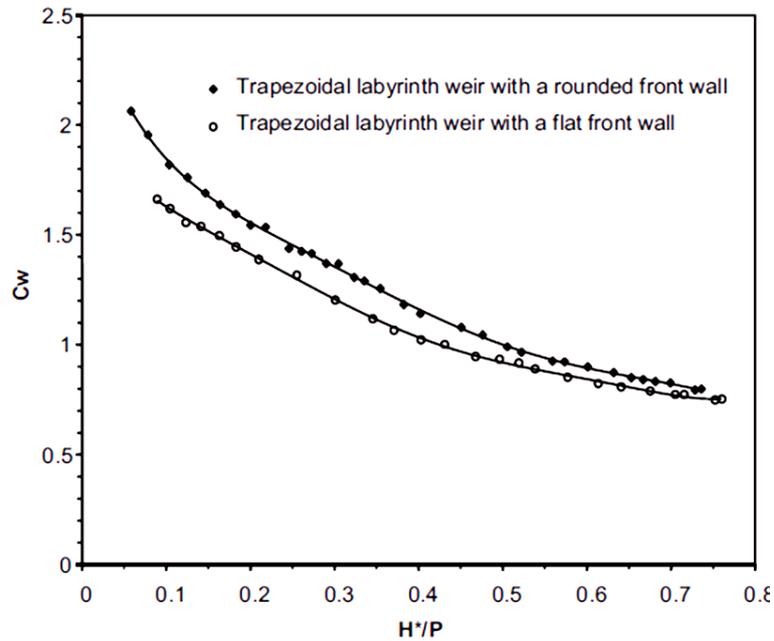


Figure II.15. Coefficient du débit en fonction de la forme d'entrée (Ouamane 2013)

L'emplacement du déversoir en labyrinthe peut se faire dans un canal (emplacement sans contraction) ou dans une retenue (emplacement avec contraction), ces différents emplacements peuvent affecter la performance du labyrinthe (fig. II.16).

Les résultats des essais des deux cas ont montré que les valeurs des coefficients de débit correspondant à l'emplacement sans contraction $W=W_c$ sont largement supérieures à ceux qui correspondent à l'emplacement avec contraction $W < W_c$ (Ben said et Ouamane 2008).

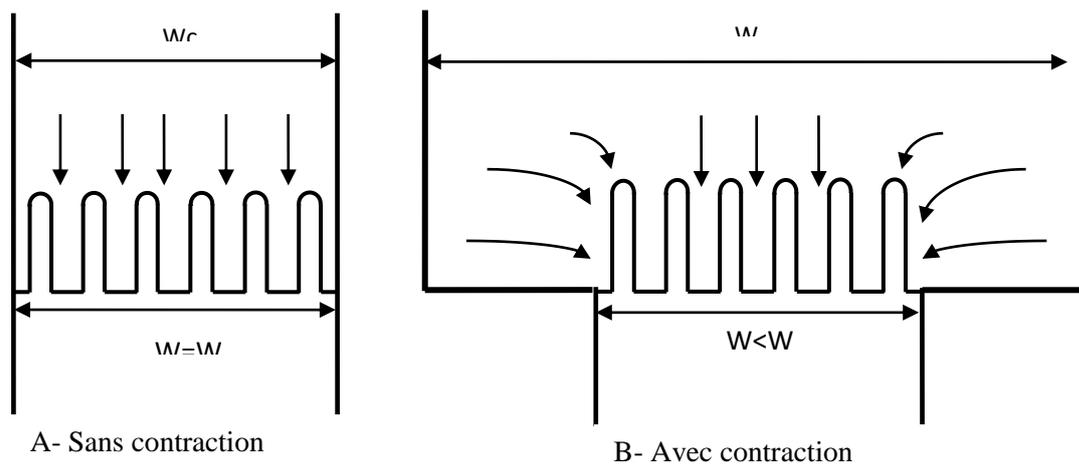


Figure II.16. Schémas du déversoir en labyrinthe avec et sans contraction latérale

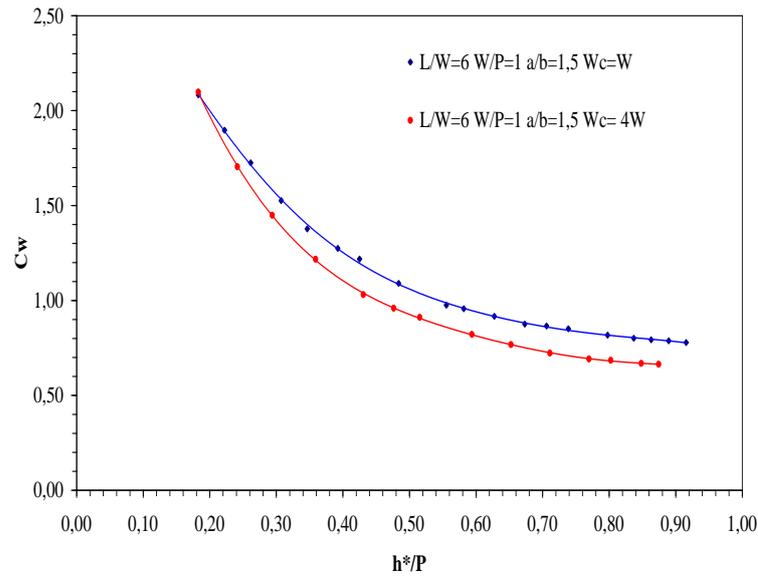


Figure II.17. Coefficient du débit en fonction de l'emplacement de modèle

II.2.2.4.10 Impact de remplissage des alvéoles

Le remplissage des alvéoles a un impact positif et important pour réduire le coût de construction d'un déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire. Le remplissage partiel des alvéoles en béton ordinaire est une solution efficace qui conduit à une réduction du coût supplémentaire. Elle ne se réalise qu'avec la diminution de la hauteur des murs libres qui consomment moins de ferrailage (Ouamane 2013).

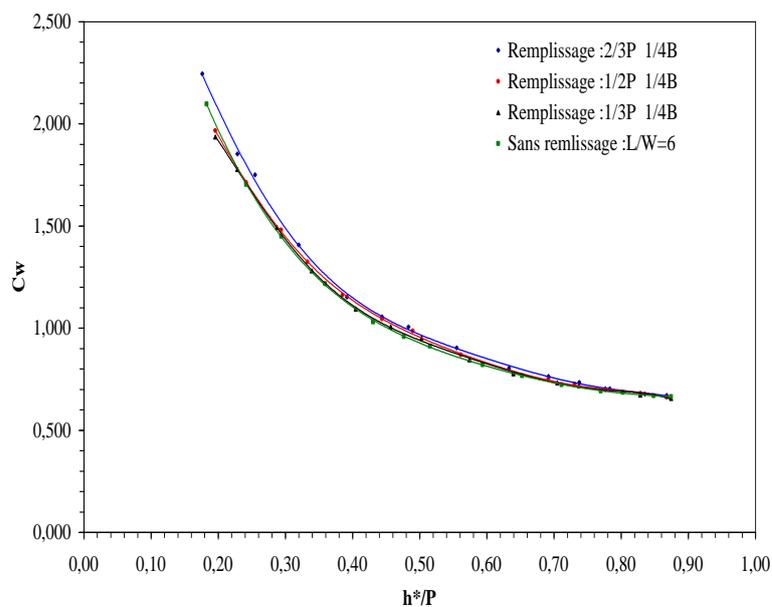


Figure II.18. Coefficient de débit du déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire arrondi en fonction des conditions de remplissage des alvéoles de 1/4B, $L/W=5.97$ et $W/P=1$

Les résultats obtenus montrent que le remplissage d'un quart de la longueur B en plus des différentes hauteurs ($P/3$, $P/2$ et $2P/3$) donne presque le même rendement qu'un déversoir non rempli (Fig. II.18). Par contre, seul le remplissage de la moitié de la longueur B et le tiers de la hauteur P des alvéoles amont et aval n'a aucun effet sur la performance du déversoir en labyrinthe. Au-delà de la valeur $P/3$, l'influence peut être remarquée par une réduction du coefficient du débit (Fig. II.19).

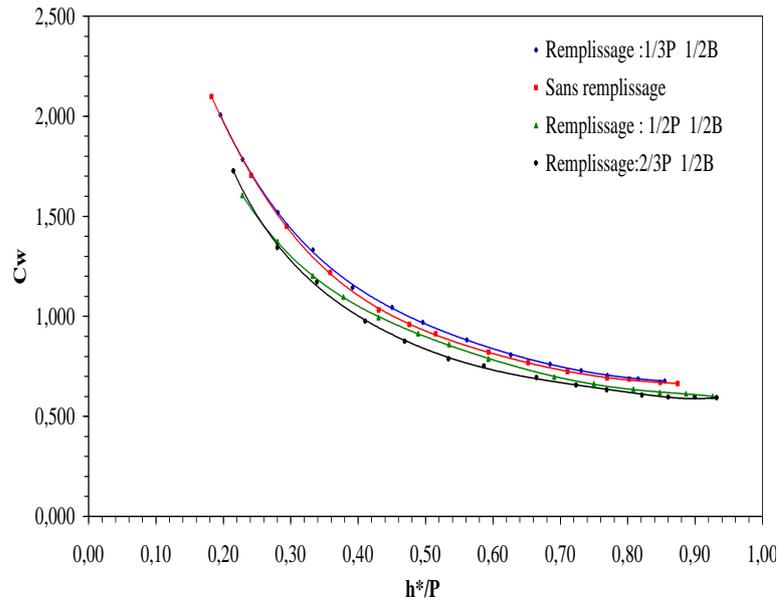


Figure II.19. Coefficient de débit du déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire arrondie en fonction des conditions de remplissage des alvéoles de $\frac{1}{2} B$ et de $L/W=5.97$ $W/P=1$

A l'exception des faibles charges pour un labyrinthe en forme trapézoïdale en plan, Ouamane(2013) a également conclu que le remplissage des alvéoles n'a aucun effet sur le rendement. Concernant les deux cas, avec ou sans remplissage, aucune différence dans la performance hydraulique n'a été remarquée et cela par rapport aux charges suivantes $H_T / P = 0.25$. Aditif à ce qui a été dit, la dissipation de l'énergie est aussi un avantage du remplissage des alvéoles en aval quand ce remplissage est réalisé sous forme de marches d'escalier.

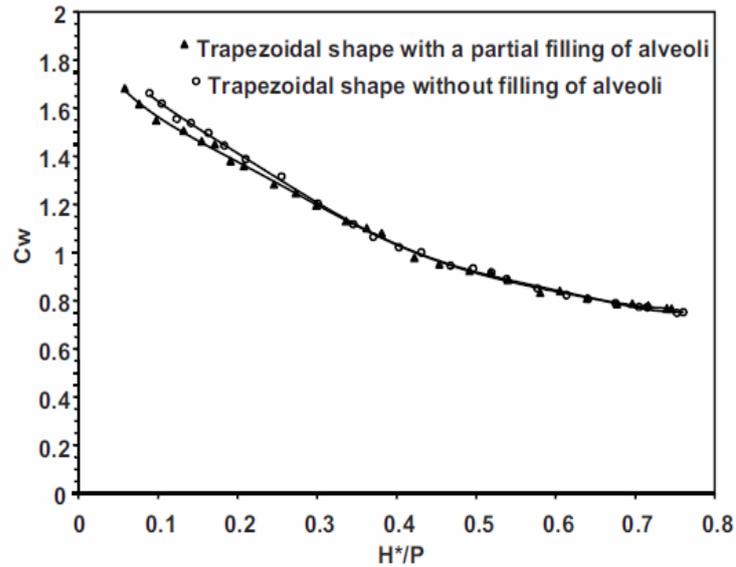


Figure II.20. L'effet du remplissage (Ouamane 2013)

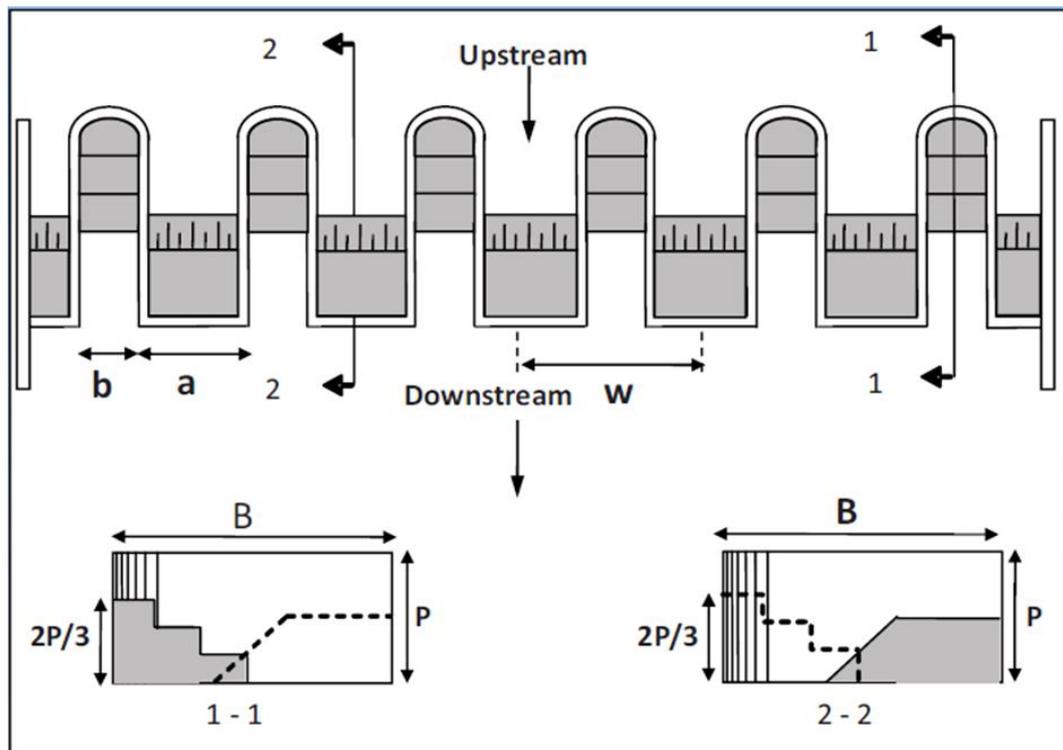


Figure II.21. Déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire avec une forme d'entrée arrondie et avec des alvéoles partiellement remplis (Ouamane, 2013).

II.2.2.4.11 Effet de la forme en plan sur le rendement de labyrinthe

Malgré l'utilisation fréquente de la forme trapézoïdale. Ouamane (2013), privilège la forme rectangulaire qui peut être facile à réaliser et plus efficace du point de vue hydraulique

et économique, essentiellement pour des charges relatives inférieures à 0,5. Elle peut être utilisée comme moyen de contrôle surtout dans les cours d'eau naturels.

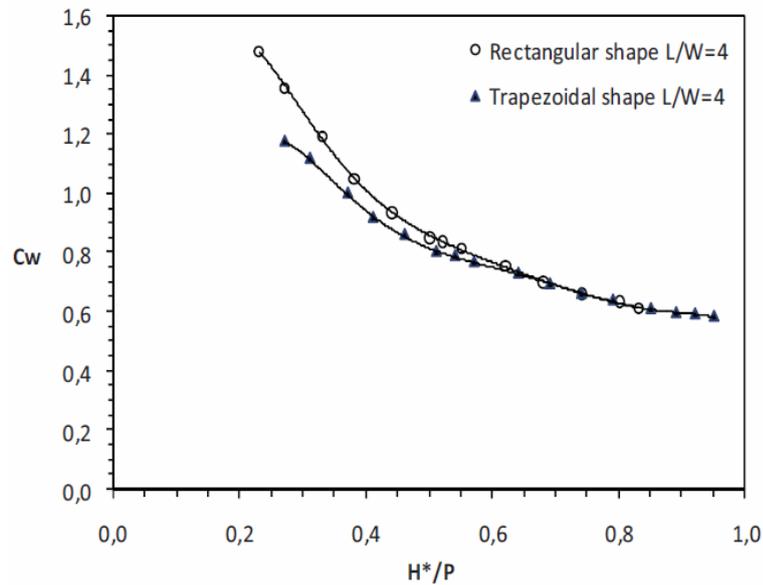


Figure II.22. Coefficient du débit en fonction de la forme en plan du déversoir (Ouamane 2013).

L'installation d'un déversoir en labyrinthe exige une grande base dans le sens de l'écoulement. Cette exigence représente un inconvénient qui limite son utilisation et ne permet pas son installation sur la plus part des sommets des barrages en béton.

A cet effet, une modification a été effectuée sur le labyrinthe. Elle se résume dans la réduction de la longueur des parois latérales par l'utilisation des porte-à-faux et sans toucher la longueur des alvéoles du labyrinthe Ouamane (2013) Fig. II.23.

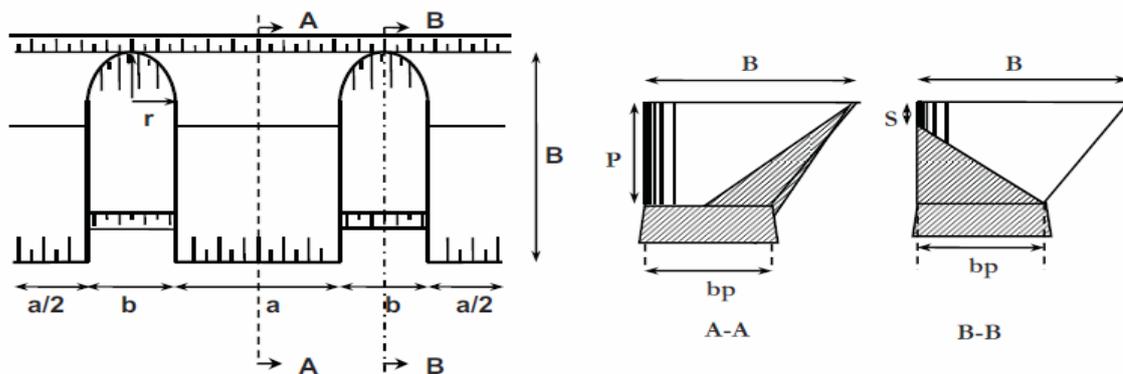


Figure II.23. Déversoir en labyrinthe avec des porte-à-faux (Ouamane 2013).

Ce développement géométrique du déversoir en labyrinthe réalisé par Ouamane et al. (2013) a permis de tripler la performance d'un déversoir linéaire à charges moyennes (Fig. II.24).

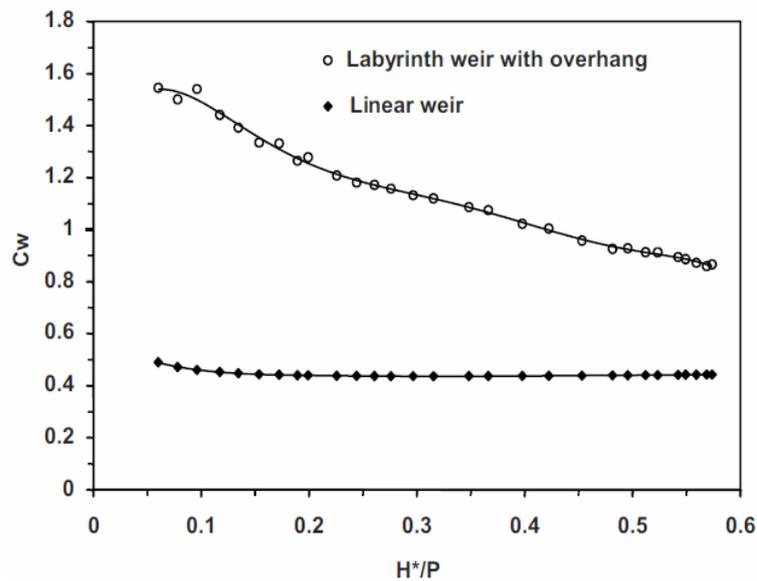


Figure II.24. Coefficient du débit du déversoir en labyrinthe et du déversoir linéaire.

II.2.2.4.12 Impact de l'interférence en aval

L'interférence de la nappe provoque une réduction du rendement du déversoir en labyrinthe, pour les valeurs les plus élevées de la charge en amont, l'interaction de la nappe se produit en aval est engendre un étranglement au niveau de la section de la sortie du déversoir.

Taylor (1968) a effectué plusieurs tests sur des modèles expérimentaux des différentes configurations de déversoir en labyrinthe afin de développer une méthode de conception. Il a utilisé le rapport d'aspect vertical W/P pour vérifier les effets de l'interférence de la nappe. Les résultats ont montré que par rapport aux grandes valeurs de W/P , l'interférence de la nappe est presque nulle et sans effet. En ce qui concerne les faibles valeurs, l'effet devient un facteur déterminant dans la performance du labyrinthe. A cet effet, Taylor affirme que le paramètre W/P doit être plus grand que possible et supérieur à 2 au minimum.

Ce paramètre (W/P) a été aussi l'objet d'études de Indlekofer et Rouvé (1975). Ils ont pris comme modèle un seul cycle d'un labyrinthe triangulaire dont les limites des parois sont perpendiculaires à celles des murs du canal (fig. II.25).

Ces deux chercheurs ont défini deux zones d'écoulement, dans le modèle de déversoir cité :

- L'une appelée zone de perturbation, où se produit l'interférence de la nappe déversante au sommet, en considérant la longueur de la crête affectée par la perturbation comme L_d .
- L'autre zone obéit aux mêmes conditions d'écoulement d'un déversoir linéaire.

Pour calculer la longueur de la crête à l'intérieur de la zone perturbée L_d , Indlekofer et Rouvé ont proposé l'équation suivante,

$$L_d = \left[L_{c(\alpha)} - \frac{3Q}{2C_{d(90^\circ)}\sqrt{2gh^{\frac{3}{2}}}} \right] \frac{1}{1 - C_{d-m}} = L_D \frac{1}{1 - C_{d-m}} \quad (\text{II.1})$$

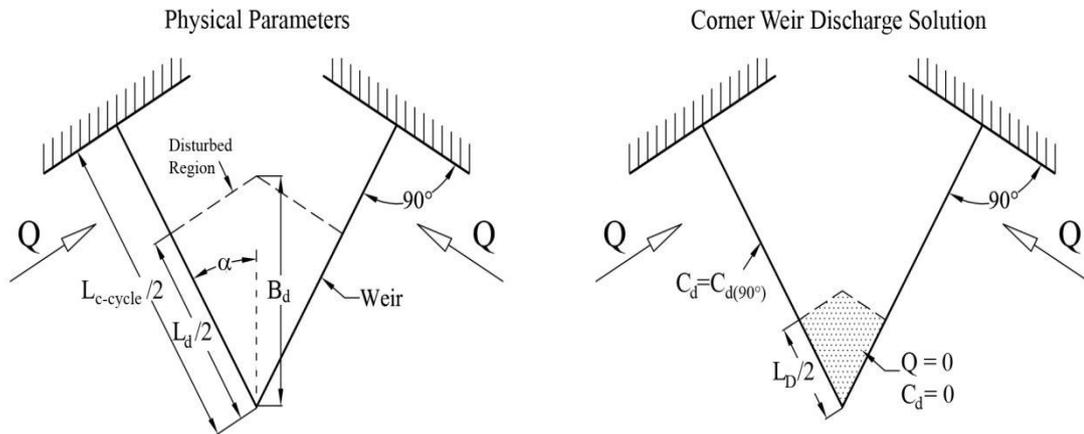


Figure II.25. L'interférence de la nappe Indlekofer and Rouvé (1975)

Pour des déversoirs angulaire.

C_{d-m} : est le coefficient du débit moyen de la zone perturbée ($C_{d-m} = C_{d-corner} / C_d(90^\circ)$).

$C_d(90^\circ)$: est le coefficient du débit du déversoir linéaire.

h_m : est la charge en amont définie par Indlekofer et Rouvé (1975) h_m représente une profondeur en amont spécifique.

l_c : est la longueur d'une seule paroi latérale pour un déversoir en labyrinthe de forme triangulaire.

L_D : représente la longueur théorique de la perturbation.

Falvey (2003) a développé une relation empirique (II.2) et (II.3) pour calculer L_D , il s'est basé sur la méthode d'Indlekofer and Rouvé.

$$\frac{L_D}{h} = 6.1e^{-0.05\alpha} \quad \alpha \geq 10^\circ \quad (\text{II.2})$$

$$L_d = L_c \left[0.244 \ln \left(\frac{H_t}{p} \right) + (0.94 - 0.03\alpha^\circ) \right] \quad \alpha \leq 20^\circ \text{ and } H_T/P \geq 0.1 \quad (\text{II.3})$$

Pour vérifier l'effet de l'interaction de la nappe, Crookston et Tullis (2010) ont mené des recherches sur deux modèles de déversoirs en labyrinthe : l'un a une forme de crête en quart de cercle, l'autre en forme de demi-cercle pour une gamme d'angles ($\alpha = 23,4^\circ, 31^\circ, 44,8^\circ, 61,7^\circ$) et avec $N = 2$ en fonction de H_T . Ils ont présenté graphiquement la variation de la taille de la zone de l'interférence de la nappe B_{int} (longueur de la zone de l'interférence de la nappe) en fonction de la charge totale H_T .

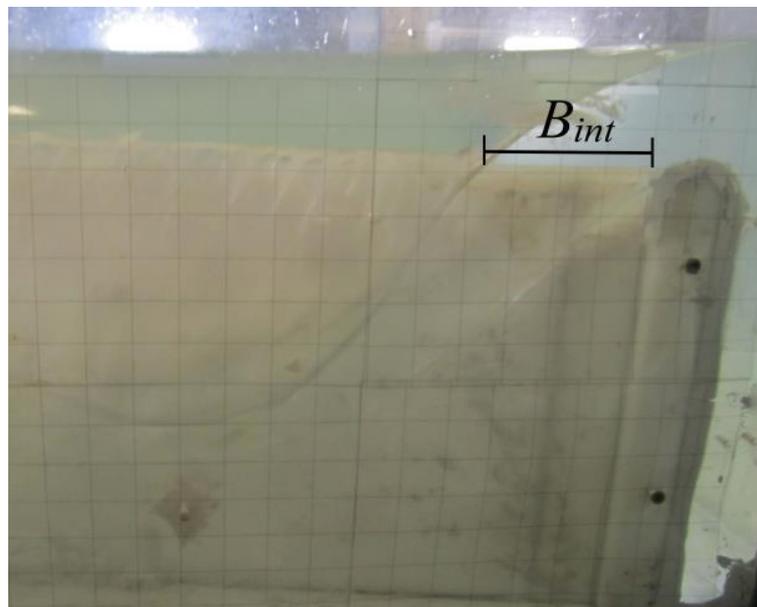


Figure II.26. Longueur de la zone de l'interférence de la nappe Crookston and Tullis (2010).

Les mêmes chercheurs ont examiné les méthodes proposées par Indlekofer et Rouvé (1975) et celle proposée par de Falvey (2003).

Ils ont conclu que l'équation (II.1) peut être généralisée et peut donner avec précision la différence entre les longueurs des déversoirs et le rendement net entre un déversoir en labyrinthe et un déversoir linéaire à condition que la charge soit la même. Pour ce qui est des équations (II.2) et (II.3), la longueur de l'interférence de la nappe n'est pas la même et elles ne peuvent pas être généralisées.

II.2.2.4.13 Aération de la nappe

L'aération de la nappe se réfère à la présence ou à l'absence d'une cavité d'air derrière la nappe Crookston et al. (2010). Plusieurs structures artificiellement peuvent être intégrées au déversoir pour aérer la nappe et éliminer le phénomène de cavitation. Il existe plusieurs définitions pour les conditions de l'aération de la nappe ; Crookston (2010) a défini les conditions de l'aération de la nappe du déversoir en labyrinthe comme : accrochée, aérée, partiellement aérée, et noyée. Falvey (2003) a fait référence à quatre conditions de l'aération de la nappe qu'on peut citer : pression, atmosphérique, cavité, et Sub-atmosphérique. Pour Lux (1989), l'écoulement porte sur trois phases ; phase aérée, phase transitoire et phase déprimée. En générale, les conditions de l'aération de la nappe obéissent à la forme de la crête, la vitesse, la turbulence et l'écoulement en aval. D'après Naudascher et Rockwell (1994), l'aération artificielle est un autre moyen qu'on peut utiliser pour stabiliser la pression derrière la nappe et diminuer la vibration et le bruit. Selon Falvey (1980), les conditions de l'aération ne sont pas toujours la cause de la vibration de la nappe.

L'aération artificielle peut être réalisée par l'utilisation des piliers de séparation (dits briseurs de nappes) qui se placent au-dessus de la crête. Cette aération peut aussi se faire à l'aide des orifices. Pour une meilleur performance, Hinchliff et Houston (1984) ont recommandé que les briseurs de nappes soient situés en aval à une distance d'environ 10% de la longueur de la paroi latérale (l_c), leurs résultats sont fondus sur les recherches menées pour réaliser le barrage Ute et Hyrum. Alors que, Crookston et al.2010, ont trouvé que les effets de l'aération artificielle ont un impact négligeable (0,5% à 1,7%) sur la capacité de l'évacuation du déversoir en labyrinthe à crête en quart de cercle.

II.2.2.5 **Capacité hydraulique du déversoir en labyrinthe**

L'écoulement sur le déversoir en labyrinthe est tridimensionnel et ne se prête pas aisément à une description mathématique, parce qu'il est influencé par plusieurs paramètres. Une solution plus précise nécessite des essais sur des modèles physiques pour vérifier expérimentalement l'influence de ces paramètres sur le rendement du déversoir en labyrinthe. Selon la littérature, les travaux de Gentilini(1941) sur des modèles réduits physiques, peuvent être considérés comme une première contribution dans la vérification de la capacité du déversoir en labyrinthe. Ces études ont été effectuées sur des déversoirs en labyrinthes de forme triangulaire (Fig. II.27), pour les comparer à des déversoirs linéaires ou inclinés. La capacité est exprimée par le rapport des coefficients du débit dans un déversoir en labyrinthe ayant trois angles ($\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ et 60°) et dans un déversoir linéaire(Fig. II.28).

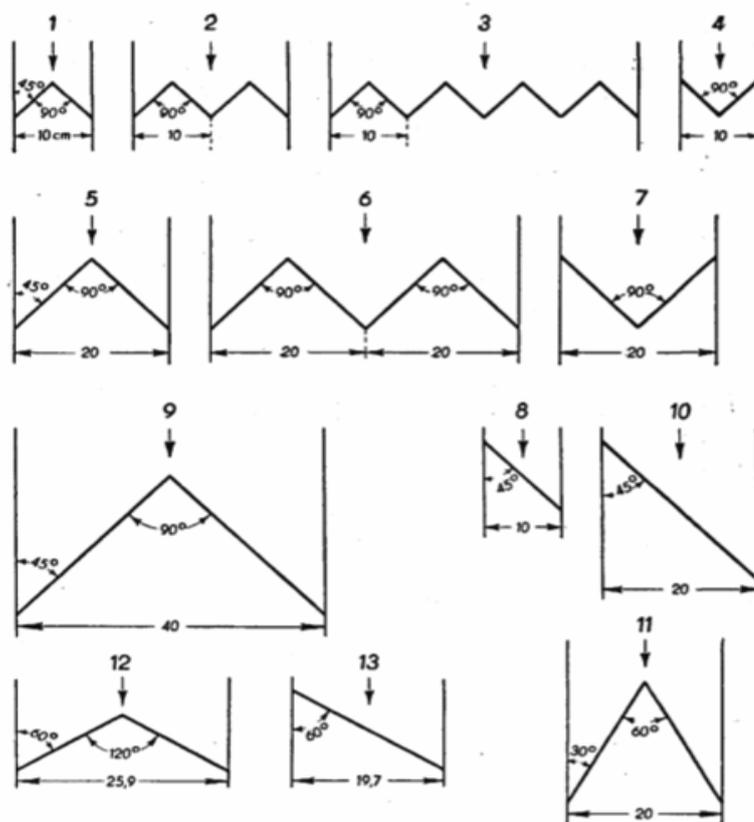


Figure II.27. Les formes des déversoirs on têtes testé par Gentilini (1941).

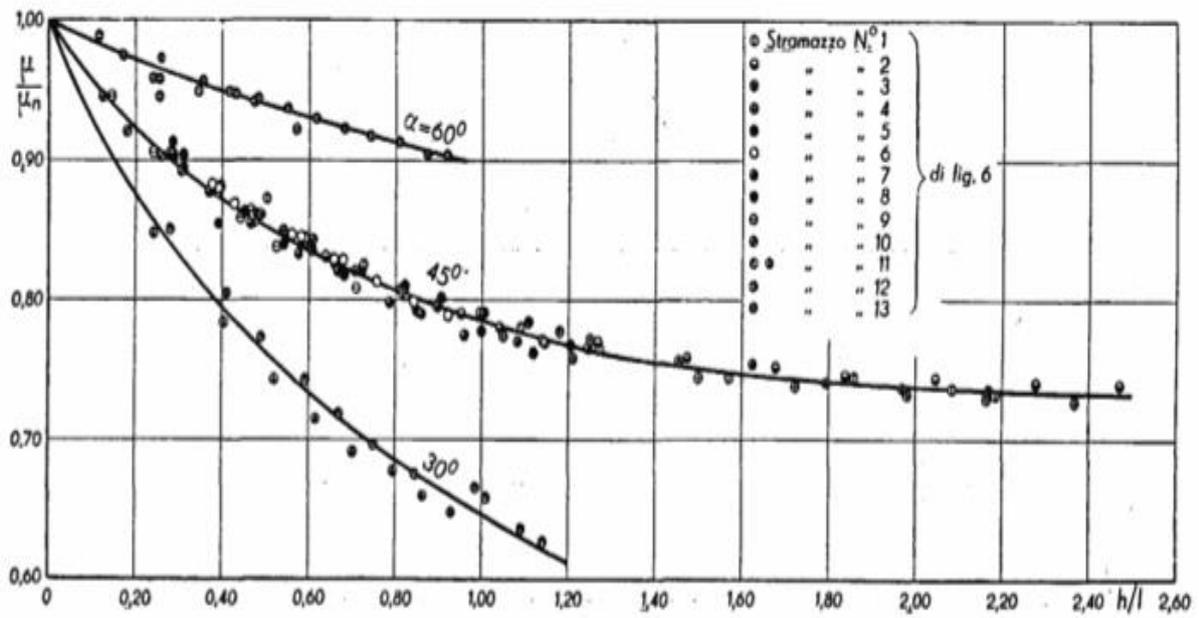


Figure II.28. L'effet de la charge relative h/l et l'angle α sur la capacité de l'évacuation μ/μ_n (Gentilini 1941).

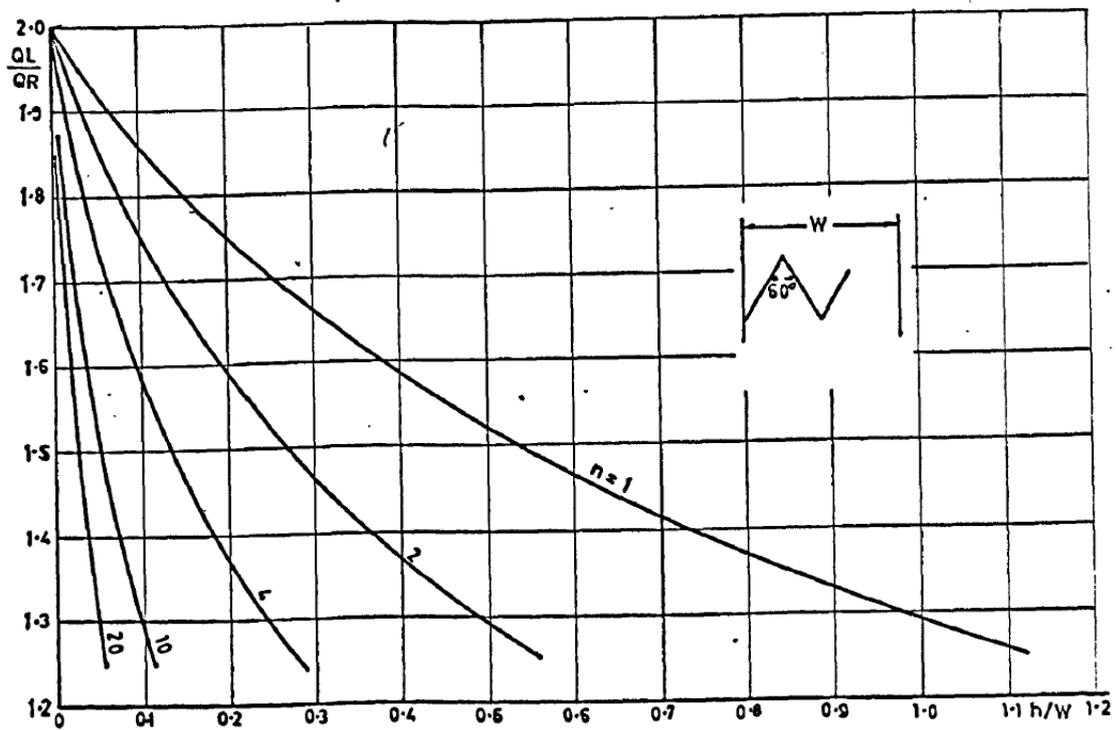


Figure II.29. L'effet de la charge relative h/W et l'angle α sur le ratio Q/Q_n (Gentilini 1941).

En tenant compte de la gamme des paramètres suivant $0,05 \leq h/P \leq 0,25$, $5,7^\circ \leq \alpha \leq 20,6^\circ$, $1,23 \leq L_{c-cycle}/w \leq 4,35$, $1,15 \leq w/P \leq 4,61$, Kozák et Sváb (1961), ont testé onze différents déversoirs en labyrinthe de forme trapézoïdale ($tw = 6 \text{ mm}$) avec une crête plate à deux bords chanfreinés. Les chercheurs ont conclu que la capacité d'évacuation du déversoir en labyrinthe est sensiblement supérieure à celle du déversoir linéaire ayant la même charge. Ils ont également constaté que si le labyrinthe contient plusieurs cycles, la performance devient de plus en plus efficace et économique. Comme il est important de noter que cette étude a été réalisée sur des déversoirs à petites charges : cela signifie que l'interférence de la nappe n'a qu'un faible impact sur la capacité de l'évacuation de labyrinthe.

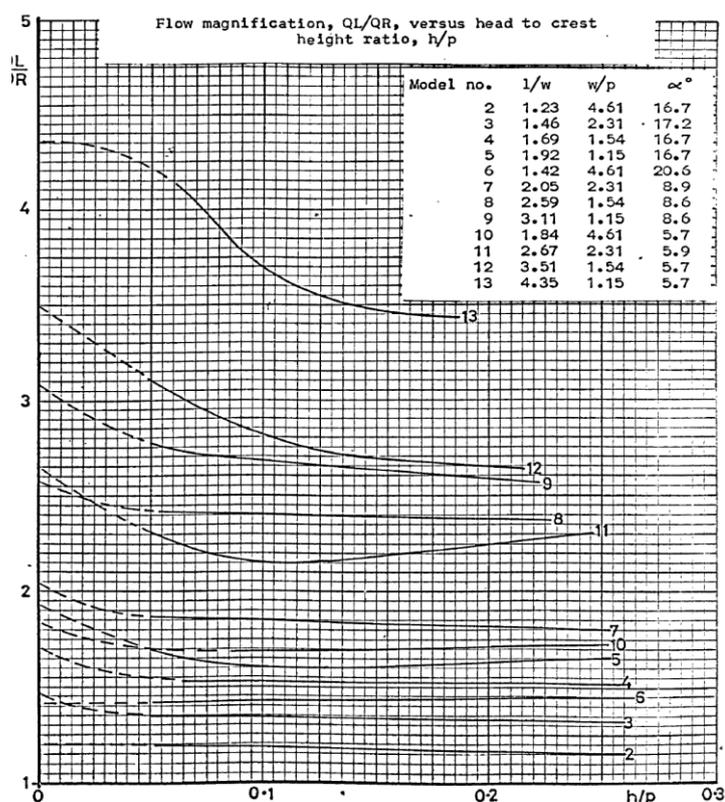


Figure II.30. Représentation des résultats obtenus par Kozák et Sváb (1961)

Geoffrey Taylor (1968) a réalisé une large étude sur vingt-quatre modèles de déversoirs en labyrinthe dont la plupart ont une forme triangulaire à crête mince (Fig. II.31). Cette étude a été réalisée sous des charges relatives $0,05 \leq h/P \leq 0,55$.

Hay et Taylor (1970) ont défini le rendement ou la performance hydraulique en termes de rapport du débit : Q_{LAB} / Q_{Lin} , (Débit de déversoir en labyrinthe / le débit déversoir linéaire), en fonction de h / p . L'efficacité (E) indiquée dans l'équation (II.4) est exprimée par le rapport de ratio de débit et le ratio d'accroissement de la longueur (voir fig. II.32).

$$E\% = \frac{Q_{LAB}/Q_{LIN}}{L/w} * 100\% \tag{II.4}$$

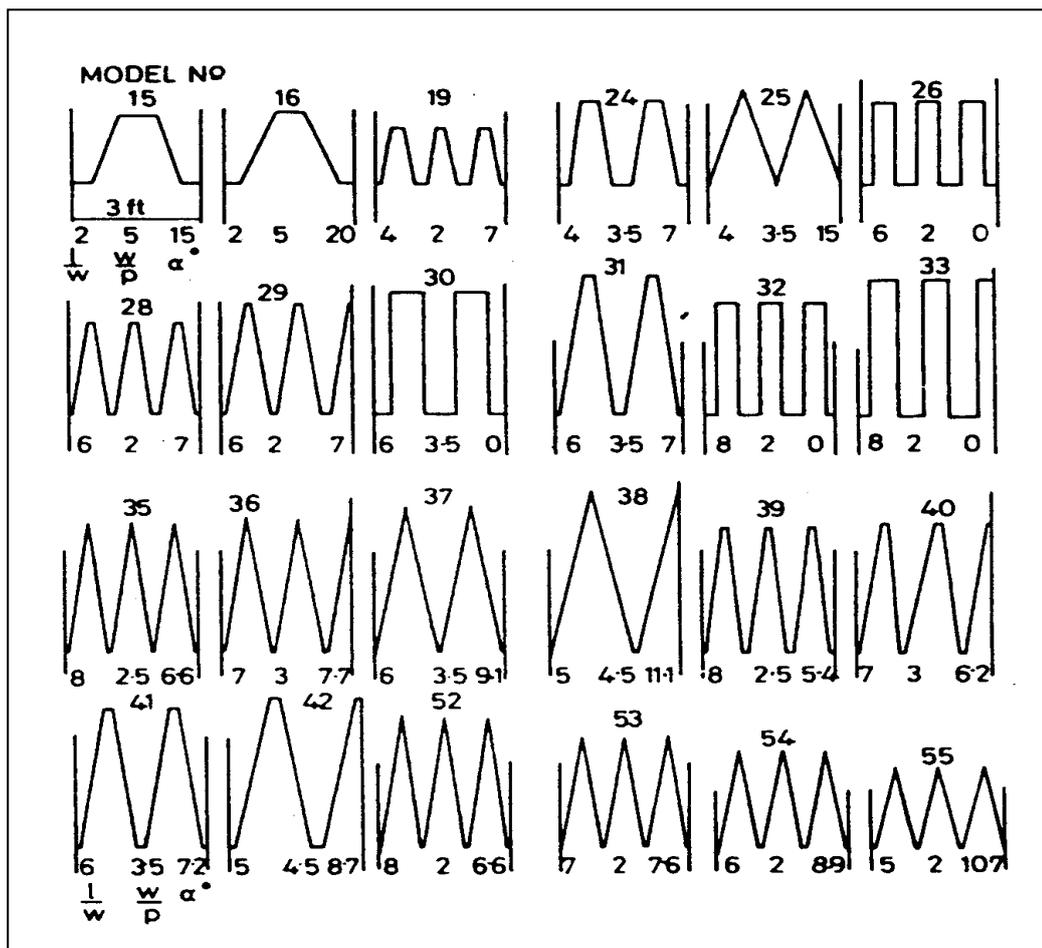


Figure II.31. Géométrie des déversoirs en labyrinthe étudiés par Hay et Taylor (1970).

Théoriquement, le rendement Q_{LAB} / Q_{Lin} du labyrinthe pour les petites charges devient égal à la grandeur de l'accroissement de la longueur L/W . Cependant, le rendement de labyrinthe Q_{LAB} / Q_{Lin} pour les grandes charges tend vers la valeur 1 pour une augmentation d'une longueur donnée.

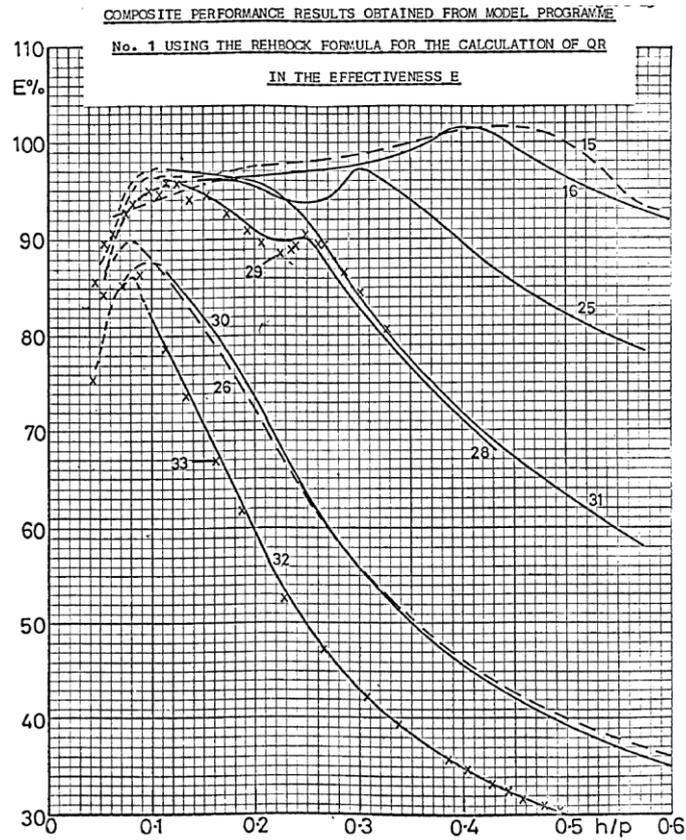


Figure II.32. L'efficacité (E) en fonction de h/p Geoffrey Taylor (1968).

Selon les résultats obtenus par les études faites sur des modèles physique de forme trapézoïdale pour la réalisation des barrages Avon ($\alpha = 22,8^\circ$) et Woronora ($\alpha = 27,5^\circ$), dont les caractéristique sont $W/P \geq 2$ et pour une charge relative $0,2 \leq H_T/P \leq 0,6$.

Darvas 1971 a pu développer une gamme de courbes qui peut être utilisé dans la conception du labyrinthe et dans l'évaluation de la performance. Cette approche utilise la charge relative h/p et le ratio L/W pour déterminer le coefficient du débit C_w (voir fig. II.33).

$$Q = C_w W h^{3/2} \quad (\text{II.5})$$

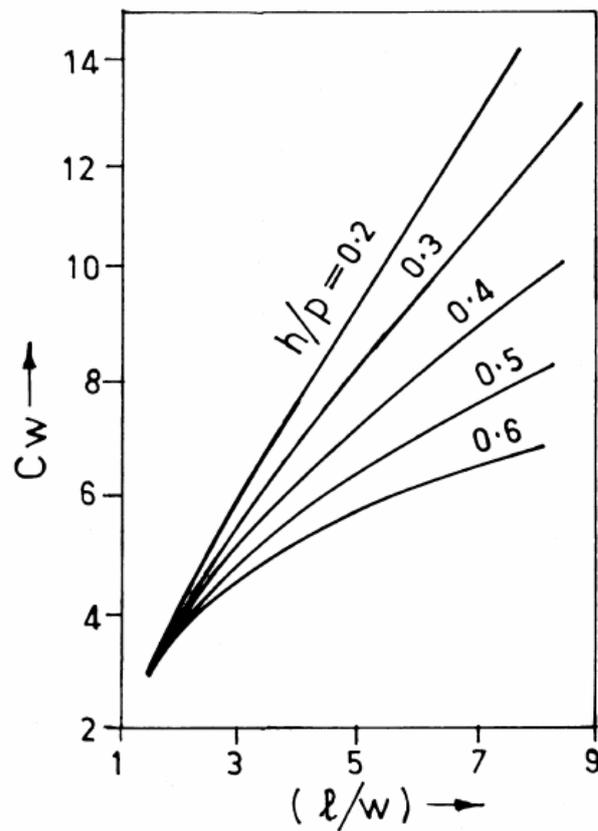


Figure II.33. Coefficient de débit d'un déversoir en labyrinthe en fonction de l/w et h/p Darvas 1971.

La formule de Darvas a été exprimée autrement par Magalhães en 1985 pour un déversoir en labyrinthe de forme trapézoïdale dont la crête a une forme d'un quart de cercle.

Cette formule est définie comme :

$$Q = \mu_w W \sqrt{2gh^{3/2}} \quad (\text{II.6})$$

Où le paramètre μ_w est le coefficient de débit en fonction l/w et h/p (Fig. II.34).

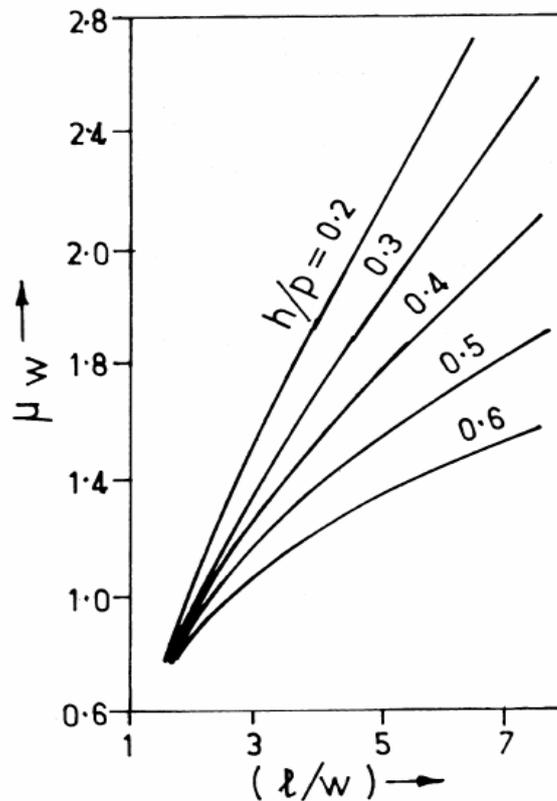


Figure II.34. Coefficient de débit μ_w de labyrinthe en fonction l/w Magalhães 1985.

Ce type de déversoir a fait aussi l'objet des études hydrauliques au L'US Bureau of reclamation pour la conception du barrage Ute. Cette étude a été basée sur les données de Hay et Taylor. Cependant le résultat obtenu montre qu'il existe un écart entre les deux essais. Cette contradiction s'explique par la variation des différentes définitions de la charge en amont. Pour Hay et Taylor, la charge était piézométrique h , contrairement Houston et all en 1984 qui avaient utilisé la charge totale H_T .

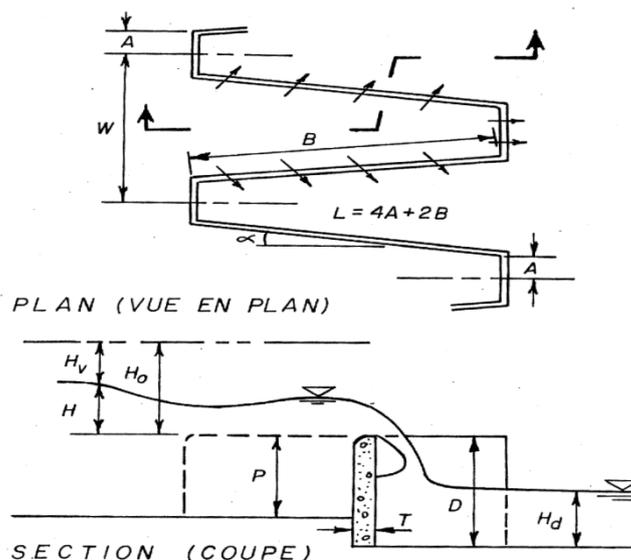


Figure II.35. Schémas de déversoir en labyrinthe (Lux et Hinchliff, 1984).

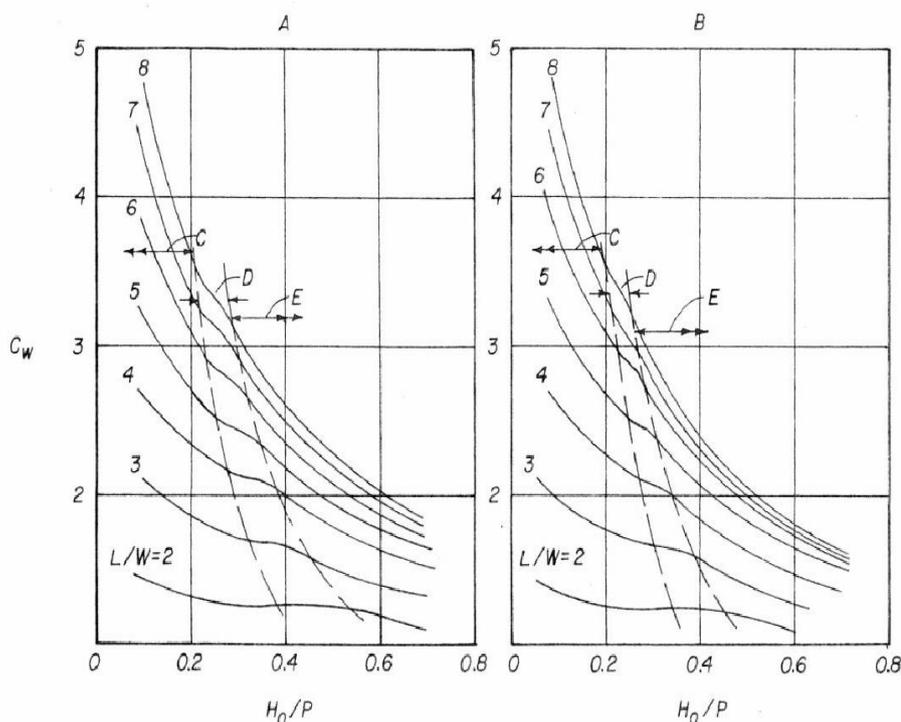
Les études de Lux(1984, 1989) ainsi que celles de Lux et Hinchliff(1985) ont présenté schématiquement une différente valeur du coefficient du débit C_{d-Lux} . Ce coefficient change en fonction de la variation du rapport d'aspect vertical (w/p) et la constante de la forme (k). Tous ces paramètres présentés dans l'équation (II.7) qui suit, déterminent le débit unitaire d'un cycle Q_{cycle} .

$$Q_{cycle} = C_{d-Lux} \left(\frac{w/P}{w/P+k} \right) w \sqrt{g} H_T^{3/2} \quad (II.7)$$

Q débit évacué par un cycle, W la largeur d'un cycle, P la hauteur du déversoir et H_T la charge totale, k varie entre 0.18 et 0.1 pour les formes en plan respectivement triangulaires et trapézoïdales avec ($A/W = 0.0765$). La longueur L pour un cycle est :

$$L = 4A + 2B \quad (II.8)$$

Avec la demi-longueur de la paroi frontale A et la longueur B , les courbes du déversoir ont été développé (fig. II.36). Le débit total du labyrinthe Q_t peut se calculer en multipliant par le nombre de cycles.



II.37.

de débit du déversoir en labyrinthe à crête en quart de cercle (A- Triangulaire, B- Trapézoïdale (Lux & Hinchliff, 1985).

Figure
Coefficient

Magalhães et Lorena(1989) ont utilisé la formule (II.6) pour calculer le coefficient du débit μ_w de six modèles hydrauliques étudiés au Laboratório Nacional de Engenharia Civil Lisbonne, Portugal (Harrezza, Keddara, Dungo, São Domingos, Alijó, et Gema). Ces études ont permis de valider les résultats obtenus par Magalhães en 1985 et ont servi comme base de données de la conception des déversoirs en labyrinthe et ont donné la confiance pour réaliser des travaux ultérieurs.

Tullis et al en 1995 ont modifié l'équation classique du déversoir pour pouvoir calculer le débit évacué par le labyrinthe. Selon le nouveau coefficient C_d , présenté dans l'équation(II.9) :

$$Q = \frac{2}{3} C_d L_e \sqrt{2g} H_t^{\frac{3}{2}} \quad (\text{II.9})$$

Dans l'équation(II.9), C_d est sans dimension et L_e est la longueur efficace du déversoir.

Cette formule est basée sur des recherches menées par Amanian en 1987, Tullis (1993) et Waldron (1994).

Les résultats de coefficient du débit d'un déversoir en labyrinthe sont présentés sous forme de coefficient C_d en fonction de H_T/P . Pour Tullis, cette formule est valable pour les labyrinthes ayant des angles qui varient entre 6° et 35° .

Huit équations de régression du coefficient du débit C_d ont été élaborées afin de déterminer le débit qui transite par un déversoir en labyrinthe. Ces équations sont valables seulement pour un déversoir en labyrinthe qui se caractérise par ;

- Une largeur de la paroi frontale comprise entre $t < A < 2t$.
- Un ratio $H/P < 0.9$ et $t = P/6$.
- Une forme de crête en quart de cercle (sur le coté amont).
- Un rayon de courbure de la crête $R = P/12$.
- Un ratio d'aspect vertical $3 < W/P < 4$.

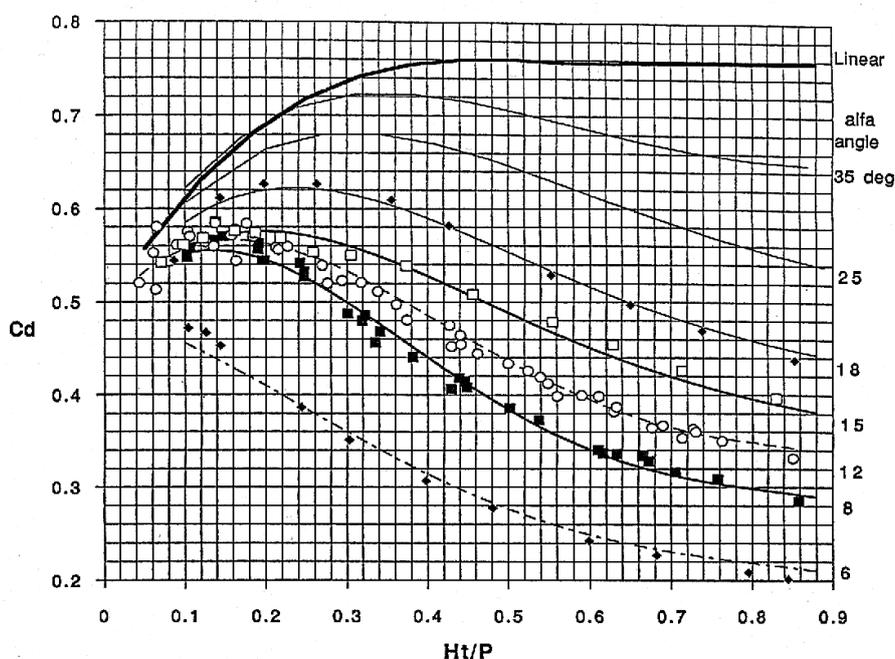


Figure II.38. Coefficient de débit des déversoirs en labyrinthe (Tullis, 1995).

En 2004, Willmore a porté une correction dans la méthode de calcul de Tullis et al (1995) qui concerne la longueur efficace du labyrinthe L_e . Il a également constaté une erreur dans les données pour $\alpha = 8^\circ$. En outre, d'autres investigations à l'UWRL ont trouvé des valeurs plus élevées de C_d que celles rapportées par Tullis.

En 2002, Melo et al., ont développé la méthodologie de Magalhães et Lorena en 1989, par l'intégration d'un paramètre d'ajustement, $k_{\theta-cw}$, montré dans l'équation (II.10). Cette opération a été effectuée sur un modèle de déversoir en labyrinthe avec un seul cycle installé

dans un canal à parois convergentes. Les effets des parois citées sont exprimés par le paramètre $k_{\theta-cw}$ pour une valeur ($1,0 \leq k_{\theta-cw} \leq 1,4$) en fonction de l'angle θ_{cw} (0° et 90°).

Cette méthode a amélioré la capacité du labyrinthe par l'orientation de l'écoulement en amont dont les lignes de courant doivent être perpendiculaires aux parois latérales du déversoir.

$$Q = C_{d-MetL} K_{\theta-cw} W \sqrt{2g} H_T^{3/2} \quad (\text{II.10})$$

La méthode de vérification destinée à des déversoirs linéaires développés par Villemonte en 1947, a été utilisée par Tullis et al., pour vérifier les effets de la submersion sur la performance du labyrinthe. Ces derniers ont développé aussi une équation de la charge H sans dimension. Cette équation citée au-dessous (II.11) - (II.13) est simple à résoudre et qui a un pourcentage d'erreur minime ne dépassant pas **0,9** % :

$$\frac{H^*}{H_T} = 0.0322 \left(\frac{H_d}{H_T}\right)^4 + 0.2008 \left(\frac{H_d}{H_T}\right)^2 \quad 0 \leq \left(\frac{H_d}{H_T}\right) \leq 1.53 \quad (\text{II.11})$$

$$\frac{H^*}{H_T} = 0.9379 \left(\frac{H_d}{H_T}\right)^4 + 0.2174 \quad 1.53 \leq \left(\frac{H_d}{H_T}\right) \leq 3.5 \quad (\text{II.12})$$

$$H^* = H_d \quad 3.5 \leq \left(\frac{H_d}{H_T}\right) \quad (\text{II.13})$$

Dans les équations(II.11)-(II.13), H^* est la charge totale en amont sur un déversoir en labyrinthe submergé, H_T est la charge totale en amont sur un déversoir en labyrinthe non noyé et H_d est la charge totale en aval du labyrinthe.

Cette méthode d'évaluation de submersion du labyrinthe a été vérifiée par Lopes et al en 2009. Ils ont étudié des déversoirs labyrinthes dans un canal incliné et horizontal pour un angle $\alpha = 12^\circ$ et 30° . Les résultats obtenus par Lopes et al ont signalé un écart moins de **6** % par rapport aux études effectuées par Tullis et al en 2007.

Emiroglu et al en 2010 ont étudié la capacité de l'évacuation d'un labyrinthe en un seul cycle qui varie ($22,5^\circ \leq \alpha \leq 75^\circ$) et installé latéralement dans un canal rectiligne (déversoir latéral).

Les profils des eaux de surface, de la vitesse, des nombres de Froude en amont (Fr) et les coefficients de débit ($C_{d-côté}$) ont été présentés sous forme de C_{d-side} en fonction Fr et de P/h . L'équation de débit empirique se présente comme suit (II.14) :

$$C_{d-side} = \left[\frac{18.6 - 23,535 \left(\frac{W}{w}\right)^{0.012} + 6.796 \left(\frac{W}{L}\right)^{0.012}}{0.502 \left(\frac{P}{h}\right)^{4.024} + 0.094 \sin(2\alpha) - 0.393 Fr^{2.155}} \right]^{-1.431} \quad (\text{II.14})$$

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.15) a été élaborée pour calculer le coefficient de débit de ce type de déversoir :

$$C_d = 0.389 + 0.424 \left(\frac{H_0}{P}\right)^{-0.632} \left(\frac{L}{B}\right)^{-0.403} \left(\frac{a}{B}\right)^{0.184} \left(\frac{b}{B}\right)^{-0.613} \quad (\text{II.15})$$

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.3 Déversoir en labyrinthe fusible

II.3.1 Définition

Les hausses fusibles sont des éléments auto-stables qui permettent d'accroître la performance d'un déversoir existant. Elles peuvent être installées sur un nouveau ou un ancien barrage. Elles ont pour rôle d'augmenter la capacité du stockage et l'évacuation du déversoir. Ces hausses fusibles ont été inventées et perfectionnées par Hydroplus en 1989. Il en existe deux types :

- Le premier est en forme rectiligne, utilisé quand le système doit résister à des lames déversantes, estimées à 4 fois la hauteur du déversoir.
- Le second type a une forme d'un labyrinthe, il peut être installé différemment. comme il permet d'augmenter la capacité de l'évacuation quand les sommets des hausses fusibles sont placés au niveau initial de la crête de Creager. Il permet aussi d'augmenter la capacité de la retenue quand les hausses fusibles sont mises sur le seuil du barrage.

Pendant les crues exceptionnelles, ces hausses fusibles basculent vers l'aval les unes après les autres afin de libérer le maximum de débit pour éviter l'inondation des régions voisines et de protéger le barrage.

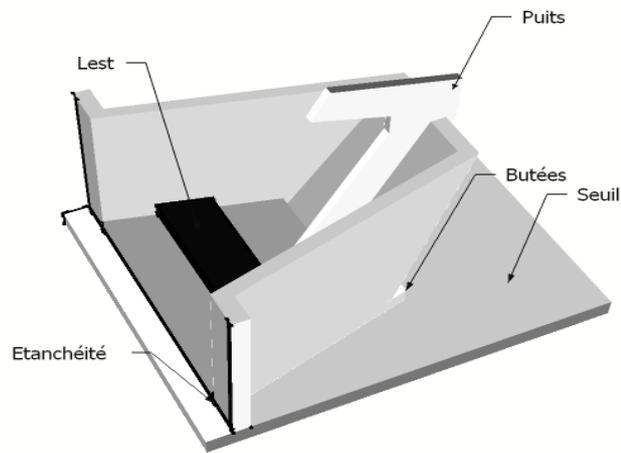


Figure II.39. Schéma d'un élément des hausses fusibles.

II.3.2 Fonctionnement des hausses fusibles

Ce type de déversoir est une structure composée principalement par : un godet, une base et un puits relié à une chambre dans la base.

Au moment des crues ordinaires et moyennes, l'eau s'évacue au-dessus de la crête de la hausse fusible qui agit comme un seuil libre (Fig. II.39).

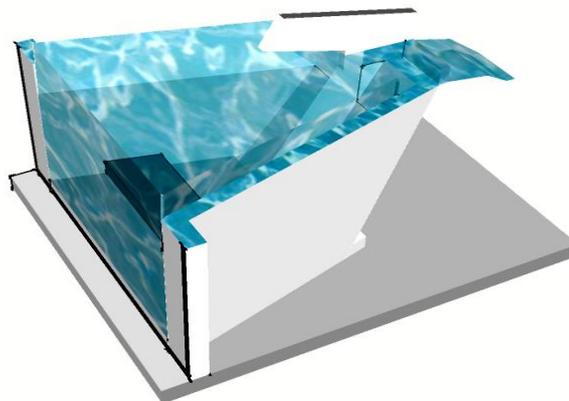


Figure II.40. Fonctionnement d'une hausse fusible avant renversement.

Les hausses fusibles sont conçues pour se basculer en cas des crues exceptionnelles. Quand l'eau dans la retenue atteint un certain niveau, elle pénètre dans le puits en grande quantité et s'accumule dans la chambre inférieure.

Cette opération provoque une pression qui déstabilise l'élément des hausses fusibles qui se renverse complètement à une certaine profondeur d'eau dans le réservoir (Fig. II.41).

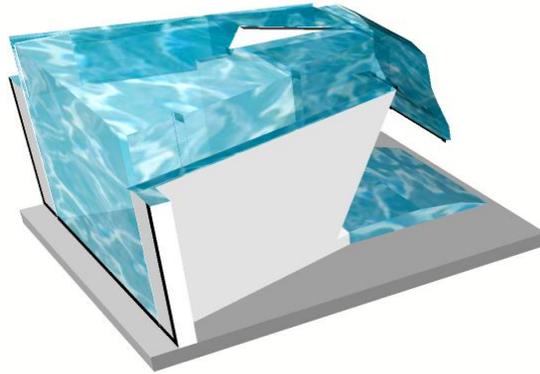


Figure II.41. Fonctionnement d'une hausse fusible lors de dépassement de l'eau le sommet de puits

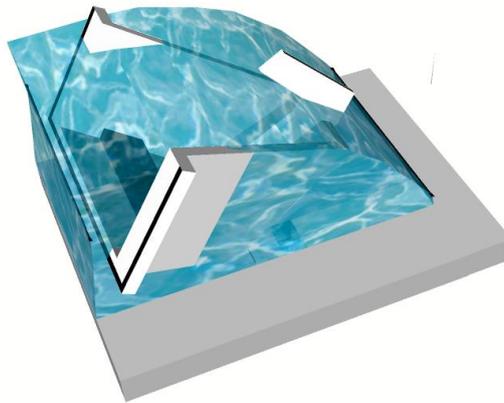


Figure II.42. Hausse fusible en phase de renversement

En générale, le débit évacué par les hausses fusibles est calculé selon la formule suivante :

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d L_c h^{\frac{3}{2}} \quad (\text{II.16})$$

Q = débit; g = accélération de la pesanteur, L_c = longueur de la crête de la hausse fusible; et h = différence du niveau d'eau dans le réservoir et le niveau de la crête.

Le coefficient du débit est une fonction de la longueur de la crête de la hausse et la hauteur d'eau en amont h rapportée à la profondeur totale de l'écoulement sur le seuil (Falvey, 1995). Ce coefficient diminue quand la charge sur la hausse fusible augmente. La meilleure équation convenable pour le coefficient du débit suite à la loi de puissance suivante :

$$C_d = C_1 \left[\left(\frac{h}{H} \right) - C_2 \right]^{C_3} \quad (\text{II.17})$$

H = la hauteur de la hausse fusible et C_1 , C_2 et C_3 sont des constantes déterminées expérimentalement pour les valeurs de h/H supérieures à 0,1. Le coefficient C_2 est un facteur de la tension superficielle qui devient négligeable quand la profondeur d'écoulement sur la hausse fusible augmente.

II.4 Déversoir en touches de Piano (P.K.Weir)

II.4.1 Définition

Le déversoir en touches de piano (PK-Weir) représente une alternative fiable et rentable. Il permet d'améliorer la capacité du stockage de la retenue et la capacité d'évacuation du déversoir. Il est considéré comme une forme particulière du déversoir en labyrinthe. Son premier prototype a été construit en France (Barrages : Goulours 2006).

Ce type de déversoir se caractérise par sa forme rectangulaire en plan semblable aux touches de Piano. En général, il représente un progrès net dans le domaine de la conception des déversoirs. Cette forme exceptionnelle a été le fruit d'un travail partagé entre le laboratoire d'aménagement hydraulique et environnement de l'université de Biskra (Algérie) guidé par le chercheur Pr Ouamane et Hydrocoop (France) sous la direction de F. Lemperière.



Figure II.43. Un barrage avec un déversoir de type Piano Key Weir.

La structure de ce type de déversoir se caractérise par ;

- Des porte-à-faux amont et aval qui permettent d'avoir une longueur transversale de la crête supérieure à la base d'appui.
- Un radier incliné des alvéoles qui réduit la hauteur des murs latéraux.
- Par rapport au déversoir en labyrinthe, l'existence des porte-à-faux de P.K- Weir est un avantage économique et hydraulique qui réduit la base d'appui et de garder la même longueur de la crête.

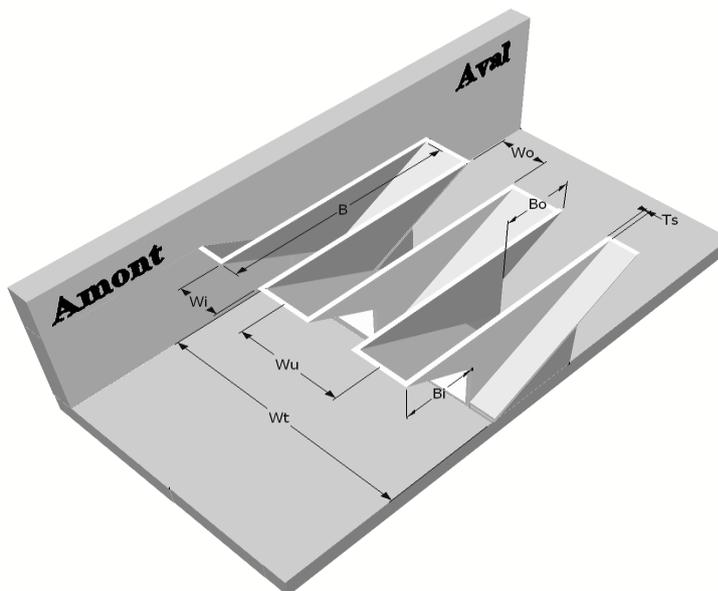


Figure II.44. Vue en perspective d'un déversoir du P.K. Weir.

La géométrie particulière du P.K.W implique l'insertion d'un grand nombre de paramètres, dont les principaux sont :

- La longueur développée du déversoir L .
- La largeur du déversoir Wt .
- La largeur des alvéoles amont, aval (W_i) et (W_o).
- La hauteur de P.K.Weir P .
- La longueur des porte-à-faux en amont et en aval B_i, B_o .
- La hauteur maximale des parois latérales.
- La longueur des parois latérales B .
- La longueur maximale en aval du P.K.Weir P .

Avant la réalisation du premier prototype du PK-Weir en 2006, les recherches précédentes effectuées à partir de 2001 sur des modèles réduits physiques (Type A et B) (Ouamane, 2006a), ont été axées sur la capacité de l'évacuation en fonction de la profondeur de la nappe.

Type A : Ce premier type se caractérise par des porte-à-faux identiques en amont et en aval, il peut augmenter le débit spécifique jusqu'à $20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. Sa petite base d'appui facilite son emplacement sur des crêtes de barrage-poids existants et cela pour augmenter la capacité d'évacuation.

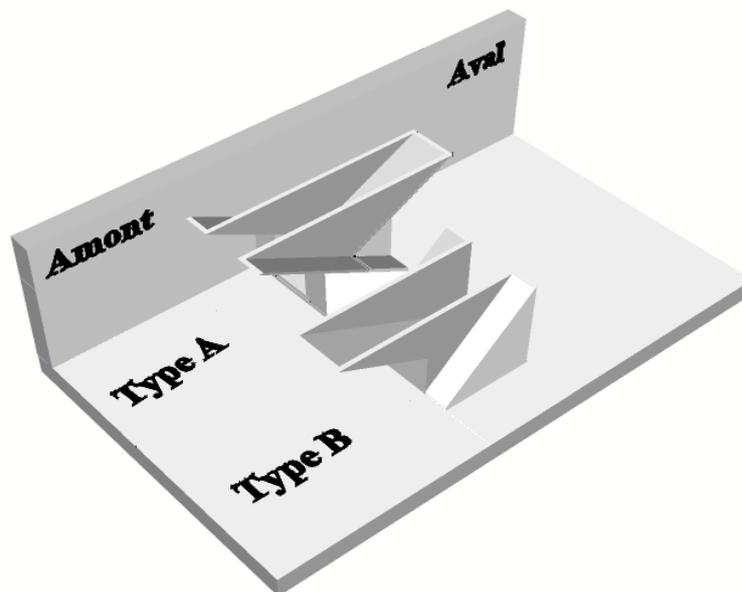


Figure II.45. Configuration géométrique de P.K.W. type A et B.

Type B : Pour ce cas, les porte-à-faux sont uniquement à l'amont. D'après les études enregistrées par Ouamane (2006b), il est constaté que le rendement de ce type B est plus efficace que celui du type A d'environ **10 %**.

Comparé au modèle A, la pente de l'alvéole aval du modèle **B** est fortement inclinée ce qui explique ce rendement meilleur. La conception du modèle **B** est devenue un choix préféré dans la réalisation des futures barrages a grands débits spécifiques parce qu'elle en plus de son rendement efficace elle demande moins d'efforts. Cependant, en doit noter que cette configuration ne favorise pas l'utilisation des éléments préfabriqués financièrement avantageux pour le débit inférieur à $20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (Ouamane et al. 2006c).

Par rapport à la configuration de base, d'autres modifications positives ont été effectuées dans le but d'améliorer le rendement du PK-Weir :

- La rehausse verticale de la crête : Des murs placés verticalement sur la crête du PK-Weir de sorte que sa partie supérieure prend la forme d'un déversoir en labyrinthe rectangulaire. Cette modification a été développée lors de l'optimisation de l'efficacité hydraulique, elle permet d'augmenter la capacité de l'évacuation.
- La largeur des alvéoles amont et aval: le choix d'une largeur de l'alvéole amont supérieure à celle de la largeur de l'alvéole aval, a donné une meilleure performance
- hydraulique. Un rapport de $a/b \geq 0.8$ peut garantir l'efficacité du PK-Weir (Le Doucen et al. 2009).

II.4.2 Mode d'écoulement sur le P.K.Weir

L'écoulement sur le PK-Weir peut s'effectuer d'un côté par le déversement de deux nappes qui passent directement sur les extrémités des alvéoles amont et aval, de l'autre côté par l'aspiration de l'eau qui coule sur le long du radier incliné de l'alvéole aval (Fig. II.45).

La conception géométrique d'un PK-Weir ayant des porte-à-faux, permet une aération convenable des nappes d'eau (Ouamane, 2006b).



Figure II.46. Ecoulement en deux nappes déversantes sur un cycle de P.K.Weir (Ouamane, 2006b).

II.4.3 Performance hydraulique

Le rendement du PK-Weir dépend essentiellement de la conception géométrique et de la charge d'exploitation qui est d'une importance principale (Ouamane, 2006a).

En plus de la présence des corps flottants d'autres paramètres d'une importance secondaire cités dans les détails de constructions peuvent aussi affecter la performance :

- La forme de la section de la crête.
- La forme d'entrée sous les porte-à-faux.

Plusieurs études ont été effectuées pour identifier les valeurs optimales des paramètres géométriques qui influencent l'efficacité du PK-Weir. Ouamane et Lempérière en 2006 ont montré que le rapport L/W est le paramètre principal qui affecte la capacité de l'évacuation. Lempérière et al en 2011 ont aussi affirmé que lorsque le rapport L/W est égal à 5, le PK-Weir deviendra plus rentable.

Les paramètres adimensionnels suivants tels que : le ratio $N = L/W$, la largeur relative des alvéoles a/b , la longueur relative des porte-à-faux c/d , le ratio de l'aspect vertical W/P et la charge relative H/P sont à l'origine pour calculer et évaluer la capacité du PK-Weir démontrées dans l'équation (II.18) (Ouamane, 2006a) :

$$C_w = \left[\frac{D}{P}, \frac{W}{P}, \frac{L}{W}, \frac{b}{a}, \frac{c}{d}, \frac{h^*}{P}, \frac{t}{P}, \frac{R}{P} \right] \quad (\text{II.18})$$

Chacun de ces paramètres cités à un impact sur la performance du P.K.Weir :

II.4.3.1 Longueur relative, L/W

Selon Ouamane et Lempérière en 2006, L/W a un impact fondamental sur le rendement de PK-Weir. Cette influence est en fonction du prolongement ou de la diminution de la longueur de la crête. L'augmentation de deux fois du L/W permet d'accroître le débit de 50% pour les charges relatives $H^*/P < 0.4$. Concernant les grandes charges, l'efficacité du PK-Weir diminue remarquablement.

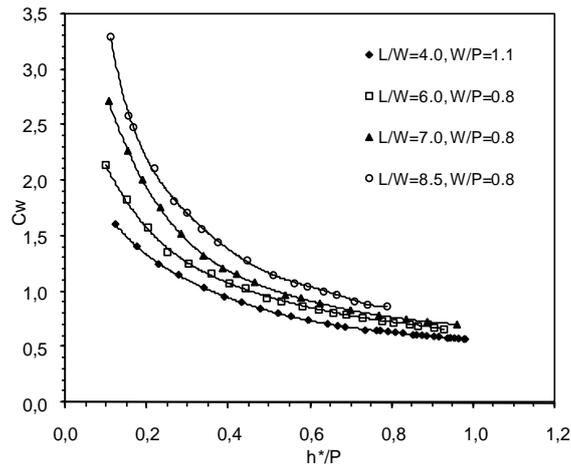


Figure II.47. Coefficient de débit en fonction du ratio L/W (Ouamane, 2006b).

Du point de vue économique et hydraulique, quand ce ratio a une petite valeur, la conception du PK-Weir deviendra plus acceptable et plus rentable (Ouamane, 2006b) Fig. II.46. Afin de vérifier l'effet de l'accroissement de la crête sur la noyade du PK-Weir, autres essais ont été effectués sur deux modèles **Am1** et **Am2**, le premier modèle a ratio $L/W=3,85$ et le deuxième a ratio $L/W=5$. Les résultats ont montré que le ratio L/W n'a aucun effet sur la noyade du PK-Weir (Ouamane A, Belaabd F 2011) Fig. II. 47.

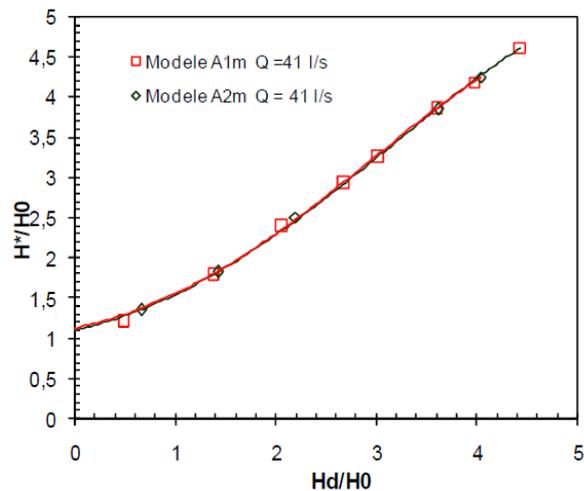


Figure II.48. La charge relative amont en fonction de la charge relative aval

II.4.3.2 Impact de la largeur des alvéoles W_i et W_o

L'influence de la largeur des alvéoles amont et aval a été étudiée par plusieurs chercheurs, Ouamane en 2006 a affirmé que pour les charges relatives inférieures à 0.5, la

rentabilité du PK-Weir devient de plus en plus nette et claire lorsque la largeur de l'alvéole amont est plus grande que celle de l'alvéole aval (Fig. II.48).

Un grand nombre de modèles réduits avec une large gamme de ratio W_i/W_o entre $0,5 < W_i/W_o < 2,5$ ont été testés pour trouver la configuration optimale de la conception du PK-Weir.

Les résultats obtenus montrent que la valeur optimale s'approche de $W_i/W_o = 1.5$ (Ouamane et Lempérière 2006, Leite Ribeiro 2012c et Machiels et al 2010).

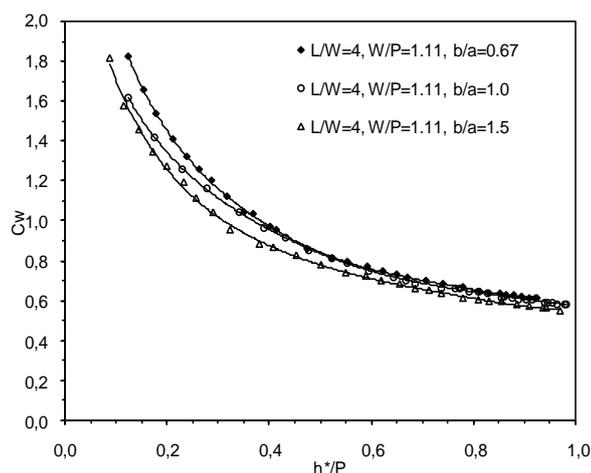


Figure II.49. Coefficient de débit en fonction de la largeur des alvéoles (Ouamane, 2006b).

II.4.3.3 Rapport d'aspect vertical W/P

Pour tester l'influence de la variation de la hauteur du PK-Weir sur le rendement, plusieurs configurations ont été expérimentées. Les résultats des essais (Ouamane, 2006b) effectués sur trois modèles de PK-Weir ayant la même largeur de cycle et ayant de différentes hauteurs indiquent que le coefficient du débit dépend du paramètre W/P (Fig. II.49).

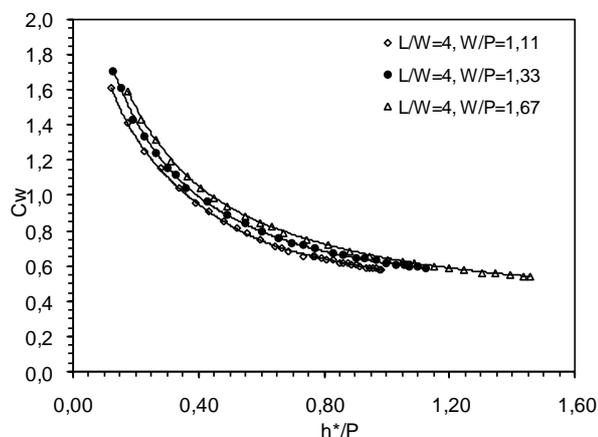


Figure II.50. Coefficient de débit en fonction du rapport de l'aspect vertical W/P (Ouamane, 2006b).

Pour les nouveaux projets de barrages, Machiels&al.(2012) ont recommandé que le déversoir soit conçu avec le ratio ($P/Wu \approx 1,33$). Ce choix offre un rendement plus important (environ 30%) qu'un déversoir avec une hauteur plus basse. Il peut être aussi incorporé aisément dans la structure du barrage. Pour ce qui est des projets de réhabilitation, une valeur de ratio ($P/Wu \approx 0,5$) est on mesure d'offrir un meilleur rendement.

II.4.3.4 Impact de la longueur des porte-à-faux

Les résultats des essais expérimentaux effectués par Ouamane (2006b) sur trois configurations différentes du PK-Weir,

- PK-Weir avec des porte-à-faux plus longs en amont qu'en aval,
- PK-Weir avec des porte-à-faux amont et aval identiques,
- PK-Weir avec seulement des porte-à-faux en amont,

ont montré que le modèle sans porte-à-faux aval ($d/c=0$) donne un rendement plus élevé que les deux autres modèles(Fig. II.50). Comme il peut être aussi être une solution très efficace pour les grands débits spécifiques (Ouamane, 2006b).

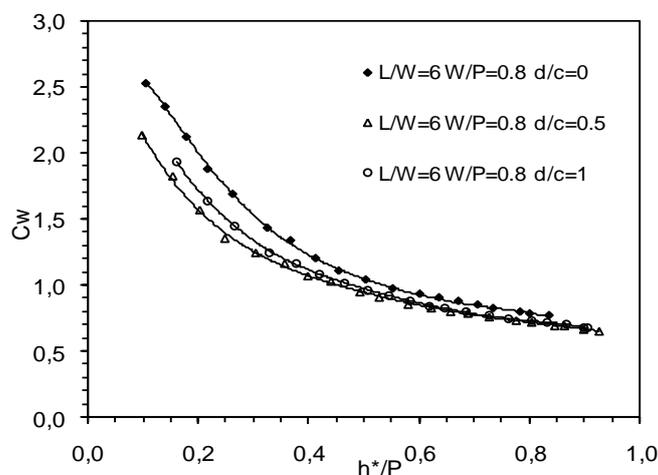


Figure II.51. Coefficient de débit en fonction de la longueur des porte-à-faux (Ouamane, 2006b).

II.4.3.5 Impact des corps flottants

Le fonctionnement du PK-Weir a été étudié en présence des corps flottants. Les résultats obtenus ont montré que pour les faibles charges les corps flottants sont dans les alvéoles aval et restent bloqués jusqu'à une charge moyenne de l'ordre de $0,4 H^*/P$. Au-delà de cette charge les corps flottants commencent à sortir systématiquement vers

l'aval(Ouamane, 2006). Leur effet peut réduire le débit de PK-Weir d'environ de 10 % quand la profondeur de la lame déversante est entre 1 ou 2 mètre. Ce phénomène de la réduction a été déjà observé dans le type de Creager.

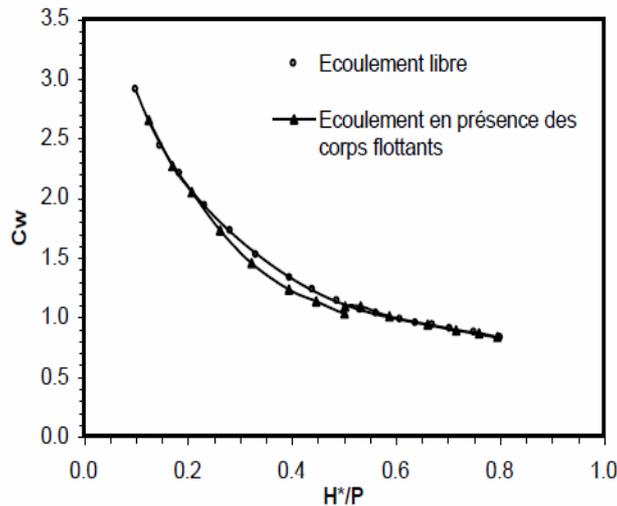


Figure II.52. Fonctionnement du PK-Weir avec la présence des corps flottants.

II.4.3.6 Effet de la forme d'entrée

La forme d'entrée peut concerner deux endroits bien définis du PK-Weir, le premier se rapporte au profilage du mur sous le porte-à-faux amont (forme plane ou profilée) et le second à la forme du radier à l'entrée du PK-Weir (Radier du canal plus bas que celui à l'entrée du PK-Weir ou au même niveau)

II.4.3.6.1 Sous les porte-à-faux amont

La conception d'une meilleure forme hydraulique à la partie verticale sous les porte-à-faux amont qui ressemble à des piliers d'un déversoir vanné, fait augmenter d'avantage le rendement du PK-Weir. En plus des avantages de cette modification elle ne demande pas de grandes dépenses supplémentaires (Ouamane, 2006b) (Fig. II.52).

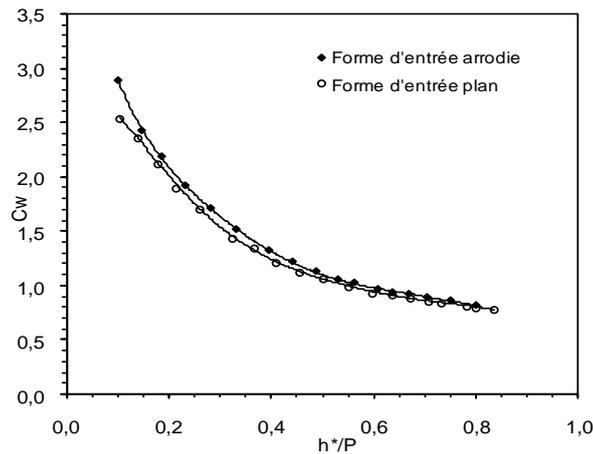


Figure II.53. Coefficient de débit en fonction de la forme d'entrée sous les porte-à-faux (Ouamane, 2006b).

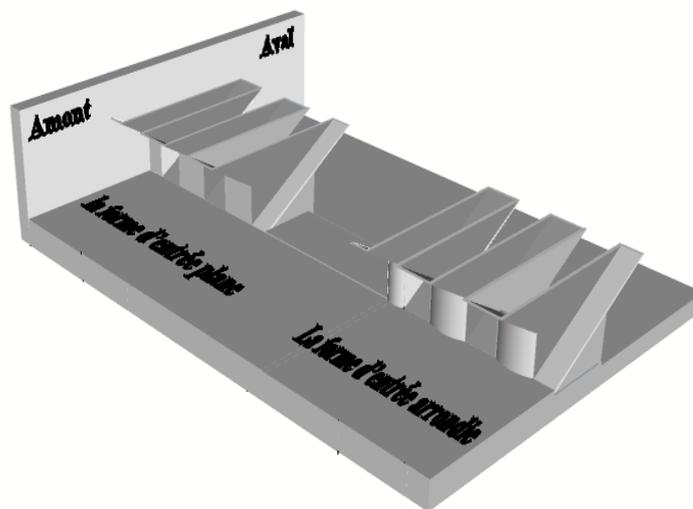


Figure II.54. Différents aspects de la forme sous les porte-à-faux.

II.4.3.6.2 Au pied du déversoir

Les conditions d'approche, peuvent affecter la performance du PK-Weir. Ainsi, deux cas de disposition des conditions d'approche ont été vérifiés par Belaabed en 2011 et Bouredji en 2012 :

- le premier cas a été soumis à deux conditions :
 - a- l'emplacement du PK-Weir sur le radier du canal.
 - b- l'emplacement de PK-Weir sur un socle pour simuler un barrage en béton.

Ces deux conditions d'emplacement (Fig. II.54), montrent que la performance du déversoir baisse quand l'emplacement du PK-Weir est sur le socle (Belaabed et al. 2011)(Fig.II.55).

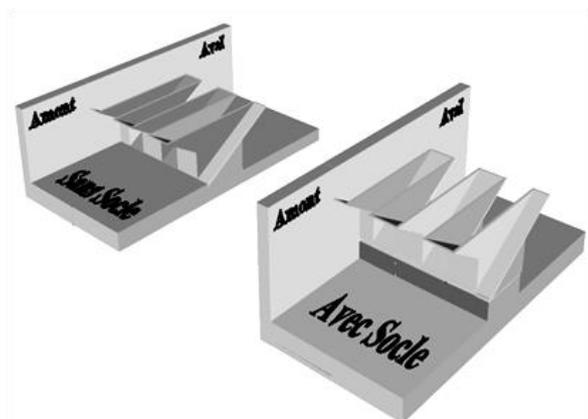


Figure II.55. Emplacement avec et sans socle.

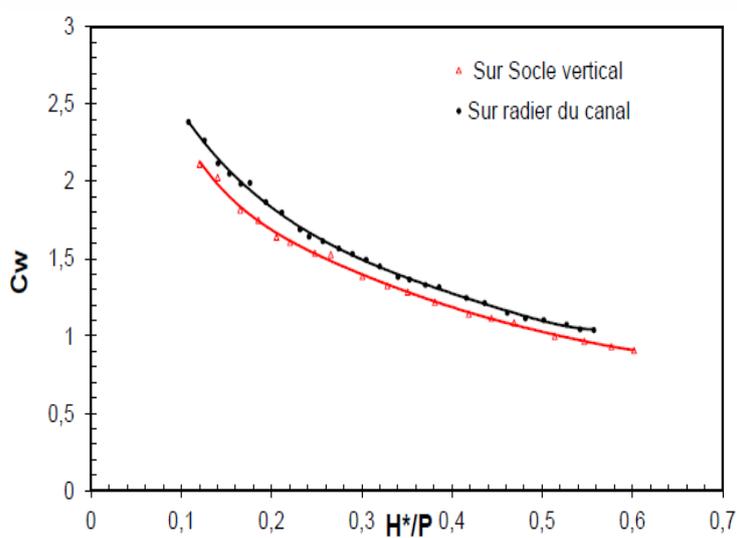


Figure II.56. Fonctionnements du PKW avec les deux d'emplacements.

- Le deuxième cas a été réalisé pour vérifier l'impact de la forme du socle sur la performance du PK-Weir.

Pour cela, trois sortes de socles en amont ont été étudiés : socle arrondi, socle incliné et socle vertical.

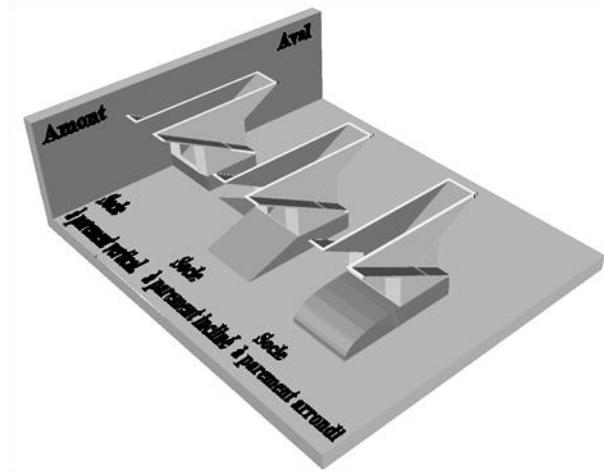


Figure II.57. Les formes d'entrée au pied amont du déversoir.

Les résultats expérimentaux obtenus sur ces trois formes (Fig. II.56), ont montré que la forme d'entrée au pied du déversoir a une influence très faible voire même négligeable sur la performance du PK-Weir (Fig. II.57) (Ouamane, Belaabed, 2011).

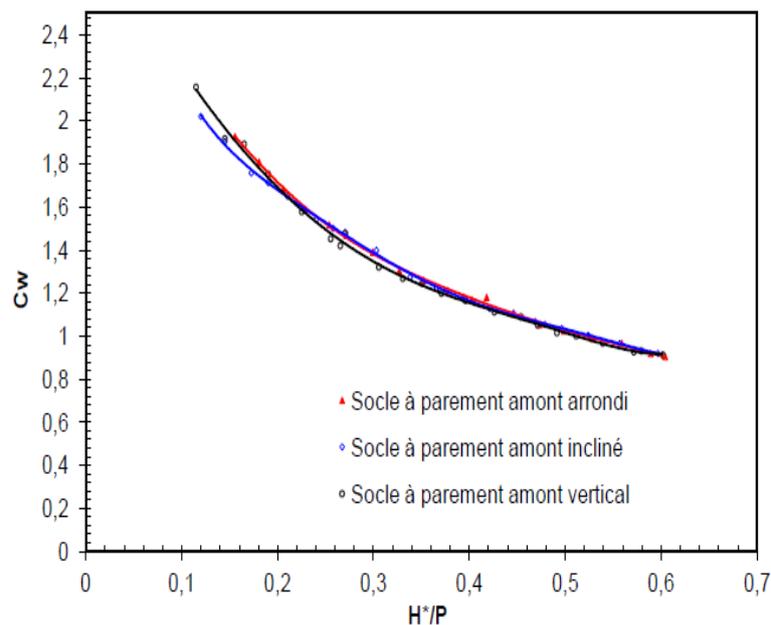


Figure II.58. Fonctionnement du PK-Weir en fonction de la forme amont du Socle.

II.4.4 Estimation du coefficient de débit par voie de calcul

Différentes approches ont été développées pour l'estimation de la performance ou le coefficient de débit de déversoir en touche de piano, tels que celles de Leite Ribeiro et al. (2012). Dans cette approche, la performance du déversoir en labyrinthe a été exprimée par rapport au rendement du déversoir rectiligne et ils ont proposés la relation suivante :

$$1 + 0.24 \left[\frac{(L-W)P}{WH} \right] wpba \quad (\text{II.19})$$

$$\text{Où : } w = \left(\frac{W_i}{W_o} \right)^{0.05}, \quad P = \left(\frac{P_o}{P_i} \right)^{0.25}, \quad b = \left(0.3 + \frac{B_i+B_o}{B} \right)^{-0.5}, \quad a = 1 + \left(\frac{R_o}{o} \right)^2$$

Kabiri-Samani et Javaheri (2012) ont présenté une formule pour évaluer le coefficient de débit du PK-Weir dans des conditions noyée et dénoyée. Dans cette méthode, une analyse par régression multiple a été appliquée aux différents facteurs qui influencent la capacité de ce type de déversoir. Le coefficient de débit du PK-Weir a été exprimé par la formule suivante :

$$C_d = \frac{2}{3} \left\{ 0.606 + \left(0.212 \left(\frac{H}{P} \right)^{-0.675} \left(\frac{L}{W} \right)^{0.377} \left(\frac{W_i}{W_o} \right)^{0.426} \left(\frac{B}{P} \right)^{0.306} \text{EXP} \left(1.504 \frac{B_o}{B} + 0.093 \frac{B_i}{B} \right) \right) \right\} \quad (\text{II.20})$$

Machiels et al. (2014, 2015) ont proposé une approche alternative, cette approche considère que le débit du PK-Weir peut être divisé en trois parties: débit de la crête de l'entrée, débit de la crête de la sortie et le débit de la crête latérale. Cette considération a conduit aux relations suivantes :

$$C_d = C_{qu} \frac{W_o}{W_u} + C_{qd} \frac{W_i}{W_u} + C_{qs} \frac{2B}{W_u} K_{wo} \quad (\text{II.21})$$

$$\text{Où : } W_u = W_i + W_o + 2T_o$$

$$C_{qu} = 0.374 \left(1 + \frac{1}{1000H + 1.6} \right) \left(1 + 0.05 \left(\frac{H}{H + P_T} \right)^2 \right) \quad (\text{II.22})$$

$$C_{qd} = 0.445 \left(1 + \frac{1}{1000H + 1.6} \right) \left(1 + 0.05 \left(\frac{H}{H + P_T} \right)^2 \right) \quad (\text{II.23})$$

$$C_{qs} = 0.41 \left(1 + \frac{1}{833H+1.6} \right) \left(1 + 0.05 \left(\frac{0.833H}{0.833H+P_e} \right) \left(\frac{P_e^{\alpha+\beta}}{(0.833H+P_e)^\alpha} \right) K_{wi}^2 \right) \quad (\text{II.24})$$

Où : $P_T = P + P_d$, P_d : est la hauteur de P.K.W, P_e : est la hauteur moyenne des parois latérales calculée par :

$$P_e = P_T \frac{B_o}{B} + \frac{P}{2} \left(1 - \frac{B_o}{B} \right)$$

Le paramètre K_{wo} reflète l'influence sur l'efficacité de la crête latérale du PK-Weir.

$$K_{wo}=1$$

$$H/W_o \leq L_1$$

$$K_{w0} = \frac{2}{(L_2-L_1)^2} \left(\frac{H}{W_0}\right)^3 - \frac{3(L_2-L_1)}{(L_2-L_1)^3} \left(\frac{H}{W_0}\right)^2 + \frac{6L_2L_1}{(L_2-L_1)^3} \left(\frac{H}{W_0}\right) + \frac{L_2^3(L_2-3L_1)}{(L_2-L_1)^3} \quad L_1 \leq H/W_0 \leq L_2$$

$$K_{w0} = 0$$

$$L_2 \leq H/W_0$$

Où : L1 et L2, respectivement, la formule suivante

$$L_1 = -0.788 S_0^{-1.88} + 5, \quad L_2 = -0.236 S_0^{-1.94} + 5$$

Les paramètres α et β représentent l'influence de l'inclinaison du radier de l'alvéole de l'entrée sur le débit du PK-Weir :

$$\alpha = \frac{0.7}{S_i^2} - \frac{3.58}{S_i} + 7.55, \quad \beta = 0.029 \text{ EXP} \left(\frac{-1.466}{S_i} \right)$$

Le paramètre K_{wi} exprime l'influence de la vitesse de l'écoulement sur le déversoir, et il est décrit comme :

$$K_{wi} = 1 - \frac{\gamma}{\gamma + W_i^2} ; \quad \gamma = -0.0038 \frac{W_i}{W_0} + 0.0055$$

Une étude récente menée par B.M. Crookston & al. (2017), ont présenté les résultats de différents essais sur des déversoirs en labyrinthe de formes rectangulaire en plan et touche de piano (P.K.W). Ces tests ont conduit à donner une relation générale qui exprime le coefficient de débit pour les deux type de déversoir (rectangulaire et PK-Weir) :

$$C_d = \frac{1}{[a + b H/P + c / (H/P)] + d} \quad (\text{II.25})$$

Où : a, b, c et d sont des coefficients empirique caractérisant exclusivement les modèle testés.

II.5 Conclusion de la première partie

La première partie de cette étude a été réalisée dans le but de présenter d'une façon brève les principaux travaux destinés à l'étude de la performance de l'évacuateur de crues et notamment les déversoirs en labyrinthe. Le premier chapitre de cette partie de recherche a permis de définir la géométrie, le mode d'écoulement des déversoirs rectilignes les plus utilisés dans la pratique et leur rendement de point de vue hydraulique. Les différentes formules théoriques usuelles destinées à l'évaluation du coefficient de débit évacué par ce type de déversoir ont été aussi présentées.

Le deuxième chapitre a examiné les travaux de recherche les plus significatives dans le domaine des évacuateurs de crues en labyrinthe. L'étude de Gentilini en 1940 est considérée comme la première recherche qui s'est intéressée au déversoir en labyrinthe, cependant, l'analyse détaillée de la performance du déversoir en question a été réalisée pour la première fois en 1968 par Taylor et suivie d'une autre analyse de Hay & Taylor en 1970. Dans les analyses précédentes, la performance (ou le rendement) du déversoir en labyrinthe a été exprimée par rapport au rendement d'un déversoir rectiligne qui occupe la même largeur du canal et fonctionne sous la même charge de déversement.

Cette analyse a montré aussi que la performance dépend des paramètres géométriques du déversoir, des conditions d'approches et des caractéristiques de l'écoulement. Cependant, l'étude théorique de la performance du déversoir en labyrinthe a été réalisée pour la première fois en 1985 par Lux et Hinchliff. A travers cette étude, les paramètres adimensionnels définis ont été exploités pour formuler le coefficient de débit du déversoir en labyrinthe.

En 1995, Tullis et al. ont utilisé la méthode statistique pour exprimer le coefficient de débit en fonction de la charge relative H_T/P . Cette méthode a permis de développer une série d'équations, où chacune correspond à un angle formé entre le sens de l'écoulement et la paroi latérale. Dans le même sens, plusieurs relations théoriques utilisant la méthode statistique ont été proposées pour estimer le coefficient du débit d'une manière théorique, citant comme exemple les formules de : Emirogluet al. (2010), Kabiri-Samaniet al. (2012) et B.M. Crookston & al. (2017).

Les déversoirs en labyrinthe fusible représentent un simple système pour augmenter le stockage du réservoir ou la capacité du déversoir. Au moment des crues ordinaires et moyennes l'eau est évacuée par-dessus la crête de la hausse fusible qui agit comme un seuil libre. Pour les crues exceptionnelles, les éléments des hausses fusibles basculent de façon

automatique les unes après les autres sous la seule action de l'eau, pour libérer ainsi d'une manière progressive le seuil initial du déversoir.

Le déversoir en touche de piano ou (PK-Weir) est une nouvelle forme de déversoir en labyrinthe développée par A. Ouamane et F. Lempérière (2003). Il se caractérise par une efficacité hydraulique plus élevée et par un coût de construction relativement faible par rapport à un déversoir rectiligne. Le PK-Weir a l'avantage d'être appliqué aux barrages en terre et sur des sections réduites des barrages poids existants ou nouveaux. Aujourd'hui, l'utilisation de ce type de déversoir est largement répandue à travers le monde (Afrique, Europe, Asie et Australie).

Contrairement au déversoir en labyrinthe, le déversoir en touches de piano (PK-Weir) a fait l'objet de plusieurs recherches intensives pour développer des relations théoriques permettant l'évaluation de la performance et le coefficient de débit. Dans ce sens, de différentes relations théoriques ont été proposées, telles que la relation de Leite Ribeiro et al. (2012), la relation de Kabiri-Samani et Javaheri (2012), la relation de Machiels et al. (2014, 2015) et la relation de B.M. Crookston & al. (2017), cependant, ces relations sont limitées à des cas précis et difficile à être utilisées.

Parmi les principales conclusions que nous avons tirées de cette étude, le déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire en plan n'a été que rarement étudié et appliquée seulement dans quelques cas.

Concernant la méthode de dimensionnement du déversoir en labyrinthe et du PK-Weir, il est actuellement conclu qu'il n'existe aucune méthode simple qui permet de calculer d'une manière explicite les valeurs des dimensions du modèle initial du projet.

Deuxième Partie

Etude expérimentale

Chapitre I

Description du dispositif et protocole expérimentaux

Chapitre I

Description du dispositif et protocole expérimentaux

I.1 Introduction

Le présent chapitre concerne une étude expérimentale qui cible l'effet de la modification des paramètres géométriques sur la performance du déversoir en labyrinthe. Pour atteindre cet objectif, plusieurs modèles physiques de déversoirs en labyrinthe ont été confectionnés sur la base des modifications apportées au modèle standard.

Les essais ont été effectués dans des conditions d'écoulement libre dans la station d'expérimentation des modèles physiques du Laboratoire aménagements Hydrauliques et Environnement de l'université de Biskra. Cette station a été soigneusement dimensionnée et bien équipée pour permettre la réalisation des essais à une échelle suffisamment acceptable *et* d'avoir de bons résultats qualitatifs.



Figure I.1. Vue extérieure de la station d'expérimentation.



Figure I.2. Vue en aval du bassin de simulation.



Figure I.3. Vue en aval du canal de simulation

I.2 La station d'expérimentation

L'expérimentation a été réalisée dans un canal d'essais de section rectangulaire 1.0 x 1.0m et de longueur 12m. (Figure I.4). L'un des côtés du canal est conçu en verre permettant ainsi l'observation de l'écoulement d'eau sur les modèles installés au milieu de ce canal. Le système expérimental est équipé de deux pompes qui débitent 180 l/s, raccordées par l'intermédiaire de deux conduites de diamètre 200mm à un bassin de tranquillisation de l'écoulement équipé d'un mur perforé.

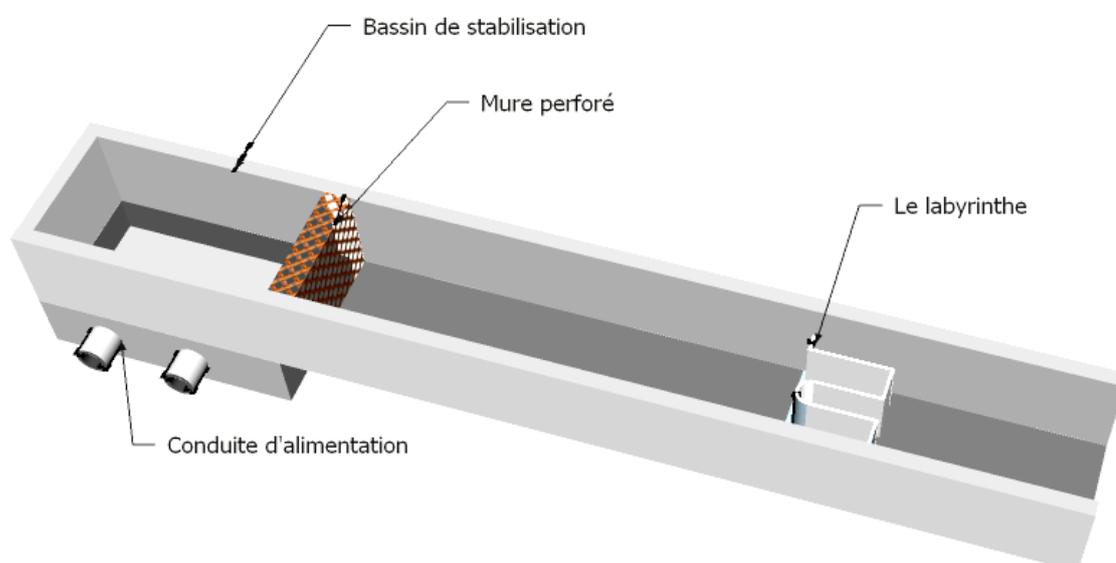


Figure I.4. Schéma du canal d'expérimentation.

I.3 Appareillage de mesure

Le débit évacué Q et la charge H sont les principales grandeurs qui doivent être mesurés pour évaluer le rendement de chaque modèle expérimenté.

Les débits qui transitent par le modèle du déversoir sont d'un côté réglés par des vannes et de l'autre côté mesurés par deux types de débitmètres : le premier à ultrason, le second en électromagnétique (Fig. I.5).



Figure I.5. Les deux types de débitmètres utilisés.

Le débitmètre à ultrason est constitué de deux parties distinctes :

- Deux sondes identiques (transducteurs), fixées par une chaînette sur la conduite d'alimentation du système, chacune de ces sondes joue à la fois le rôle d'émetteur et de récepteur des ondes ultrasonores.
- Un transmetteur à écran en cristaux liquides qui permet l'affichage du débit qui passe par la conduite d'alimentation. Cet appareil permet aussi l'affichage de la vitesse moyenne de l'écoulement dans la conduite d'alimentation.

Les profondeurs d'eau dans le canal sont mesurées par une série des détecteurs de niveau à ultrason. Ces détecteurs sont placés en amont des modèles testés afin de mesurer la profondeur d'eau.



Figure I.6. Détecteur de niveau à ultrason.

I.4 Les modèles des déversoirs

Les essais expérimentaux ont été effectués sur 12 modèles de déversoirs en labyrinthe de différentes configurations. Tous ces modèles physiques sont conçus en tôles d'épaisseur deux millimètres et avec des hauteurs de 15cm et 20cm.

La première étape de cette étude tente d'améliorer la forme du labyrinthe rectangulaire pour augmenter le débit évacué sans qu'il ait des dépenses supplémentaires.

La deuxième étape vise la détermination des valeurs optimales des principaux paramètres géométriques tels que : l'accroissement de la longueur L/W , le rapport entre les largeurs des alvéoles amont et aval a/b et la charge relative h^*/P , qui régissent l'écoulement sur le déversoir en labyrinthe. Les caractéristiques géométriques de ces modèles sont présentées dans le tableau (I.1).

Tableau I.1 Caractéristiques des modèles réduits

Modèles des déversoirs en labyrinthe	n°	<i>n</i>	<i>L</i>	<i>Wt</i>	<i>P</i>	<i>B</i>	<i>L_u</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i>	<i>L/W</i>	<i>W/P</i>	<i>a/b</i>	<i>B/P</i>
Labyrinthe rectangulaire de forme d'entrée plate en amont	01	6	355	90.8	15	25	59.16	9	6	5	3.91	1	1.5	1.66
Labyrinthe rectangulaire de forme d'entrée arrondie en amont	02	6	353	91.8	15	25	15	8.5	6.5	3.25	3.85	1	1.3	1.66
Labyrinthe rectangulaire de forme d'entrée arrondie en amont	03	6	355	90.8	15	25	59.16	9	6	5	3.91	1	1.5	1.66
Labyrinthe rectangulaire de forme d'entrée arrondie en amont	04	6	353	92.3	15	25	15	9.3	5.7	2.85	3.91	1	1.63	1.66
Labyrinthe rectangulaire de forme d'entrée arrondie en amont	05	6	474	90	15	34.5	15	9	6	3	5.26	1	1.5	2.3
Labyrinthe rectangulaire de forme d'entrée arrondie en amont	06	6	538.5	90.2	15	39	89.74	9	6	3	5.96	1	1.5	2.6
Labyrinthe Trapézoïdal	07	6	358	90.5	15	27	59.66	-	-	-	3.96	1	-	1.8
Labyrinthe Trapézoïdal	08	6	470	90	15	36.5	15	-	-	-	5.22	1	-	2.43
Labyrinthe Trapézoïdal	09	6	606.6	102.3	15	48	101.1	-	-	-	5.94	1	-	3.2
Labyrinthe avec des porte-à-faux amont et aval	10	4	494	99.2	20	50	25	13.5	11.3	-	4.98	1.25	1.2	2.5
Labyrinthe avec des porte-à-faux uniquement en amont	11	4	502	99.2	20	50	25	13.5	11.3	-	5.06	1.25	1.2	2.5
Labyrinthe avec des porte-à-faux uniquement en aval	12	4	496	99.2	20	50	25	13.5	11.3	-	5	1.25	1.2	2.5

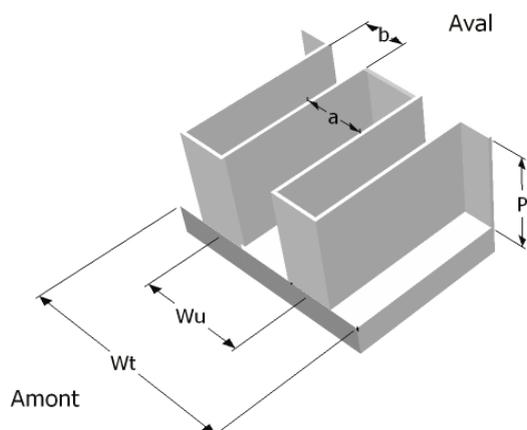


Figure I.7. Labyrinthe rectangulaire avec une forme d'entrée plate.

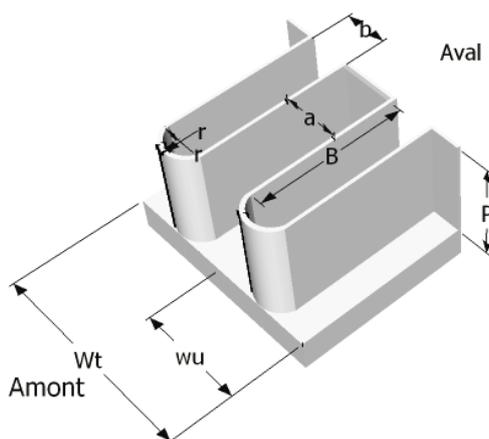


Figure I.8. Labyrinthe rectangulaire arrondie en amont.

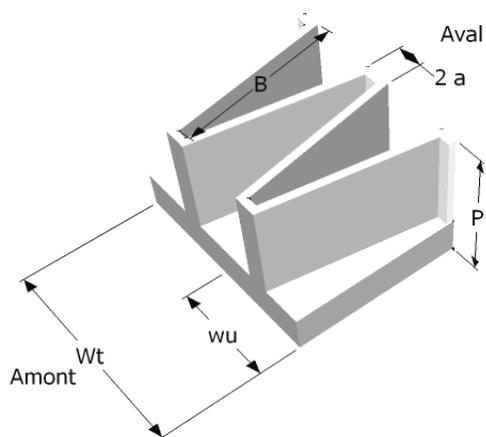


Figure I.9. Labyrinthe Trapézoïdale.

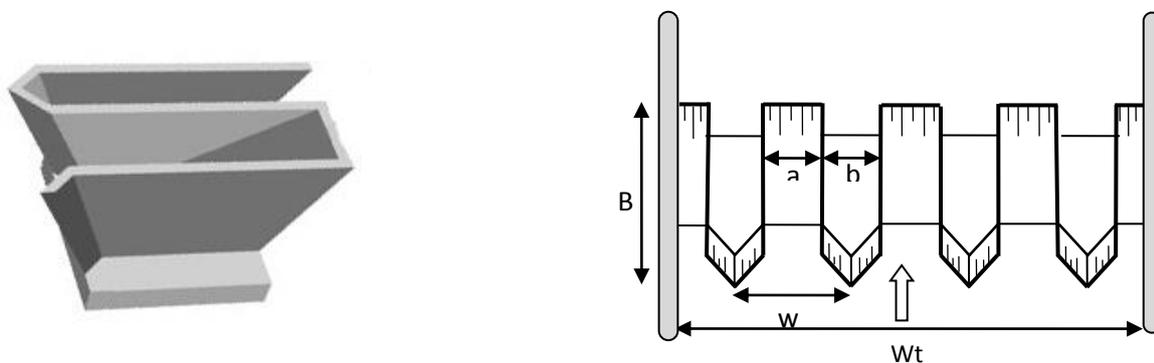


Figure I.10. Labyrinthe avec des porte-à-faux amont et aval.

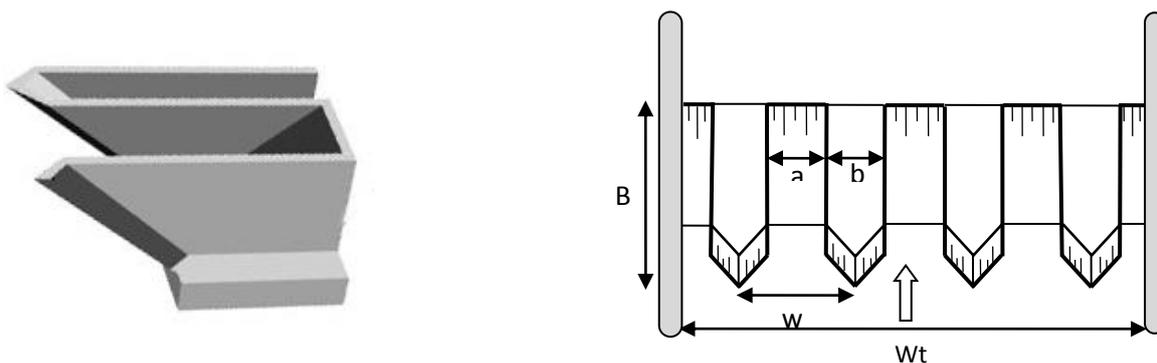


Figure I.11. Labyrinthe avec des porte-à-faux uniquement en amont.

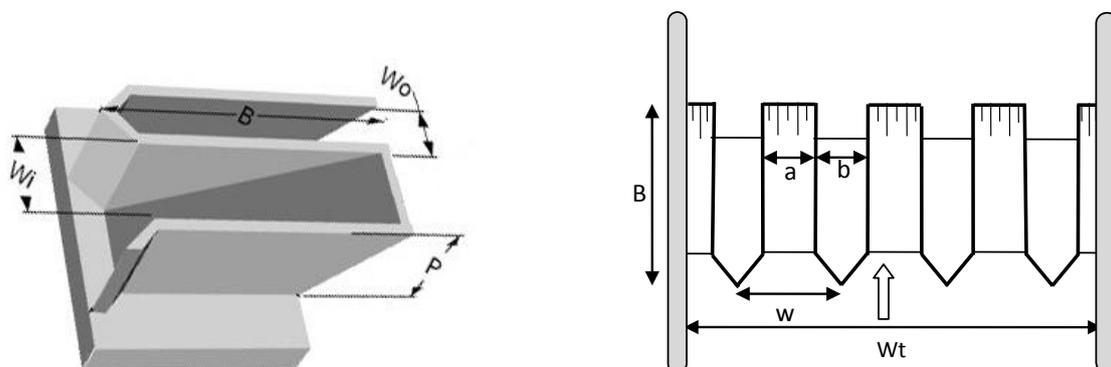


Figure I.12. Labyrinthe avec des porte-à-faux uniquement en aval.

I.5 Procédure expérimentale

Pour plus de fiabilité des résultats, la procédure expérimentale devrait inclure les phases suivantes :

- La première phase consiste à assurer des bonnes conditions expérimentales telles que l'horizontalité du modèle et la bonne étanchéité des joints entre les parois du modèle et les murs du canal de simulation.
- La *deuxième phase* concerne la vérification du bon fonctionnement des instruments de mesure du débit et de la profondeur d'eau évacuée par-dessus de la crête du déversoir
- Après ces étapes, on fait démarrer les essais par l'amorçage de la pompe et les mesures du débit et de la profondeur d'eau.

Dans ce contexte, la charge de référence, qui correspond à la hauteur du modèle installé (le niveau du seuil) dans le canal, est la première mesure qui doit être effectuée pour commencer les essais. Après cette étape, on fait démarrer la pompe à un débit donné par la manipulation de la vanne du réglage du débit, après quelques minutes l'écoulement se stabilise et devient uniforme. Ceci permet de procéder à la lecture des profondeurs d'eau et du débit.

Cette opération se répète chaque fois qu'on modifie le débit par la manipulation de la vanne du réglage. On obtient ainsi, une série de couple des valeurs de débits et des profondeurs d'eau correspondantes. Cette action se refait chaque fois qu'on change de modèle.

I.6 Calcul de la charge total

La précision de la valeur calculée de la charge totale du labyrinthe, le coefficient du débit et la performance (ou le rendement) du déversoir sont essentiellement liés à la précision de la valeur mesurée des couples des valeurs de débit et de la charge piézométrique (Q et h_p) pour chaque modèle.

- La charge totale sur le déversoir (H_T) correspond à la somme de la charge piézométrique (h) et la charge cinétique (h_c)

$$H_T = h_p + h_c \quad (\text{I.1})$$

H_T : Charge totale sur le seuil du déversoir (m)

h_p : Charge piézométrique mesurée (m)

h_c : Charge cinétique (m)

$$h_c = \frac{Q^2}{2gA^2} = \frac{Q^2}{2gA[l(P+h)]^2} \quad (I.2)$$

Où :

Q : Débit mesuré (m³/s)

A : Section de l'écoulement dans le bassin de simulation (m²)

l : Largeur du bassin de simulation (m)

P : Hauteur du déversoir (m)

h_P : profondeur d'eau mesurée sur le seuil du déversoir à une distance de deux mètres de ce dernier (m).

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

$$C_W = \frac{Q}{W\sqrt{2gh}^{3/2}} \quad (I.3)$$

Où :

C_W : Coefficient de débit du déversoir testé

W : Largeur totale du déversoir (m)

H_T : Charge totale sur le seuil du déversoir (m)

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

$$C_W = \frac{Q}{W\sqrt{2gh}^{3/2}} \quad (I.4)$$

Où :

r : Performance du déversoir expérimenté (Labyrinthe)

$Q_{\text{labyrinthe}}$: Débit mesuré (m³/s)

$Q_{\text{Rectiligne}}$: Débit calculé pour un déversoir rectiligne à mince paroi (m³/s).

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

$$Q_r = \mu L \sqrt{2gh}^{\frac{3}{2}} \quad (I.5)$$

Où :

μ : Coefficient de débit d'un déversoir Rectiligne ($\mu=0.44$)

L : Largeur du déversoir ($L = W$) (m)

H_T : Charge totale sur le déversoir (m)

Chapitre II

Résultats expérimentaux

Chapitre II

Résultats expérimentaux

II.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la représentation des résultats expérimentaux des essais effectués sur les différents modèles physiques. Ces essais ont eu pour objectif de rendre l'utilisation du déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire en plan plus rentable du point de vue hydraulique et économique. Pour atteindre cet objectif, il est important d'appliquer quelques modifications qui permettent de jouer un rôle essentiel, non seulement pour augmenter le rendement hydraulique mais aussi pour fournir des dimensions structurelles plus réduites permettant d'éviter les coûts supplémentaires.

Les modifications qui ont été considérées pour améliorer le rendement du déversoir en labyrinthe comprennent : la forme d'entrée, la largeur des alvéoles amont et aval, la longueur développée de la crête, la hauteur des murs latéraux, la longueur de la base d'appui en plus du nombre et de la disposition des porte-à-faux. Les résultats expérimentaux obtenus de chaque modification sont présentés ci-dessous par le coefficient du débit en fonction de la charge relative $C_w = f(H^*/P)$.

II.2 Résultats et discussions

II.2.1 Impact de la forme d'entrée du labyrinthe

La forme d'entrée a toujours été un paramètre important qui influe sur le fonctionnement des déversoirs. Il est fondamental donc, de déterminer la forme d'entrée qui peut donner le meilleur rendement possible. Dans ce sens, deux modèles de forme d'entrée différente, l'un avec une forme d'entrée plate et l'autre avec une forme d'entrée arrondie et ayant les mêmes caractéristiques géométriques ont été testés.

Les résultats expérimentaux obtenus pour un ratio $a/b = 1.5$, ont montré que la conception du labyrinthe avec une forme d'entrée arrondie permet d'avoir un meilleur rendement hydraulique par rapport au déversoir ayant une forme d'entrée plate. Ainsi, pour une valeur de $H^*/P = 0.3$, le coefficient de débit de déversoir avec une forme d'entrée arrondie est plus grand d'environ de 12% de celui du modèle ayant une forme plate, cette avantage diminue progressivement en fonction de l'accroissement de la charge et atteint 5 % pour une charge relative H^*/P égale à 0.8 (Fig. II.1).

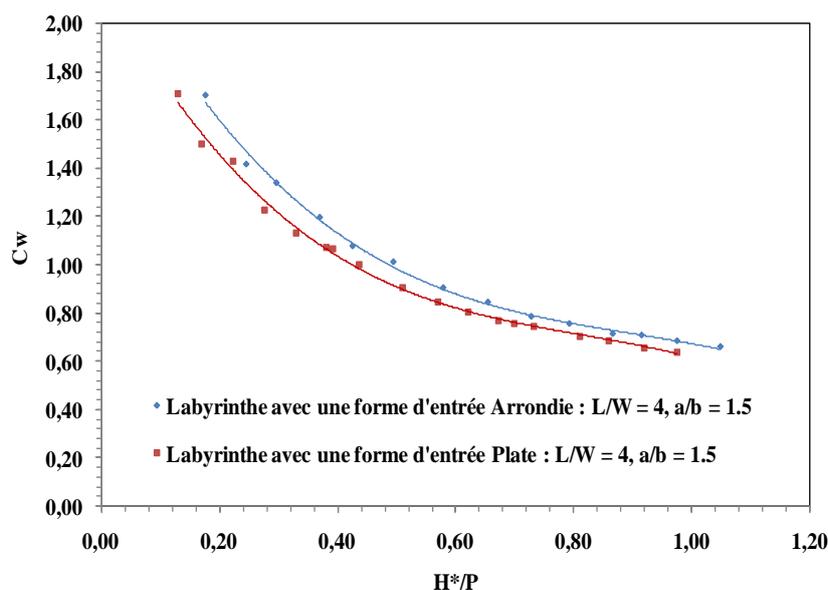


Figure II.1. Effet de la forme de l'entrée sur le coefficient de débit.



Figure II.2. Effet de la forme d'entrée sur l'écoulement pour un débit de 80 l/s
(à gauche entrée plate – à droite entrée arrondie).

La figure (II.2) montre clairement l'effet de la forme d'entrée sur le rendement du déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire en plan. On remarque dans la photo précédente que l'adoption d'une forme d'entrée arrondie a permis d'obtenir un écoulement plus stable que celui avec une entrée plate (photo de gauche). En réalité, l'adoption d'une forme d'entrée arrondie au lieu d'une forme plane, permet de réduire les conditions favorables à la formation d'un écoulement perturbé et assure ainsi des conditions d'écoulement meilleures à l'entrée du déversoir, ce qui améliore la performance hydraulique.

II.2.2 Effet de Largeur des alvéoles a/b

Le rendement du déversoir en labyrinthe dépend essentiellement de la largeur des alvéoles d'entrée et de sortie. Le choix des alvéoles d'entrée plus larges que les alvéoles de sortie pour la forme en plan rectangulaire peut entraîner un engorgement des alvéoles de sortie qui deviennent incapable d'évacuer tout le débit qui transite par les alvéoles d'entrée, ceci engendre une baisse dans la performance hydraulique. Il est possible qu'un optimum existe entre la largeur des deux alvéoles. En 2011, Ben Saïd & Ouamane ont indiqué que l'optimum du rapport des deux largeurs est proche de la valeur $a/b=1.5$. Le choix d'une largeur de l'alvéole d'entrée égale à 1.5 fois la largeur de l'alvéole de sortie permet d'avoir un gain de performance de l'ordre de 10% par rapport à la configuration symétrique ($a/b = 1$) et d'environ 20% en le comparant au modèle ayant le ratio a/b égal 0.66 (Ben Saïd & Ouamane, 2011).

Pour mieux cerner la valeur optimale, trois modèles de déversoirs en labyrinthe de forme rectangulaire arrondie ont été testés. Ces modèles ont le même ratio $L/W=4$ et la même géométrie à l'exception de la largeur des alvéoles qui est représentée par le rapport $a/b = 1.3$, 1.5, et 1.6, soit des valeurs de part et d'autre de la valeur de référence 1.5 déterminée antérieurement par Ben Saïd & Ouamane, 2011.

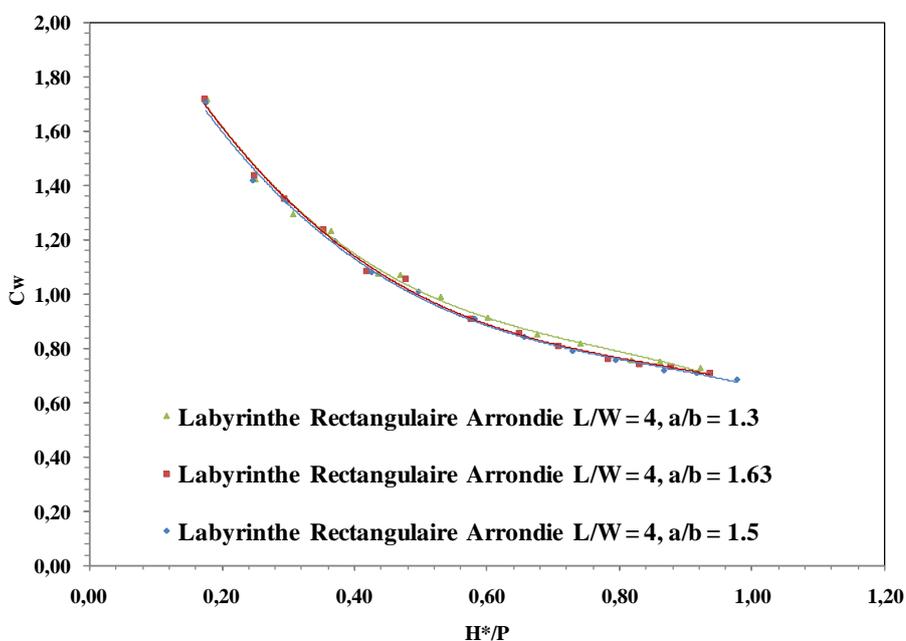


Figure II.3. Effet du ratio des largeurs des alvéoles amont et aval sur le coefficient de débit pour $L/W = 4$.

Pour le ratio L/W égal à 4 (fig. II.3) et pour les faibles et moyennes charges aucune variation significative de l'efficacité de l'évacuation n'a été remarquée pour les trois valeurs du ratio a/b alors que, pour les charges relatives supérieures à 0.5, seul le labyrinthe avec un ratio a/b égal à 1,3 présente une légère augmentation de la performance (2%) par rapport aux ratios 1.5 et 1.6. Ainsi, on peut conclure que le meilleur rapport entre la largeur des alvéoles amont et aval est dans l'intervalle (1.3 – 1.5)

L'effet du rapport a/b sur l'efficacité du déversoir en labyrinthe peut être expliqué par le fait que lorsque le ratio a/b augmente, la section transversale d'entrée augmente à son tour et permet ainsi le passage d'un plus grand débit dans les alvéoles amont, et offre donc un meilleur fonctionnement du déversoir.

Pour les valeurs les plus élevées du ratio a/b (>1.6), l'espace de l'alvéole aval sera insuffisant pour contenir le débit qui transite par l'alvéole amont, ce qui engendre la production d'une importante interférence entre les côtés opposés conduisant à la diminution de la longueur efficace de la crête latérale, est par conséquent, le rendement du déversoir sera affecté.

II.2.3 Influence du rapport L/W

Le rendement du déversoir en labyrinthe est principalement lié au ratio L/W qui exprime la grandeur de l'allongement de la crête par rapport à la largeur.

En conséquence, l'augmentation de la longueur de la crête du déversoir en labyrinthe conduit à une augmentation de la capacité d'évacuation. Il est donc important de vérifier l'influence de l'allongement de la crête sur la performance du labyrinthe de forme rectangulaire par rapport à la forme trapézoïdale. A cet effet, six modèles de labyrinthe ont été testés : trois ont une forme rectangulaire arrondie en amont et trois ont une forme trapézoïdale en plan. Dans un premier temps, les essais visent la vérification de l'influence de l'allongement de la crête sur la performance de chaque configuration de labyrinthe pour un ratio L/W compris entre 4 et 6. Dans un second temps les essais ont pour but d'évaluer l'efficacité du labyrinthe de forme rectangulaire par rapport le labyrinthe de forme trapézoïdale.

Les résultats expérimentaux obtenus pour chaque type du labyrinthe sont présenté ci-dessous :

II.2.3.1 Labyrinthe de forme rectangulaire

Les résultats expérimentaux ont montrés que la relation entre le rendement et le ratio L/W pour un déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire n'est pas entièrement proportionnelle. Selon la représentation graphique (II-4), le modèle de labyrinthe avec un

ratio $L/W = 5$ se caractérise par un rendement plus élevé que les deux modèles avec les ratios 4 et 6.

Lors du passage de ratio L/W de 4 à 5, le rendement a augmenté de 12 % pour les faibles et moyennes charges de H^*/P , pour les grandes charges, l'augmentation est d'environ de 6 %.

Par contre, le passage de ratio L/W de 5 à 6 fait réduire la capacité du labyrinthe rectangulaire d'environ de 2 % pour les petites charge et environ de 12 % pour les moyennes et grandes charges. Ainsi en peut conclure à travers le graphique (fig. II. 3), que le coefficient de débit du modèle avec un ratio $L/W = 6$ est plus faible que coefficient de débit du modèle qui a une valeur de ratio L/W égale à 4, cela veut dire qu'il n'est pas toujours vrai que l'accroissement du ratio L/W conduit automatiquement à un accroissement de la performance..

Pour les charges inférieurs ou égales à 0.4, la performance obtenue par le ratio $L/W= 6$ est supérieure que celle du ratio $L/W=4$, la différence est de l'ordre de 5 %. Cependant pour les charges supérieures à 0.4, le ratio $L/W = 4$ permet d'avoir un rendement supérieur à 10 % de celui obtenu par le modèle ayant le ratio L/W égale à 6.

Ce dernier résultat peut expliquer la performance élevé du modèle avec ratio L/W égale à 5.

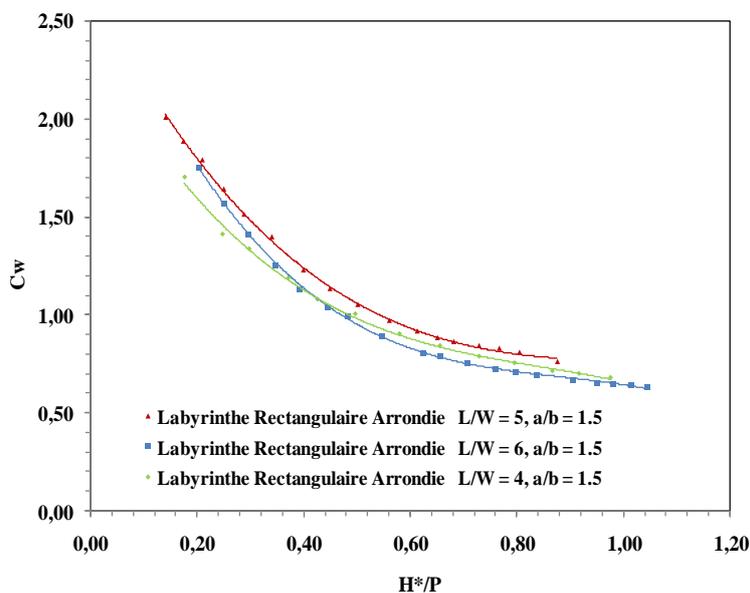


Figure II.4. L'effet du ratio de longueur de la crête L/W .

En effet, la longueur du déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire en plan est directement liée à la longueur de la crête B (dans le sens de l'écoulement). Par conséquent, l'allongement de la crête du labyrinthe engendre une augmentation de la longueur B qui, à son tour réduit l'entrée de l'eau dans les alvéoles et la distribution de l'écoulement sur toute

la longueur de la crête. Selon les résultats des deux modèles avec les ratios 4 et 6, le bon rendement du modèle avec le ratio $L/W = 4$ en comparaison avec le modèle ayant le ratio $L/W = 6$, peut être attribué à la bonne distribution de l'eau sur la crête et en particulier à la contribution efficace de sa partie aval.

II.2.3.2 Labyrinthe de forme trapézoïdale

Les essais effectués sur les trois modèles de déversoir en labyrinthe de forme trapézoïdale de ratio $L/W = 4,5$ et 6 ont montré que le rendement de cette forme de déversoir est proportionnel à la longueur développée de la crête.

La figure II.4 qui représente le coefficient du débit en fonction de la charge relative fait apparaître que la différence entre les trois courbes reste plus au moins constante pour toute la gamme des valeurs de la charge relative H^*/P .

Pour les charges relatives $H^*/P \leq 0,5$, la représentation graphique montre que l'augmentation du ratio L/W de 4 à 5 permet d'augmenter le rendement d'environ de 15% et celle du ratio L/W de 5 à 6 conduit à un accroissement du rendement environ de 10 %.

Pour les charges relatives $H^*/P \geq 0,5$, les résultats ont montré que le choix d'un ratio $L/W=5$ fait croître le rendement d'environ 17 % en comparaison au modèle qui se caractérise par un ratio $L/W = 4$. Le choix d'un ratio égale à 6 permet d'accroître la capacité d'évacuation d'environ de 10% par rapport au modèle avec un ratio $L/W = 5$.

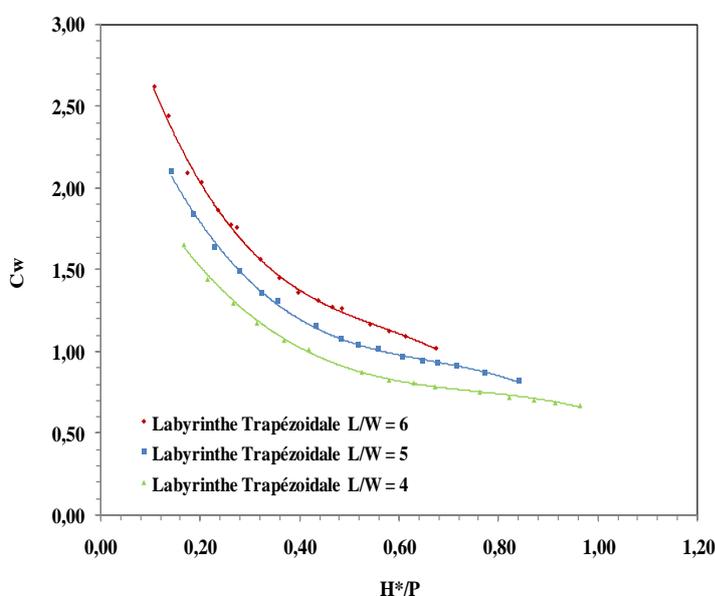


Figure II.5. L'effet du ratio de longueur de la crête L/W .

II.2.3.3 Comparaison des formes du labyrinthe rectangulaire et trapézoïdale

Les études antérieures sur le déversoir en labyrinthe sont généralement concentrées sur la forme trapézoïdale. Alors que, la forme rectangulaire n'a été que rarement l'objet d'études. Le travail de Ouamane (2013), a fait remarquer que le labyrinthe de forme rectangulaire arrondi en amont a une meilleure efficacité que la forme trapézoïdale surtout pour les charges relatives ($H^*/P < 0,5$).

Afin de vérifier l'efficacité de la forme rectangulaire par rapport à la forme trapézoïdale, une comparaison a été effectuée entre ces deux configurations pour les ratios $L/W = 4, 5$ et 6 .

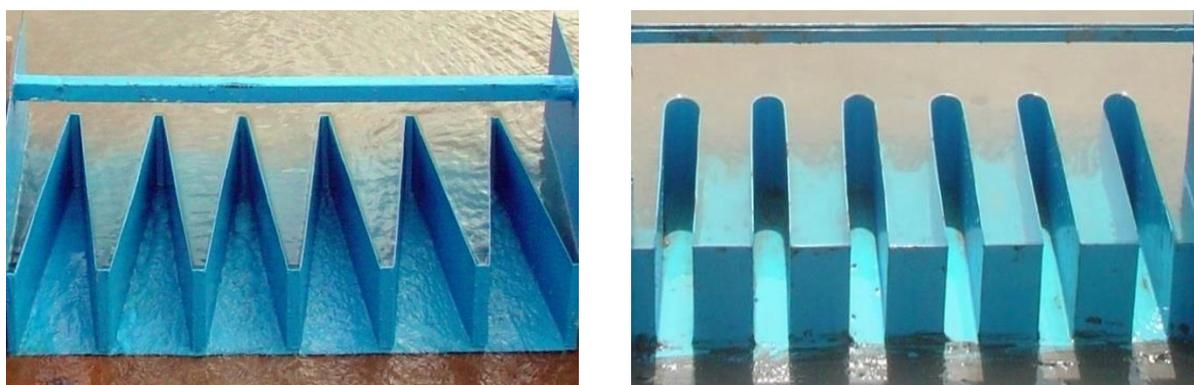


Figure II.6. Déversoir en labyrinthe (à gauche labyrinthe trapézoïdale – à droite labyrinthe rectangulaire).

Pour le ratio $L/W = 4$, la représentation graphique des courbes des coefficients de débits obtenus sur les deux configurations (Fig. II.6) montre que le modèle de déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire arrondi se caractérise par une capacité d'évacuation plus élevée que celle de type de la forme trapézoïdale en plan.

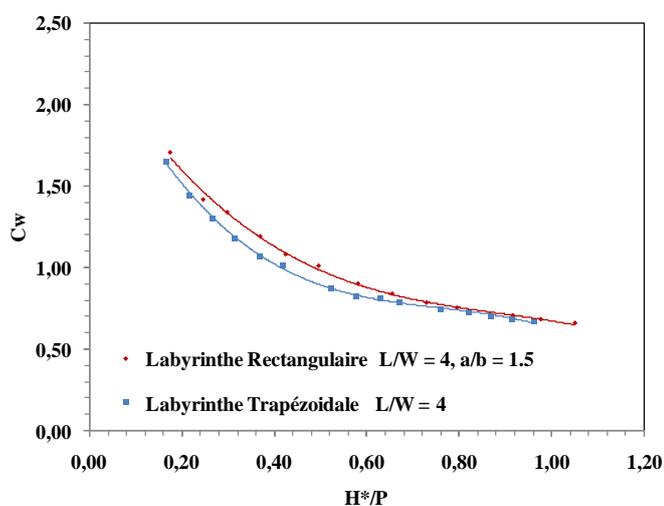


Figure II.7. Effet de la forme en plan sur le rendement du labyrinthe pour $L/W = 4$.

L'augmentation de la capacité est d'environ de 12 % pour des charges relatives H^*/P inférieures à 0.5 et de l'ordre de 5% pour des charges relatives H^*/P supérieures à 0.5 (Fig. II.7). Pour le ratio $L/W = 5$, les essais effectués sur ces deux configurations ont montré que la performance de la forme rectangulaire est supérieure à celle de la forme trapézoïdale d'environ de 5% pour les valeurs de $H^*/P < 0.5$. Au-delà de cette limite, la forme trapézoïdale montre une meilleure efficacité que la forme rectangulaire d'environ de 7%. Ceci peut être observé sur les deux courbes du coefficient de débit présentées dans la figure (II.8).

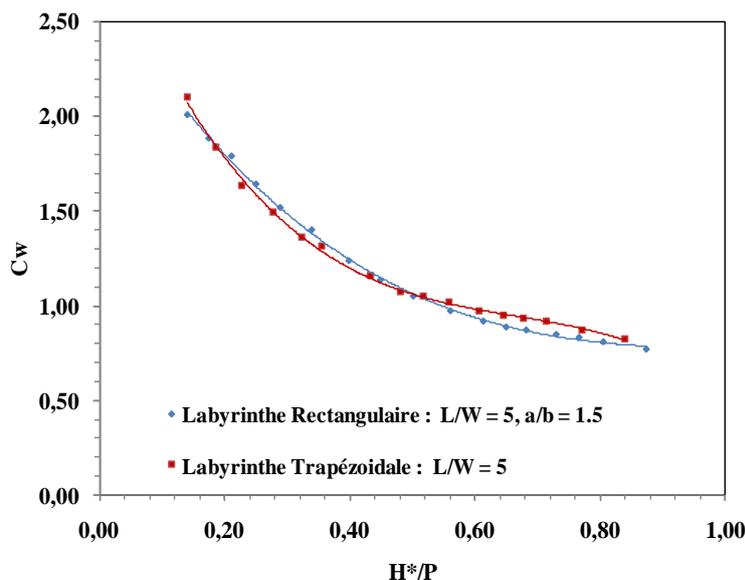


Figure II.8. Effet de la forme en plan sur le rendement du labyrinthe pour $L/W = 5$.

Pour le ratio $L/W = 6$, le résultat des essais ont montré quand le ratio atteint la valeur indiquée, le déversoir de forme trapézoïdale devient plus efficace en comparaison avec le déversoir de forme rectangulaire. Cette efficacité de la capacité d'évacuation est en moyenne de 15% pour les petites et moyennes charges et de l'ordre de 25% pour les grandes charges. Ces derniers résultats peuvent être interprétés par le rôle de la largeur des alvéoles aval. Concernant la forme rectangulaire, la largeur des alvéoles avales restent constantes quel que soit l'allongement de longueur de la crête. Alors que pour la forme trapézoïdale, la largeur des alvéoles aval augmente en fonction de l'allongement de la longueur de la crête.

Géométriquement, pour la forme trapézoïdale, l'accroissement du ratio L/W fait augmenter à la fois la longueur des parois latérales et la largeur des alvéoles d'une manière proportionnelle. Et permet ainsi de contenir un volume d'eau plus grand que celui contenu par la forme rectangulaire, ceci est important essentiellement pour les grandes charges de déversement. Par conséquent, la forme trapézoïdale donne une meilleure performance

hydraulique pour les grandes valeurs de H^*/P . Cependant, les déversoirs en labyrinthe sont conçus pour fonctionner sous des faibles charges ($H^*/P < 0.5$).

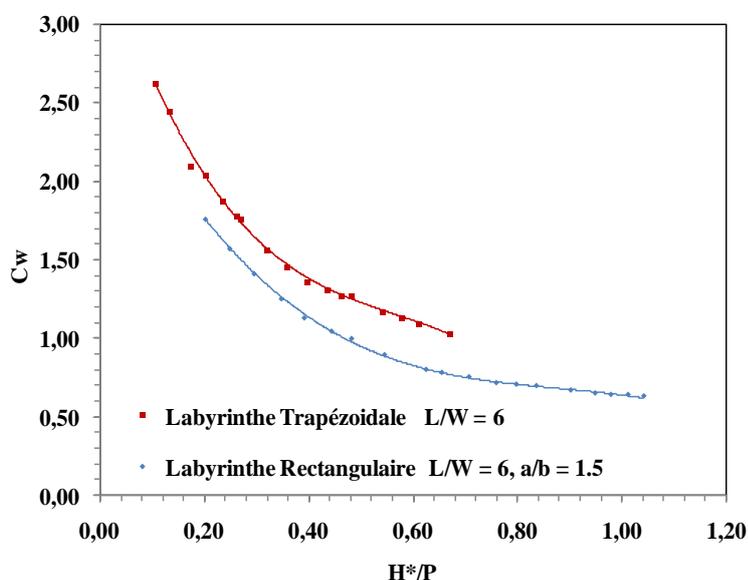


Figure II.9. Effet de la forme en plan sur le rendement du labyrinthe
Pour $L/W = 6$.

Il est à signaler aussi que la conception de la forme trapézoïdale doit tenir compte des conditions locales du site et de l'aspect économique lors de la réalisation qui semble plus élevé. Contrairement, à la forme rectangulaire qui occupe moins d'espace et qui permet de d'économiser les matériaux de construction nécessaire ce qui se répercute sur le coût de la construction.

En se basant sur ces remarques, il est peut-être plus pratique et rentable d'utiliser la forme rectangulaire, dont sa longueur B (parallèle au sens d'écoulement) est plus réduite ce qui permet aussi, de réduire les dimensions de la base du labyrinthe et permettre d'avoir une meilleure performance hydraulique avec un coût plus faible.

II.2.4 Conception de la crête en porte-à-faux

Les principales différences entre la géométrie du déversoir en labyrinthe et le déversoir en touches de piano (PKW) se résument dans la présence des porte-à-faux et l'inclinaison des radiers des alvéoles. Ces deux critères ont permis au déversoir en touches de piano d'être construit sur une base réduite et d'avoir un écoulement non perturbé en plus du meilleur rendement. Ceci incite donc à concevoir le déversoir en labyrinthe avec des porte-à-faux. En vue de voir l'intérêt des porte-à-faux trois dispositions ont été testées : symétrique, porte-à-faux en amont et porte-à-faux en aval.

L'analyse des résultats expérimentaux a montré que le modèle ayant des porte-à-faux uniquement en amont représente une variante plus efficace de point de vue rendement hydraulique que celui ont porte-à-faux symétriques. La performance du modèle avec uniquement des porte-à-faux en amont est plus grande d'environ de 15% que celle du modèle avec des porte-à-faux symétriques surtout pour les charges relatives $H^*/P < 0.5$, cependant la performance hydraulique diminue jusqu'à 2% pour les charges relatives H^*/P approximativement supérieurs à 0,5.

Par contre, l'utilisation des porte-à-faux en aval diminue la performance du labyrinthe d'une manière significative pouvant atteindre les 13% par rapport au modèle avec porte-à-faux symétriques (fig. II.10).

Puisque la partie amont de la crête du labyrinthe est alimentée essentiellement par la section d'entrée transversale, l'utilisation des porte-à-faux plus longs en amont permet d'avoir une section d'entrée plus grande qui provoque une augmentation de la capacité du déversoir.

Lors de l'expérimentation, une surélévation de la surface de l'eau à l'entrée du déversoir a été observée, cette surélévation commence à une charge relative H^*/P d'environ 0,4. Elle est plus exprimée pour le modèle sans porte-à-faux amont (fig. II.13). Cependant, pour toute la gamme des valeurs de $H^*/P > 0,4$, une surface quasi-horizontale a été uniquement remarquée sur le modèle avec seulement des porte-à-faux en amont (fig. II.12).

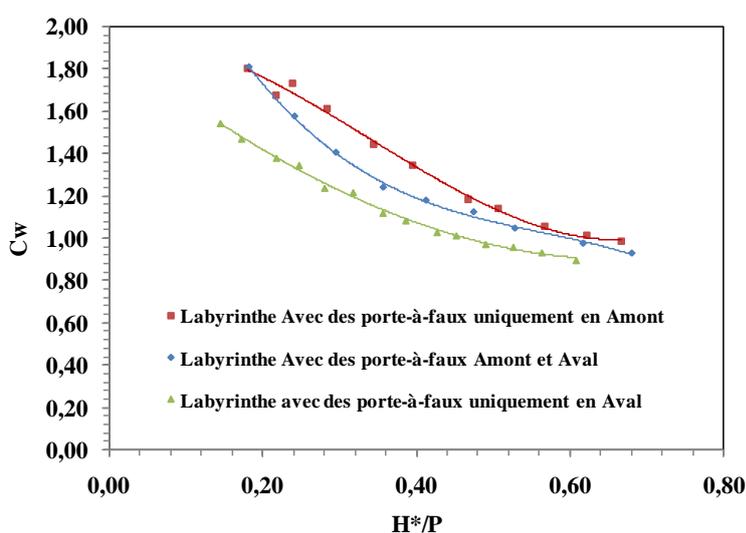


Figure II.10. L'effet de la géométrie des porte-à-faux.



Figure II.11. Ecoulement d'un labyrinthe avec des porte-à-faux amont et aval pour un débit de 165 l/s.



Figure II.12. Ecoulement d'un labyrinthe avec des porte-à-faux uniquement en amont pour un débit de 165 l/s.



Figure II.13. Ecoulement d'un labyrinthe avec des porte-à-faux uniquement en aval pour un débit de 165 l/s.

L'utilisation des porte-à-faux plus longs en amont conduit à la fois à une réduction de la longueur et à un accroissement de la pente du radier des alvéoles amont. Ceci favorise la réduction de la contraction des filets liquides de l'écoulement et engendre ainsi une réduction de la perte d'énergie et une amélioration du rendement hydraulique du déversoir en labyrinthe.

II.2.5 Impact de la forme du radier des alvéoles aval

Les déversoirs non linéaires sont caractérisés par un débit spécifique élevé ce qui rend leur utilisation plus économique en comparaison avec les déversoirs standard. Cependant, cet avantage exige parfois une hauteur plus élevée des murs quand la charge d'eau sur le déversoir est importante. Ceci demande des dépenses supplémentaires. Pour réduire le coût de la structure des hauts murs, il est possible de diminuer la hauteur de la partie libre des murs verticaux (en maintenant la hauteur du déversoir fixe) et en réduisant le volume d'acier de renforcement requis dans le béton. Ceci est réalisable par le remplissage partiel des alvéoles aval en béton ordinaire, ce qui permet de réduire la partie libre des murs tout en maintenant une hauteur suffisante des murs du déversoir.

Dans ce contexte, deux types de remplissage des alvéoles aval ont été proposés pour un modèle de déversoir en labyrinthe avec des porte-à-faux en amont, un ratio $L/W = 5$, une hauteur totale $P = 20$ cm et un nombre de cycle $n = 4$.

Le premier type de remplissage est sous forme d'un radier incliné et le second ayant une forme en marches d'escalier.

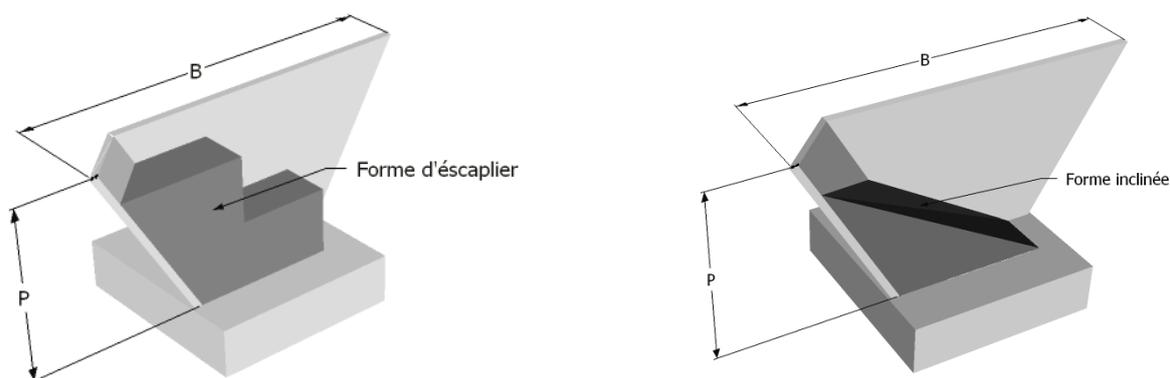


Figure II.14. Schémas des deux variantes de remplissage partiel des alvéoles aval.

Pour la forme inclinée, les résultats obtenus ont montré que le rendement hydraulique du déversoir avec et sans remplissage est en général très proche pour les charges relatives H^*/P supérieur à 0,25, cependant, pour les charges relatives inférieures à 0,25, l'efficacité du modèle avec des radiers inclinés en aval est plus élevée que le radier horizontal (sans remplissage) (fig. II. 15). Ceci peut être expliqué par le fait que le remplissage partiel des alvéoles favorise la stabilité de l'écoulement (écoulement non perturbé) ce qui se répercute sur le rendement du labyrinthe.

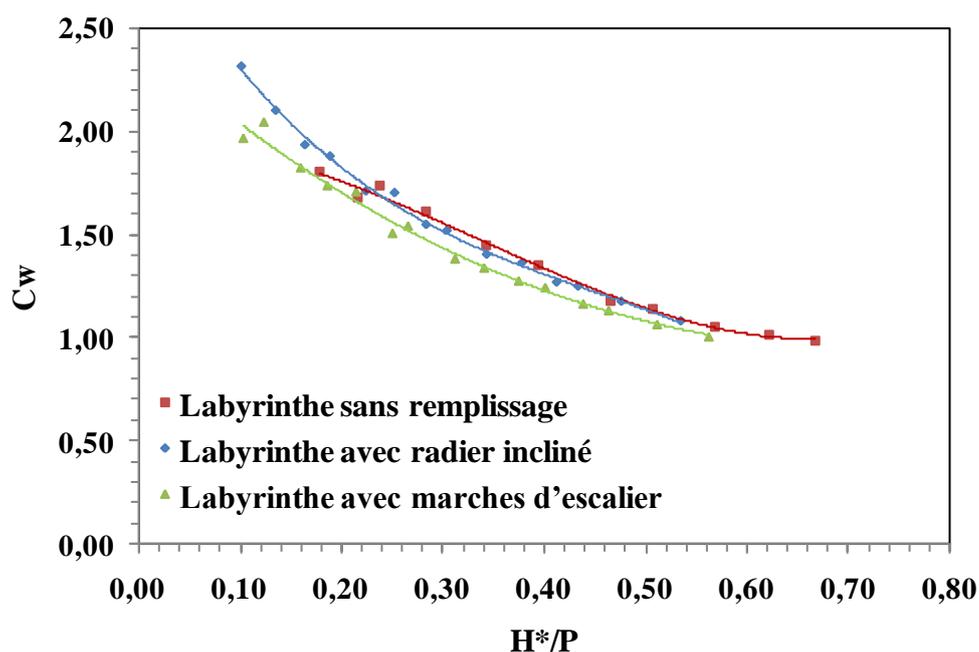


Figure II.15. Effet de la forme du radier de l'alvéole aval.

Le deuxième type de forme de radier des alvéoles aval correspond à un remplissage des alvéoles aval sous forme de marches d'escalier (deux marches de 8,5 cm de hauteur chacune). L'intérêt de cette solution est de réduire le coût de réalisation et peut également aider à la dissipation d'une fraction de l'énergie de la charge déversée.

Les résultats des essais (fig. II.15) ont montré que l'utilisation du radier aval en marches d'escalier peut affecter le rendement du déversoir en labyrinthe, ce qui se traduit par une réduction du coefficient de débit en comparaison avec les deux cas cités précédemment (réduction du coefficient de débit de l'ordre de 5 à 7% pour toute la gamme des charges relatives H^*/P). Il est à noter que la hauteur du remplissage atteint 4/5 de la hauteur des alvéoles aval pour la première marche.

II.3 Conclusion de la deuxième partie

L'étude expérimentale a eu comme objectif de vérifier l'efficacité des modifications géométriques qui ont été proposées pour améliorer le rendement du déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire en plan. Ces modifications ont concerné la forme d'entrée en amont du déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire en plan, la longueur de la base du labyrinthe et la hauteur des murs latéraux du labyrinthe.

Les résultats des essais ont montré que:

- Le meilleur rendement du labyrinthe rectangulaire est obtenu pour un rapport entre la largeur des alvéoles d'entrée et celle de sortie a/b compris dans l'intervalle 1.3 -1.5. Le choix d'une largeur de l'alvéole d'entrée égale à 1.5 fois la largeur de l'alvéole de sortie, permet d'avoir un gain de performance de l'ordre de 10% par rapport à la configuration symétrique ($a/b = 1$). Cela peut être expliqué par le rôle des alvéoles amont qui peuvent être considérées comme zone principale d'alimentation de l'alvéole aval puisque la plus grande partie de l'écoulement transite par le contour de l'alvéole amont.
- Le choix d'une forme en plan rectangulaire au lieu de celle trapézoïdale, fait accroître la performance hydraulique d'environ 12 % pour le ratio $L/W = 4$ et d'environ 5% pour le ratio $L/W = 5$ pour les charges relatives H^*/P inférieures à 0.5 qui correspondent à la gamme des charges relatives choisies en pratique.
- La conception du déversoir en labyrinthe avec des porte-à-faux permet d'augmenter la performance hydraulique jusqu'à 15% pour une gamme de charges relatives $H^*/P < 0.5$. La conception du labyrinthe avec des porte-à-faux seulement en amont paraît être la variante la plus rentable parce que la partie amont de la crête du déversoir est essentiellement alimentée par la section d'entrée transversale, l'utilisation des porte-à-faux plus longs en amont permet d'avoir une section d'entrée plus grande qui conduit à l'augmentation de la capacité du déversoir.
- Pour réduire le coût de la structure des hauts murs, il est possible de diminuer la hauteur de la partie libre des murs verticaux, cela se répercute directement sur le volume d'acier de renforcement requis dans le béton. Ceci ne peut être réalisable que par le remplissage partiel des alvéoles aval en béton ordinaire. Dans ce contexte, deux types de remplissage des alvéoles aval ont été proposés sous forme de radier incliné ou en marches d'escalier. Le premier semble être le plus rentable puisqu'il n'affecte pas la performance du labyrinthe et permet aussi un gain de matériaux de ferrailage.

Troisième Partie
Contribution à l'étude théorique

Chapitre I

Développement théorique

Chapitre I

Développement théorique

I.1 Introduction

La conception du déversoir en labyrinthe est basée principalement sur des modèles physiques en raison de sa complexité géométrique. Cependant, plusieurs méthodes ont été proposées pour évaluer théoriquement la capacité du labyrinthe et ainsi faciliter sa conception. Parmi ces méthodes on peut citer les équations proposées par Tullis (1995), qui a utilisé la méthode statistique pour déterminer le coefficient du débit du déversoir en labyrinthe de forme trapézoïdale en fonction de la charge relative H^*/P . La même méthode a été récemment reprise en (2017) par Crookston pour évaluer la capacité du débit évacué par le déversoir en touches en piano (PK-Weir) et le labyrinthe de forme rectangulaire. Malgré la simplicité de l'expression et la précision de la formule semi empirique proposée par Crookston (2017) en comparaison avec les équations de Tullis (1995), cette relation qui est en fonction de Ht/P reste incapable d'exprimer le coefficient de débit en fonction des principaux paramètres qui régissent l'écoulement sur ce type de déversoir. En outre, lorsqu'il s'agit de déterminer les dimensions préliminaires d'un déversoir en labyrinthe, le problème devient plus complexe en plus pour le calcul de ces dimensions.

Notre étude théorique propose en premier lieu une relation simple qui peut exprimer le coefficient de débit en fonction des principaux paramètres géométriques du déversoir en labyrinthe. Dans un second lieu, elle fournit aussi une relation permettant d'évaluer d'une façon explicite les premières dimensions du déversoir en labyrinthe étudié.

I.2 Développement Théorique

Le rendement du déversoir en labyrinthe est estimé par rapport à un déversoir rectiligne occupant la même largeur du canal. La formule de Poleni (1683-1761), présentée ci-dessous est habituellement utilisée pour l'évaluation de débit du déversoir rectiligne:

$$Q_R = C_R W \sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}} \quad (I.1)$$

Où :

Q_R : est le débit évacué par la crête du déversoir.

C_R : Coefficient de débit du déversoir rectiligne.

W : Largeur totale du déversoir.

H : Charge totale sur le seuil du déversoir.

Hay et Taylor (1970) ont considéré que la performance ou le rendement d'un déversoir en labyrinthe pour une géométrie donnée en plan peut être exprimé par :

$$q = \frac{Q_L}{Q_N} \quad (I.2)$$

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

Il a été constaté que ce type de déversoir fonctionne idéalement pour les faibles charges et son rendement Q_L/Q_N approche la grandeur de l'accroissement de la longueur L/W lorsque la charge H s'approche de zéro.

Pour $H \approx 0$

$$q = \frac{Q_L}{Q_N} \approx \frac{L}{W}$$

Cependant, pour les grandes charges le rendement du labyrinthe diminue pour atteindre finalement la performance du déversoir linéaire.

Considérant que le rendement du labyrinthe dépendant des paramètres géométriques présentés dans la figure (I.1), la longueur de la crête du déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire en plan peut être présentée comme suit :

$$L = 4a + 2B \quad \text{Ou} \quad L = w + 2B \quad (I.3)$$

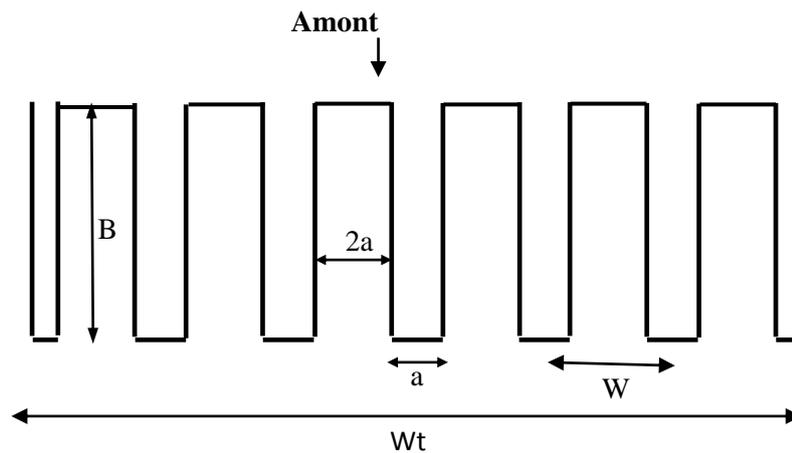


Figure I.1. Schéma du modèle de déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire.

Où :

L : est la longueur de la crête de déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire.

w : est la largeur d'un cycle de déversoir en labyrinthe.

a : la demi-longueur du sommet.

B : la longueur de la paroi latérale de la crête.

En utilisant les équations (I.1) et (I.3), la relation (I.2) devient :

$$r = \frac{Q_L}{Q_N} \approx \frac{L}{W} = \frac{w}{w} + \frac{2B}{w} \quad (\text{I.4})$$

Donc ;

$$r = 1 + \frac{2B}{w} \quad (\text{I.5})$$

Où r dans l'équation (I.5) est le rendement ou la performance présentée par Hay et Taylor (1970) par q .

L'équation (I.5) indique que le rendement r du déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire est principalement lié à la variation de longueur de crête latérale B . En effet, la longueur de crête latérale B est dépendante de la longueur totale de la crête du labyrinthe. Par conséquent, pour chaque variation des valeurs du rapport L/W correspond à une variation équivalente aux valeurs du rapport B/w . L'équation (I.5) souligne également l'importance de l'introduction du rapport B/w dans cette analyse pour formuler une solution théorique.

La figure (I.2) présente la performance du déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire en plan qui se caractérise par une entrée plate en amont, par rapport à un déversoir rectiligne occupant la même largeur du canal et la même hauteur du labyrinthe. L'utilisation de cette pertinente représentation semble être la plus convenable parce qu'elle permet de décrire le rendement hydraulique du labyrinthe en fonction de la variation géométrique de la longueur de la crête.

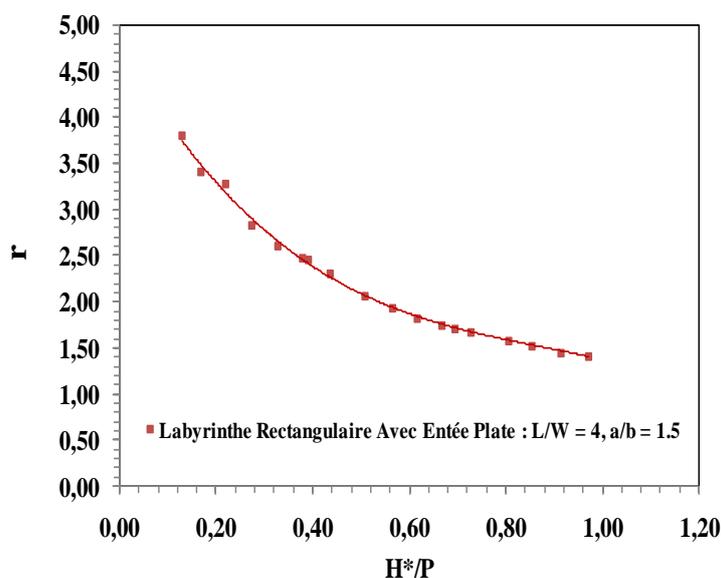


Figure I.2. Performance du labyrinthe en fonction de la charge relative ($L/W = 4$).

Appliquant la même analyse de la performance hydraulique du déversoir en labyrinthe proposée par Hay et Taylor (1970), le rendement du labyrinthe de forme rectangulaire qui se caractérise par la géométrie présentée ci-dessus (figure. I.1), peut être exprimé comme suit :

$$\text{Pour } H^*/P \approx 0 \quad r \approx 1 + \frac{2B}{w}$$

Selon la représentation graphique de la figure (I.2), le déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire se comporte d'une manière presque idéale pour les petites charges relatives H^*/P . Quand la valeur de H^*/P s'approche d'une petite valeur (dans la figure (I.2) $H^*/P \approx 0.13$), l'efficacité du modèle testé s'approche de la valeur du rapport de la longueur développée de la crête $L/W \approx 4$, qui correspond à la valeur du terme $1 + \frac{2B}{w}$.

Cependant, quand la charge atteint une grandeur égale à la hauteur du déversoir en labyrinthe P ($H^*/P \approx 1$), le rendement du labyrinthe diminue mais reste toujours supérieur à celui obtenu par le déversoir linéaire $r > 1$, comme il est indiqué dans la représentation graphique (I.2). Ceci est principalement dû à l'interférence d'écoulement latéral ce qui rend le volume du débit évacué par la crête latérale plus faible voir même négligeable qui conduit finalement à une réduction de l'efficacité de la longueur de la crête développée. Théoriquement, la valeur du terme $2B/w$ doit être égale à zéro et le rapport r peut donc s'approcher de la valeur 1.

$$\text{Pour } H^*/P \approx 1 \quad r \approx 1$$

On peut remarquer que le rendement dépend principalement de la charge relative H^*/P . Considérant cette constatation, il est donc possible d'établir une relation théorique qui permet de lier les paramètres hydrauliques et géométriques de l'écoulement évacué par le déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire.

Donc, l'équation (I.5) doit peut être modifiée en ajoutant un terme contenant la charge relative H^*/P .

Ce terme doit être égal à 1 pour une charge relative H^*/P tend vers zéro, il donne ainsi, une longueur idéale de la crête et par conséquent, un rendement d'écoulement très élevés.

Ce terme devient nul quand la charge relative H^*/P tend vers 1, il nous donne une longueur négligeable de la crête latérale qui conduit finalement à un rendement très faible égal à celui d'un déversoir linéaire.

L'équation (I.5) peut être donc réécrite comme suit :

$$r = 1 + \frac{2B}{w}(1 - H^*/P) \quad (I.6)$$

Où : H^*/P est la charge relative.

Donc, l'équation (I.6) représente une expression mathématique qui permet de présenter toutes les précédentes constatations qui concernent le comportement du déversoir en labyrinthe et en particulier les points extrêmes du fonctionnement $H^*/P \approx 0$ et $H^*/P \approx 1$.

Le terme qui a été introduit $(1 - H^*/P)$ dans l'équation (I.6) permet de conclure que, pour les petites valeurs de la charge relative ($H^*/P \approx 0$), le rapport r atteint sa valeur maximale. Cependant, pour les grandes charges relatives ($H^*/P \approx 1$) le rendement r doit être égal à 1, ce qui correspond théoriquement à l'efficacité du déversoir linéaire.

Cependant, les résultats expérimentaux des essais effectués sur le déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire arrondie en amont ont montré que la variation des valeurs du rendement r de ce type de déversoir n'est pas une fonction linéaire comme elle est présentée dans l'équation (I.6). Par conséquent, l'équation (5) doit s'écrire comme suit:

$$r = 1 + \frac{2B}{w} (1 - H^*/P)^3 \quad (I.7)$$

L'insertion de la puissance de troisième degré dans l'équation (I.7), permet d'obtenir une relation pratique proche de la variation réelle du rendement r . Cette valeur a montré un bon ajustement avec les résultats expérimentaux obtenus dans cette étude. Cependant, cette équation (I.7) ne considère pas les effets de quelques paramètres tels que : la largeur des alvéoles a/b , la forme de l'entrée et les conditions d'approches, ...etc.

Pour tenir compte de l'influence des paramètres restants, deux coefficients empiriques \mathcal{E} et β ont été introduits dans l'équation (I.7) qui devient :

$$r = \mathcal{E} + \frac{2B}{w} (\beta - H^*/P)^3 \quad (I.8)$$

Où : \mathcal{E} et β , des coefficients empiriques.

Les valeurs des coefficients \mathcal{E} et β pourraient être calculées, pour chaque modèle du déversoir en labyrinthe par l'application de l'équation (I.8) aux valeurs extrêmes de H^*/P proches de 0 et 1.

Pour calculer la valeur de \mathcal{E} , on suppose dans un premier temps que l'apport de la longueur latérale B dans l'écoulement est négligeable, par conséquent la longueur B peut être considérée comme nulle. Ce qui signifie que pour $H \approx P$ on a :

$$\frac{2B}{w} (\beta - H^*/P)^3 \approx 0 \quad (I.9)$$

Donc, le rendement peut être égal : $r \approx \mathcal{E}$

Dans ces conditions, la valeur de \mathcal{E} est égale à la valeur expérimentale du rendement r du déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire.

Dans un second temps, pour déterminer la valeur de coefficient empirique β , on suppose que le déversoir en labyrinthe fonctionne idéalement. Donc, il suffit d'introduire la valeur du coefficient empirique \mathcal{E} qui est précédemment calculé plus la valeur expérimentale de r qui correspond à la valeur minimale de la charge relative Ht/P dans la série des données de chaque modèle réduit testé, dans l'équation du rendement (I.8). Pour cette étude, les valeurs de la charge relative considérées sont comprises entre $0.13 \leq H^*/P \leq 1$. En tenant compte de ces conditions, la valeur du coefficient empirique β peut être calculée par la relation suivante :

Pour $H^*/P \approx 0$

$$\beta \approx \sqrt[3]{\frac{(r-\mathcal{E})w}{2B}} + \frac{H^*}{P} \quad (\text{I.10})$$

Il est à noter qu'il est pratiquement difficile d'estimer les valeurs exactes des coefficients empiriques \mathcal{E} et β donc, il est possible d'introduire quelques modifications sur les valeurs semi-théoriques obtenues. Les ajustements effectués sur les valeurs théorique sont permis d'avoir une précision acceptable qui est généralement de l'ordre de 3 %.

I.3 Méthode de la conception préliminaire

Actuellement, les méthodes utilisées pour la conception du déversoir en labyrinthe sont des méthodes implicites basées principalement sur les courbes issues des essais expérimentaux concernant la capacité de l'évacuation du déversoir en labyrinthe. Malgré le nombre important des méthodes et des relations développées pour estimer la capacité du déversoir en labyrinthe, jusqu'à présent il n'y a pas de relation analytique qui lie les caractéristiques du modèle réduit et les conditions du projet à réaliser.

Les caractéristiques des modèles considérés dans cette étude sont les paramètres présentés dans l'équation semi-théorique (I.8) du rendement r tels que la longueur latérale de la crête B , la largeur d'un cycle w et aussi les coefficients empiriques \mathcal{E} et β qui représentent l'influence des autres paramètres non inclus dans cette équation. Concernant les conditions du projet, les dimensions du prototype sont : le débit qui doit être assuré Q , la largeur totale du déversoir

exigée W et la charge de dimensionnement Ht . Il est important de noter que les valeurs de ces derniers paramètres sont généralement considérées comme des données.

Dans la continuité de cette étude de recherche, l'équation (I.8) proposée précédemment est introduite dans l'équation de calcul de débit pour un déversoir linéaire afin de proposer une relation simple à appliquer, qui permet de déterminer les premières dimensions du prototype d'une manière directe.

La combinaison des deux équations, l'équation du rendement du labyrinthe rectangulaire (I.8) et l'équation du débit du déversoir linéaire de *Poleni*, a permis donner la formule suivante :

$$P = \left[\beta - \left(\frac{Qw}{2BC_RWH\sqrt{2gH}} - \frac{\varepsilon w}{2B} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} H \quad (\text{I.11})$$

Où :

P : est la hauteur calculée du prototype (m)

Q : est le débit à évacuer (m^3/s)

W : est la largeur totale du déversoir (m)

w : est la largeur d'un cycle de déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire.

B : est la longueur latérale de la crête.

H : est la charge sur la crête du labyrinthe.

C_R : est le coefficient de débit de déversoir rectiligne.

g : est l'accélération de la pesanteur (m/s^2).

ε et β : sont des coefficients empiriques.

L'expression de l'équation (I.8) pour le calcul du rendement r a permis le développement d'une relation explicite pour calculer la hauteur P du prototype. Cette relation, qui prend notamment en compte les caractéristiques des modèles testés et les conditions du projet (paramètres généralement connus), permet de déterminer la hauteur nécessaire à la conception du déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire en plan. En outre, les valeurs restantes des dimensions du prototype, tels que la largeur du cycle w et le nombre de cycles n , sont directement calculés si l'on considère que leurs valeurs dépendent de la valeur de la hauteur du prototype P . (a, b, r, t, \dots)

I.4 Conclusion

Ce chapitre a pour objectif d'élaborer des formules semi-analytiques pour le calcul du rendement du déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire en plan. Pour cela, il est nécessaire de partager cette analyse semi-théorique en deux phases. Dans la première étape,

une relation approchée a été formulée pour estimer le rendement du déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire en plan. La particularité de cette relation réside dans son caractère pratique, elle permet, en fait, l'évaluation de la capacité de l'évacuation lorsque les caractéristiques du modèle réduit sont connus. Dans la deuxième étape, l'équation du rendement r a été insérée dans l'équation du calcul de débit du déversoir linéaire pour en déduire la valeur de la hauteur du prototype P .

Chapitre II

Application et Discussion

Chapitre II

Comparaison et Discussion

II.1 Introduction

L'objectif principal de ce chapitre est de vérifier la validité de la relation semi-empirique du rendement du déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire en plan qui a été présenté dans le chapitre précédent. Pour ce faire, une comparaison doit être effectuée entre les valeurs obtenues par l'application de cette relation et celles obtenues expérimentalement. Cette vérification concerne tous les résultats des essais qui ont été réalisés sur les déversoirs en labyrinthe de formes : rectangulaire en plan, trapézoïdale et aussi sur les labyrinthes en porte-à-faux en amont et en aval, porte-à-faux uniquement en amont et porte-à-faux uniquement en aval. Cette formule semi-empirique a été également utilisée pour évaluer son applicabilité dans des conditions d'approche avec contraction notamment sur un déversoir en labyrinthe rectangulaire et déversoir en touches de piano «PK-Weir type A ». Comme il est indiqué au chapitre précédent, l'application de cette formule semi-empirique ne demande que l'introduction des valeurs géométriques de la longueur latérale B , la largeur du cycle w et les valeurs des coefficients empiriques \mathcal{E} et β caractérisant chaque modèle. Après l'ajustement de la formule en question, les résultats des comparaisons sont graphiquement représentés ci-dessous pour chaque modèle de déversoir.

II.2 Application et comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux

Cette partie de l'étude vise la vérification et la comparaison les valeurs calculées à l'aide de la formule semi-empirique du rendement r et les valeurs expérimentales obtenues du rendement du labyrinthe pour l'ensemble des modèles testés. La comparaison entre l'efficacité analytique calculée avec l'équation (I.8) et les résultats expérimentaux, est représentée graphiquement pour chaque modèle du déversoir. Cette opération a montré que les valeurs de rendement r trouvées par la formule (I.8) sont très proches de celles obtenues expérimentalement avec une erreur maximale d'environ de 5%.L'application de la formule semi-empirique a été effectuée sur les résultats expérimentaux du rendement r des modèles testés. Le rendement expérimental r représente, la performance du déversoir en labyrinthe qui peut être exprimé par le rapport entre le débit évacué par le labyrinthe et celui évacué par le déversoir rectiligne.

$$r = \frac{Q_L}{Q_R} \quad (\text{II.1})$$

Où :

Q_L : le débit qui transite sur un déversoir en labyrinthe.

L : la longueur de crête

Ht : la charge totale

Q_R : le débit qui passe sur un déversoir rectiligne.

W : la largeur commune du labyrinthe et le déversoir rectiligne.

Ht : sous la même charge.

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

$$Q_R = C_R W \sqrt{2g} H_T^{\frac{3}{2}} \quad (\text{II.2})$$

Où :

W : Largeur du déversoir ($L=W$) (m)

H_T : Charge totale sur le déversoir (m)

C_R : Coefficient de débit d'un déversoir rectiligne

Pour ce cas, le coefficient du débit du déversoir rectiligne C_R a été calculé à partir de la formule de *Rehbock* qui est universellement acceptée.

$$C_R = \frac{2}{3} \left(0.605 + 0.08 \frac{h}{P} + \frac{1}{1000h} \right) \quad (\text{II.3})$$

Où :

h : est la hauteur d'eau en amont (m).

P : la hauteur du déversoir (m).

D'une autre part, les valeurs du rendement théorique du labyrinthe r , ont été déterminées par l'utilisation de l'équation semi-empirique (I.7) développée dans le chapitre précédent.

$$r = 1 + \frac{2B}{w} (1 - Ht/P)^3$$

Afin de vérifier la validité de cette relation, il est peut être nécessaire d'appliquer et de présenter en premier temps la relation (I.4) sans ajustement.

A cette effet, la relation (I.4) a été appliquée sur un déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire en plan qui se caractérise par une forme d'entrée plate, un ratio $L/W = 4$ et un rapport $a/b = 1.5$.

La comparaison entre les valeurs expérimentales du rendement r et les valeurs théoriques, est représentée graphiquement dans la figure (II.1).

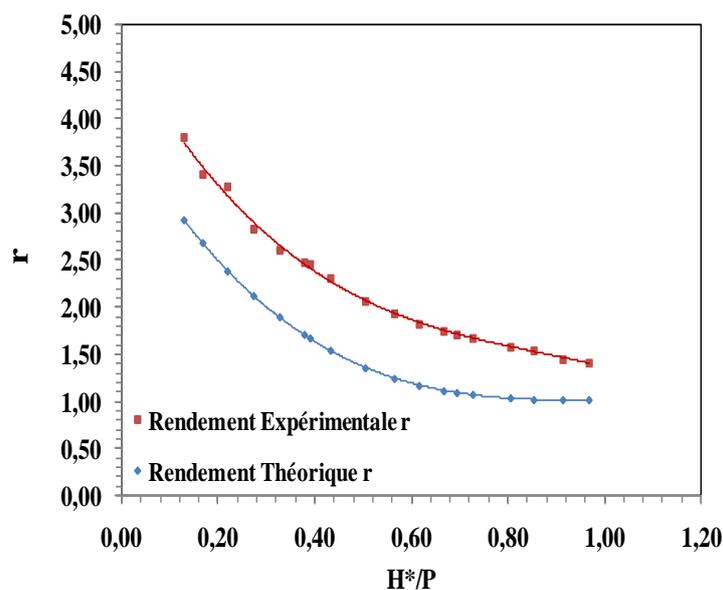


Figure II.1. Comparaison entre les valeurs du rendement expérimental et théorique.

Malgré l'important écart qui sépare les deux courbes, la représentation graphique a montré que l'utilisation de la relation semi-empirique (I.4) a permis de donner une courbe ayant une forme générale similaire à celle expérimentalement obtenue.

On peut aussi observer, sur la figure (II.1), que la courbe des valeurs expérimentales se situe au-dessus de la courbe théorique. Ceci semble logique, parce que jusqu'à la valeur de la charge relative $H^*/P = 1$, la crête latérale demeure toujours efficace. Et selon les résultats expérimentaux $r = 1.4$, l'efficacité du déversoir en labyrinthe reste toujours supérieure à celle de déversoir linéaire.

Donc, il est nécessaire d'ajuster l'équation (I.4) pour réduire l'écart entre les deux courbes.

A cet effet, deux coefficients empiriques ε et β ont été proposés. Cet ajustement est basé sur les deux valeurs extrêmes des couples $(r$ et $H^*/P)$ expérimentalement obtenues. Comme il a été expliqué au chapitre I : il est nécessaire de déterminer en premier temps la valeur du coefficient empirique ε en suite on doit déterminer la valeur du β :

$$r = \varepsilon + \frac{2B}{w} (\beta - H_T/P)^3$$

Supposant que la valeur de $H_T/P \approx 1$

Donc le coefficient $\varepsilon = r$

Selon les résultats obtenues de ce modèle, la valeur de coefficient empirique doit être égale à $\varepsilon \approx 1.48$.

Pour calculer la valeur de β , il suffit d'introduit la valeur de ε , w , B et la valeur expérimentale de r qui correspond à la valeur minimale H_T/P , pour ce cas $r \approx 3.8$, dans l'équation suivante :

$$\beta \approx \sqrt[3]{\frac{(r-\varepsilon)w}{2B}} + \frac{H_T}{P} \approx \sqrt[3]{\frac{(3.8-1.48)15}{2(21.5)}} + 0.13 \approx 1.06$$

Donc, l'équation de calcul du rendement pour un modèle de labyrinthe qui se caractérise par une forme d'entrée plate, un ratio $L/W = 4$ et un ratio de $a/b = 1.5$ devient comme suit :

$$r = 1.48 + \frac{2B}{w} (1.06 - H_T/P)^3 \quad (\text{II.4})$$

Il est à noter, qu'il est nécessaire dans certains cas d'effectuer une légère correction sur la valeur calculée du coefficient de débit ε et β pour avoir des valeurs très proches de celles obtenues expérimentalement.

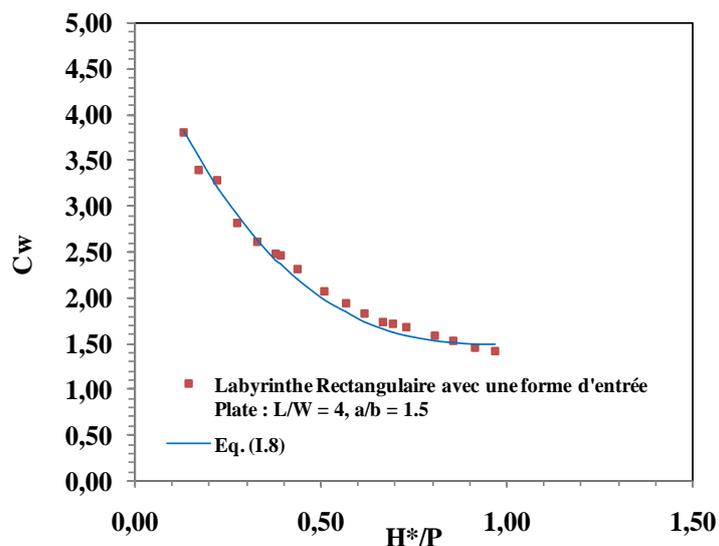


Figure II.2. Comparaison entre les valeurs du rendement expérimental et théorique.

L'ajustement de la formule semi-empirique a permis de déterminer avec une importante précision le rendement du débit r . L'application de la relation (I.8) au déversoir en labyrinthe expérimenté a été représentée graphiquement dans la figure (II.1).

La représentation graphique des résultats obtenus exprimant le rendement du labyrinthe en fonction de la charge relative, montre que les deux courbes obtenues sont semblables. Le rendement r du labyrinthe peut être exprimé par la relation (I.8) qui est simple et facile à utiliser, l'application de la relation (I.8) donne des valeurs proches aux valeurs expérimentales à une erreur maximale entre 2 et 5% et d'une d'environ de 1.5 % en moyenne par rapport à la valeur réelles. Ces valeurs peuvent être récapitulées dans le tableau suivant :

Rendement Expérimentale r	Rendement Théorique r	Erreur relative %
3,80	3,83	-0,824
3,40	3,55	-4,408
3,28	3,21	2,071
2,82	2,90	-2,750
2,61	2,63	-0,834
2,47	2,40	2,774
2,45	2,36	3,742
2,30	2,20	4,692
2,06	1,97	4,340
1,93	1,83	5,182
1,82	1,74	4,821
1,74	1,66	4,613
1,71	1,62	4,839
1,67	1,59	5,133
1,57	1,53	2,734
1,52	1,51	1,227
1,45	1,49	-2,881
1,40	1,48	-5,583

Tableau II.1 : Valeurs expérimentales et théoriques du rendement r calculé selon l'équation (I.8).

II.2.1 Impact de la forme d'entrée du labyrinthe

La détermination du rendement hydraulique du labyrinthe rectangulaire en plan avec une forme d'entrée arrondie en amont, par l'utilisation de l'équation (II.4) sans l'adaptation de ses coefficients empiriques \mathcal{E} et β a conduit à des valeurs de rendement théorique d'un écart maximal de 11 % (figure. II.3). Cet écart nécessite une adaptation des valeurs des coefficients empiriques en vue de donner des valeurs plus proche que celles obtenues expérimentalement. Pour estimer les valeurs de \mathcal{E} et β , il suffit de suivre la méthode présentée ci-dessus. Donc, les valeurs des coefficients empiriques doivent être comme suit :

$$\mathcal{E} \approx 1.507 \text{ et } \beta \approx 1.106$$

Par la suite, la relation (I.8) devient :

$$r = 1.507 + \frac{2B}{w} (1.106 - H_T/P)^3 \quad (\text{II.5})$$

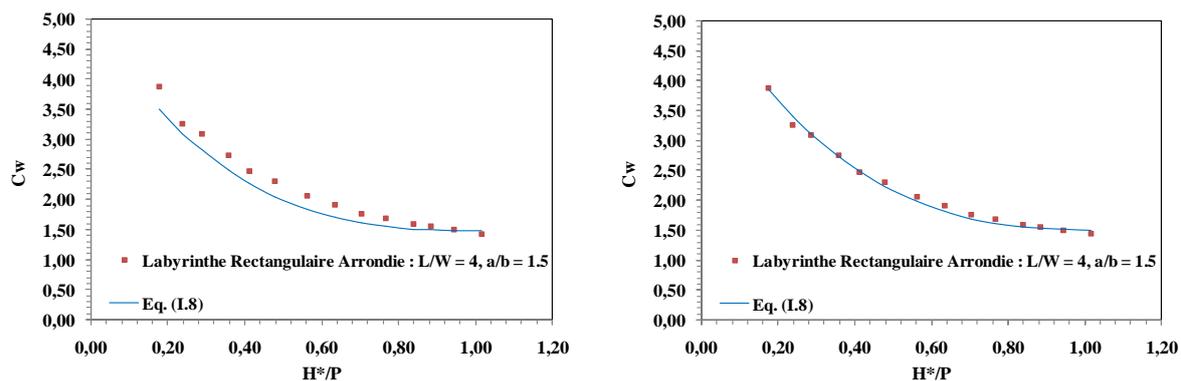


Figure II.3. Comparaison entre les valeurs du rendement expérimental et théorique. Avant l'adaptation (Gauche) et après l'adaptation (Droite).

L'application de cette dernière relation (II.5), sur les résultats expérimentaux du modèle de déversoir en labyrinthe ayant les mêmes caractéristiques ($L/W = 4$ et $a/b = 1.5$), et une forme d'entrée différente, a permis de réduire la différence d'environ de 4% entre les valeurs obtenues théoriquement et celles obtenues expérimentalement (figure II.3).

La comparaison entre les deux valeurs des coefficients empiriques β , pour le déversoir en labyrinthe de forme plate et celles de la forme arrondie, montre que l'augmentation est d'environ de 4%. Ce qui signifie que la forme arrondie en amont a permis d'augmenter davantage la contribution de la crête latérale du déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire en plan.

II.3 Méthode de conception préliminaire

Malgré les nombreuses travaux de recherche effectués à ce jour, la conception du déversoir non linéaire tels que le labyrinthe et le PK-Weir, reste un défi important dans la pratique. Jusqu'à présent, la conception de ce type de déversoir est principalement réalisée à l'aide des graphiques qui donnent les valeurs expérimentales du coefficient de débit en fonction de la charge relative H^*/P . Comme il n'existe aucune méthode explicite qui permet de déterminer d'une manière simple les dimensions nécessaires pour concevoir une géométrie initiale, une relation a été proposée pour estimer les premières dimensions du labyrinthe et/ou de déversoir en touche de piano (P.K.W). Cette relation semi-empirique reliant les caractéristiques du modèle réduit et les conditions du projet, permet en première étape de prédéterminer la hauteur du prototype. Les valeurs restantes des dimensions du prototype, telles que : la largeur du cycle w et le nombre de cycles n , sont calculer en deuxième étape, à condition de considérer que les valeurs des démentions restantes dépendent de la valeur de la hauteur du prototype P . L'expression de la formule de calcul du rendement a permis d'aboutir à une formulation mathématique de la dimension recherchée P qui est applicable à toutes les

configurations présentées ci-dessus. Ceci a été rendu possible par la combinaison des relations de la formule semi-empirique (I.8) et de la formule de Poleni. Donc, il suffit d'introduire dans la présente formule, les caractéristiques des modèles réduits optimisés existants et les conditions du site exigées, pour déterminer les dimensions nécessaires dans la conception des modèles du projet. Les éléments du projet sont les spécificités hydrauliques et géométriques (*le débit Q , la hauteur maximale H et la largeur disponible W*) et les caractéristiques du modèle réduit (*les dimensions géométriques tels que la largeur w , la longueur latérale B et les valeurs des coefficients empiriques \mathcal{E} et β issus des tests expérimentaux*). Cependant, la conception finale se définit en fonction de l'intérêt de l'ingénieur du projet (*augmentation du niveau de sécurité, accroissement de la capacité du réservoir, réduction des dimensions de la structure ...*).

Le calcul de la hauteur de prototype d'un déversoir en labyrinthe ou en touches de piano PK-Weir nécessite la combinaison de :

- l'équation de Poleni (1683-1761) :

$$Q_R = C_R W \sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}}$$

- l'équation du rendement :

$$r = \frac{Q_L}{Q_N}$$

$$r = \mathcal{E} + \frac{2B}{w} (\beta - H/P)^3$$

Donc, la relation de la hauteur du prototype s'écrit :

$$P = \left[\beta - \left(\frac{Qw}{2BC_RWH\sqrt{2gH}} - \frac{\mathcal{E}w}{2B} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} H \quad (\text{II.6})$$

Où :

P : est la hauteur calculée du prototype (m)

Q : est le débit à évacuer (m³/s)

W : est la largeur totale du déversoir (m)

w : est la largeur d'un cycle de déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire.

B : est la longueur latérale de la crête.

Ht : est la charge sur la crête de labyrinthe.

C_R : est le coefficient de débit de déversoir rectiligne.

g : est l'accélération de la pesanteur (m/s²).

II.3.1 Exemple d'application

Afin d'expliquer la méthode de la conception préliminaire du déversoir en labyrinthe, on propose l'exemple d'application suivant.

On considère un projet de barrage avec les conditions suivantes : un débit de 500 m³/s à évacuer sur la crête du déversoir en labyrinthe sous une charge H= 2 m et pour une largeur totale égale à 30 m.

En première étape, il est nécessaire de choisir un modèle ayant une bonne performance hydraulique. Et selon les résultats obtenues de ce travail sur le déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire, le modèle qui a donné un meilleur rendement parmi les modèles testés et ayant des dimensions relativement réduites en comparaisons avec d'autres modèles, se caractérise par :

$$L/W = 5$$

$$a/b = 1$$

$$B = 34.5$$

$$w = 15$$

$$\mathcal{E} = 1.73$$

$$\beta = 1.027$$

L'équation ajustée qui exprime le rendement de ce modèle est :

$$r = 1.73 + \frac{2B}{w} (1.027 - H_T/P)^3$$

$$P = \left[\beta - \left(\frac{Qw}{2BC_RWH\sqrt{2gH}} - \frac{\mathcal{E}w}{2B} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} H$$

$$P = \left[1.027 - \left(\frac{500 \times 15}{2 \times 31.5 \times 0.44 \times 30 \times 2\sqrt{2 \times 9.81 \times 2}} - \frac{1.73 \times 15}{2 \times 31.5} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} \times 2$$

$$P = 5.786 \approx 5.8 \text{ m}$$

Le nombre des unités $n = \frac{W}{w}$ Ou nous avons $\frac{w}{P} = 1$ ou $w = P$

Donc,
$$n = \frac{30}{5.8} = 5.27$$

Pour simplifier le dimensionnement du modèle, il est proposé de prendre une valeur de nombre d'unités égale à 6, donc il est nécessaire de réévaluer le coefficient du débit et ainsi le débit correspondra à ce nombre d'unités :

Pour $n = 5$ donc la hauteur du modèle P doit être égale à 6, pour cette valeur :

$$r = 1.73 + \frac{2(31.5)}{15} (1.027 - 2/5)^3$$

Le rendement du labyrinthe pour une hauteur égale à 6 m, est égal à 3.131 et le débit évacué par le labyrinthe pour cette valeur de coefficient de débit peut être estimé comme suit :

$$Q_L = r C_R W \sqrt{2gH^2}^3$$

$$Q_L = 3.131 \times 0.44 \times 30 \times \sqrt{2 \times 9.81} \times (2)^{\frac{3}{2}}$$

Donc, $Q_L = 517.79 \text{ m}^3/\text{s}$

Le résultat calculé du rendement du modèle du déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire en plan et arrondie en amont qui se caractérise par un ratio $L/W = 5$ et de ratio $a/b = 1.5$ montre que la conception d'un modèle de labyrinthe avec une hauteur de 6 m et un nombre d'unités de 5, permet d'avoir un débit de $517.79 \text{ m}^3/\text{s}$ qui semble suffisamment grand pour répondre aux conditions exigées, et par conséquent, il permet de faire passer le débit demandé sous une charge exigées de 2 m et à travers une largeur du déversoir limitée à 30 m.

II.4 Conclusion de la troisième partie

Dans cette partie de ce travail, une contribution au développement théorique a été proposée. Dans un premier temps, elle propose une relation simple qui permet de calculer le coefficient de débit en fonction des principaux paramètres géométriques du déversoir en labyrinthe. Dans un second temps, elle fournit une relation permettant d'évaluer d'une façon explicite les dimensions préliminaires qui entrent dans la conception d'un déversoir en labyrinthe.

Afin d'atteindre cet objectif, la formule de calcul de débit d'un déversoir rectiligne de Poleni et l'équation qui exprime la performance ou le rendement d'un déversoir en labyrinthe ont été utilisées. D'une part, pour formuler une relation du rendement du labyrinthe de forme rectangulaire en plan et arrondie en amont en fonction des principaux paramètres géométriques qui affectent son efficacité. D'autre part, la considération de Taylor a été exploitée pour formuler une relation théorique simple du rendement du labyrinthe. Cette

formule permet d'exprimer le rendement du déversoir en labyrinthe en fonction des paramètres géométriques en connaissant, la longueur de la crête latérale B , la largeur de cycle w et la hauteur de déversoir P en plus du paramètre hydraulique H . L'application de la formule semi-empirique sur de différentes configurations du labyrinthe de forme rectangulaire en plan (de forme d'entrée plate et arrondie, labyrinthe trapézoïdale, labyrinthe en porte-à-faux amont et aval, uniquement en amont et uniquement en aval) a montré sa fiabilité puisque les écarts entre les valeurs théoriques et les valeurs expérimentales sont en moyenne inférieures à 2%.

Grace à l'expression simple de la relation du rendement, une deuxième relation a été proposée pour faciliter le calcul des dimensions du prototype de déversoir en labyrinthe.

Cette dernière relation, qui relie les caractéristiques du modèle avec des conditions du projet, est le résultat d'une combinaison entre la formule développée pour le calcul du rendement et celle de Poleni. Les éléments du projet sont les spécificités hydrauliques et géométriques de site (*débit Q , hauteur maximale H et largeur disponible W*) en plus des caractéristiques du modèle (*les dimensions géométriques tels que la largeur w et la longueur latérale B et les valeurs des coefficients empiriques \mathcal{E} et β issus des tests expérimentaux*).

Finalement, un exemple pratique a été présenté pour expliquer la méthode de calcul des dimensions du déversoir en labyrinthe pour la conception d'une géométrie initiale de modèle de projet. Cet exemple d'application a montré la simplicité de l'utilisation de l'équation (I.14) pour le pré-dimensionnement ce type de déversoir. Il est important de noter, que l'objectif de cette méthode de conception est de limiter les études expérimentales et de se rapprocher le mieux possible de la géométrie du modèle de projet final. Donc, cette méthode de pré-dimensionnement ne donne que des valeurs approximatives des dimensions du modèle, ce qui signifie que d'autres tests sur des modèles réduits restent nécessaires pour déterminer les valeurs exactes de ces dimensions.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal du présent travail consiste à améliorer la performance du déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire en plan et de proposer une approche de pré-dimensionnement de ce dernier.

Pour mener à bien ce travail, trois parties ont été élaborées : la première cible la bibliographie, la seconde, l'investigation expérimentale et la troisième est consacrée à l'étude d'analyse théorique et statistique des résultats expérimentaux pour l'aboutissement à une approche de pré-dimensionnement du labyrinthe de forme rectangulaire en plan.

L'étude bibliographique a permis de donner un état de connaissances sur les déversoirs à écoulement libre en alignement rectiligne et non rectiligne.

Au cours de cette partie, différents types de déversoirs rectilignes ont été exposés ; tels que : le déversoir rectiligne à paroi mince (à crête perpendiculaire ou latérale au sens de l'écoulement), le déversoir standard et le déversoir à seuil épais. Cependant, une attention particulière a été accordée aux déversoirs non-rectilignes, notamment le déversoir en labyrinthe, les dispositifs fusibles et le déversoir en touche de piano (PK-Weir) en raison de leur intérêt hydraulique et économique par rapport au déversoir rectiligne.

La crête non rectiligne caractérisant ce type de déversoir permet le passage d'un débit trois fois plus grand que celui d'une crête rectiligne occupant la même largeur du canal et sous la même charge de déversement.

Les paramètres les plus importants pour déterminer la capacité d'un déversoir linéaire sont la hauteur, la forme de la crête, et la longueur de la crête (Falvey et al.1995).Cependant, la capacité des déversoirs en labyrinthe dépend de plusieurs paramètres géométriques qui rendent difficile la résolution du problème par voie mathématique directe Lux III et al. (1985). Plusieurs études ont été réalisées pour identifier les paramètres géométriques qui affectent la performance du déversoir en labyrinthe. La première étude consacrée à l'impact des différents paramètres sur la performance du déversoir en labyrinthe se rapporte aux travaux réalisés par Hay et Taylor (1970). Alors qu'en 1985, Lux et Hinchliff étaient les premiers à proposer une approche semi-théorique basée sur l'expérimentation sur modèles physique et l'analyse dimensionnelle. Dans cette approche, l'expression de l'équation du déversoir rectiligne a été proposée pour calculer le débit du labyrinthe. Le coefficient de ce débit a été déterminé en fonction des paramètres adimensionnels qui régissent l'écoulement sur le déversoir en labyrinthe.

Tullis et al. (1995), ont utilisé la méthode statistique pour exprimer le coefficient de débit en fonction de la charge relative H_T/P . Cette méthode a permis de développer une série d'équations, où chaque une d'elles correspond à l'angle formé entre le sens de l'écoulement et la paroi latérale. Dans le même sens, plusieurs relations théoriques utilisant la méthode statistique ont été proposées pour estimer le coefficient du débit d'une manière théorique, citant comme exemple les formules de : Emirogluet all(2010),Kabiri-Samaniet al.(2012) et B.M. Crookston &al. (2017).

Le déversoir en touches de piano (PK-Weir) est une nouvelle forme de déversoir en labyrinthe développée par A. Ouamane et F. Lempérière (2003), il se caractérise par une efficacité hydraulique plus élevée et un coût de construction relativement faible par rapport à un déversoir rectiligne. Le PK-Weir a l'avantage d'être appliqué sur la crête barrages en terre et sur des sections réduites de barrages poids existants ou nouveaux. Aujourd'hui, l'utilisation de ce type de déversoir est largement répandue dans plusieurs pays. Comparé au déversoir en labyrinthe, le PK-Weir a fait l'objet de travaux de recherches intensives et approfondies pour développer des relations théoriques permettant une pré-évaluation de la performance et le coefficient du débit. Nous citons : la relation de Leite Ribeiro et al. (2012), Kabiri-Samani et Javaheri (2012), Machiels et al. (2014, 2015) et Crookston & al. (2017), ces relations ne donnent qu'une première estimation et ne peuvent pas être généralisées. Parmi les principales conclusions que nous avons tirées de cette étude est : que le déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire en plan n'a été étudié et appliqué que dans quelques cas.

Il est conclu que la méthode de dimensionnement du labyrinthe et du PK-Weir reste toujours compliquée, ce qui justifié l'absence d'une méthode de dimensionnement simple du modèle initial du projet.

La seconde partie de ce travail a été consacrée à l'expérimentation sur modèles réduits de déversoirs en labyrinthe de forme améliorée. Cette amélioration a concerné, la forme en plan, la présence des porte-à-faux en amont et en aval, et la forme du radier aval.

Cette partie est structurée en deux chapitres, le premier a permis la description de la géométrie des modèles de déversoir testés ainsi que le protocole expérimentale suivi. Le second chapitre a été réservé à la présentation et la discussion des résultats obtenus lors de l'étude expérimentale effectuée sur des modèles physique du déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire en plan en vue de vérifier d'abord l'influences des différents paramètres sur le rendement et d'améliorer ensuite sa configuration géométrique. Ces résultats obtenus ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Le meilleur rendement du labyrinthe rectangulaire est obtenu pour un rapport entre la largeur des alvéoles d'entrée et de sortie a/b compris dans l'intervalle 1.3 -1.5. Le choix d'une largeur de l'alvéole d'entrée égale à 1.5 fois la largeur de l'alvéole de sortie permet d'avoir un gain de performance de l'ordre de 10% par rapport à la configuration symétrique ($a/b = 1$).
- Le choix d'une forme en plan rectangulaire au lieu d'une forme trapézoïdale, fait accroître la performance hydraulique d'environ 12 % pour le ratio $L/W = 4$ et 5% pour le ratio $L/W = 5$ pour des charges relatives H^*/P inférieures à 0.5 qui correspond à la gamme des charges relatives choisies en pratique.
- La conception du déversoir en labyrinthe avec des porte-à-faux permet d'augmenter la performance hydraulique jusqu'à 15% pour une gamme de charges relatives $H^*/P < 0.5$. La conception du labyrinthe avec des porte-à-faux en amont paraît être la variante la plus rentable.
- Afin de réduire le coût de la structure de grande hauteur des murs, il est possible de diminuer la hauteur de la partie libre des murs verticaux en réalisant un remplissage partiel des alvéoles aval en béton ordinaire. Dans le même contexte, deux types de remplissages des alvéoles aval ont été proposés sous forme de radier incliné et forme en marches d'escalier. Le premier type de remplissage (radier incliné) semble le plus rentable puisque il n'affecte pas la performance hydraulique et permet aussi un gain de matériaux de ferrailage.

La troisième partie a eu comme objectif d'étudier théoriquement la performance hydraulique du déversoir en labyrinthe. Elle comporte deux chapitres, l'un vise la présentation des relations théoriques développées au cours de ce travail pour estimer le rendement ou la performance ou le coefficient du labyrinthe et de faciliter son dimensionnement.

L'expression de l'équation du rendement du labyrinthe permet de définir d'une manière simple la relation fonctionnelle liant les principaux paramètres qui régissent l'écoulement sur le déversoir en labyrinthe (paramètres géométriques la largeur du cycle w , longueur latérale de la crête B , la hauteur du déversoir P et deux coefficients empiriques \mathcal{E} et β et aussi la charge totale H_T qui présente l'aspect hydraulique).

La deuxième relation est proposée afin de faciliter le pré-dimensionnement du déversoir en labyrinthe. Cette relation exprime la hauteur du déversoir en fonction des caractéristiques de modèle de référence et les conditions du projet. Elle est aussi le produit d'une combinaison de la relation du rendement développée précédemment et la relation de Poleni.

La hauteur du déversoir peut être évaluée explicitement à partir des valeurs connues des caractéristiques du modèle de référence (w , B , P , \mathcal{E} et β) et les conditions du projet (Q , W et H_T).

Le deuxième chapitre, a été dédié aux applications et discussions des résultats de la comparaison entre les valeurs obtenues théoriquement et celles obtenues par voie expérimentale.

L'application de la première relation permet de déterminer le rendement du déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire de manière simple avec un écart maximal qui ne dépasse pas les 4% et un écart moyen de 1.5 %. Cette dernière relation a permis également d'évaluer le rendement du déversoir en touches de piano avec une erreur maximale qui ne dépasse pas 2 % et avec une erreur moyenne de 1 %. Il est à signaler que les faibles erreurs (environ de 3%) ont été obtenues pour les modèles qui se caractérisent par une conception géométrique plus précise.

En ce qui concerne la deuxième relation, un exemple pratique a été considéré pour illustrer la méthode de la prédétermination des dimensions préliminaires du déversoir en labyrinthe.

Ces applications, qui ont été effectuées pour le calcul du rendement et aussi pour expliquer le processus de dimensionnement, ont montrées la fiabilité et la simplicité des relations utilisées non seulement pour le déversoir en labyrinthe de forme rectangulaire mais aussi pour le déversoir en labyrinthe de forme trapézoïdale et le déversoir en touche de piano (PK-Weir). Ce travail ne prétend pas être la solution finale pour le dimensionnement du déversoir en labyrinthe, mais représente une alternative efficace pour l'amélioration de la géométrie du déversoir en labyrinthe afin d'optimiser son rendement. Et propose une méthode pour la détermination des premières dimensions du déversoir en labyrinthe de forme améliorée.

Références bibliographiques

Référence Bibliographiques

- **Afshar A.**, 1998. The development of labyrinth spillway designs, *Water Power & Dam Construction*, pp. 36-39.
- **Amanian, N.**, 1987. Performance and design of labyrinth spillways. M.S. thesis, Utah State University, Logan, Utah.
- **Babb, A.**, (1976). Hydraulic model study of the Boardman Reservoir Spillway. R.L Albrook Hydraulic Laboratory, Washington State University, Pullman, Wash.
- **Belaabed, F., Ouamane A.**, 2011. Contribution to the study of the Piano Key Weirs submerged by the downstream level. *Labyrinth and Piano Key Weirs*. pp. 89-95. ©2011 Taylor & Francis
- **Belaabed, F., Ouamane A.**, 2013. Submerged flow regimes of PK-Weir. *Labyrinth and Piano Key Weirs*, pp 85-92. ©2013 Taylor & Francis.
- **Belaabed F., Ouamane A.**, 2014. Etude de déversoir Piano Key Weir noyé parl'aval. International Symposium for water management and desertification, Istanbul.
- **Belaabed F., Ouamane A.**, 2015. Effect of the Downstream Level on the Performance of the PK-Weir and Linear Weir. 5th International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures, Liege, Belgium.
- **Ben said, M., 2008.** Etude de l'optimisation des évacuateurs de crues en labyrinthe. Mémoire de Magister en Hydraulique, université de Med Khider. Biskra.
- **Ben Saïd, M., Ouamane A.**, 2011. Study of optimization of labyrinth weir. *Labyrinth and Piano Key Weirs*, pp 67-74. ©2011 Taylor & Francis.
- **Bos, M, G.**, 1976. Discharge measurement structures. Publication No. 161, Delft Hydraulics Laboratory. Delft, Netherlands.
- **B.M. Crookston & al.** 2017. Free-flow discharge estimation method for Piano Key weir geometries. *Journal of Hydro-environment Research*,
- **Bouredjis, S.**, 2013. Contribution à l'étude de l'effet des conditions amont sur l'écoulement du déversoir en touches de piano (PK-Weir). Mémoire de Magister en Hydraulique, université de Med Khider. Biskra.
- **Carlier. M.**, 1980. *Hydraulique générale et appliquée*, Eyrolles, pp. 189-215.
- **Cassidy & al.**, 1985. Boardman Labyrinth Crest-Spillway. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 111, N° 3, pp. 398-416.
- **Crookston, B.M.**, 2010. Labyrinth weirs. PhD thesis, Utah State University, Logan, Utah.
- **Darvas, L.**, 1971. Discussion of performance and design of labyrinth weirs, by Hay and Taylor. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 97(80), 1246-1251.
- **Emiroglu & al.**, 2010. Discharge capacity of labyrinth side weir located on a straight channel. *Journal of Irrigation. and Drain. Engrg.*, 136(1), 37-46.
- **Falvey, H.**, 1980. Chapter 2. Practical experiences with flow-induced vibrations, E. Naudascher, and D. Rockwell, eds. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 386-398.
- **Falvey, H.**, 2003. *Hydraulic design of labyrinth weirs*. ASCE, Reston, Va.
- **Falvey, H., and Treille. P.**, 1995. Hydraulics and design of fusegates." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 121(7), 512-518.
- **Gentilini, B.**, 1940. Stramazzi con cresta a pianta obliqua e azig-zag. *Memorie e Studi dell Istituto di Idraulica e Costruzioni Idrauliche del Regio Politecnico di Milano*, No. 48 (in Italian).
- **Hager, W. H.**, (1987). Lateral Outflow Over Side Weirs, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 113 (4), 491-504.
- **Hay, N., and Taylor, G.**, 1970. Performance and design of labyrinth weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 96(11), 2337-2357.
- **Hinchliff, D. L. and Houston, K. L.**, 1984. *Hydraulic Design and Application of Labyrinth Spillways*. Division of Research Engineering and Research Center, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- **Houston, K.**, 1982. Hydraulic model study of Ute Dam labyrinth spillway. Report No. GR-82-7, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colo.
- **Houston, K.**, 1983. Hydraulic model study of Hyrum Dam auxiliary labyrinth spillway. Report No. GR-82-13, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colo.
- **Indlekofer and Rouvé, G.**, 1975. Discharge over polygonal weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 110(HY3), 385-401
- **Kabiri-Samani, A., Javaheri, A.**, 2012. Discharge coefficient for free and submerged flow over Piano Key weirs. *Journal of Hydraulic Research*. 50 (1), 114-120.

- **Lux, F. and Hinchliff, D.**, 1985. Design and construction of labyrinth spillways. 15th Congress ICOLD, Vol. IV, Q59-R15, Lausanne, Switzerland, 249-274.
- **LeiteRibeiro& al.**, 2012. Hydraulic design of a-type piano key weirs. *Journal of HydraulicResearch*. 50 (4), 400–408.
- **Lempérière F., A. Ouamane**, 2003. The Piano Keys Weir: a new cost-effective solution for spillways”. *The International Journal on Hydropower & Dams*, Issue Four.
- **Lempérière F., Ouamane A., Vigny J. P.**, 2011. General comments on labyrinths and P.K. Weirs - The past and present. *Labyrinth and Piano Key Weirs*, pp 17-24. ©2011 Taylor & Francis.
- **Lempérière F., Ouamane A., Vigny J. P.**, 2012. Promising future for P.K.Weirs. *The International Journal on Hydropower & Dams*, Volume Nineteen, Issue Two, 90-93.
- **Machiels, O.**, 2012. Experimental study of the hydraulic behavior of piano key weirs. PhD thesis, Liège University, Belgium.
- **Machiels, O& al.**, 2014. Experimental parametric study and design of Piano Key Weirs. *Journal of HydraulicResearch*. 52 (3), 326–335.
- **Machiels, O & al.**, 2015. Closure to experimental parametric study and design of piano key weirs. *Journal of HydraulicResearch*. 53 (4), 545.
- **Maghlhaes A.**, 1985. Labyrinth-Weir Spillways. 15th Congress on Large Dams, ICOLD, Vol. IV, Q59, R 24, pp. 395-407, Lausanne.
- **Maghlhaes A.**, 1994. Hydraulic Model Study of Large Labyrinth Weir Spillway. Application of Useful Experimental Charts in its Design, 2nd International Conference on Hydraulic Modeling, BHR Group pp. 25-31, UK.
- **Noui A &Ouamane A.**, 2007. Etude de l’optimisation de l’évacuateur de crues en touches de piano (P.K.Weir). Mémoire de magister en hydraulique, université Med Khider, Biskra.
- **Noui A.,Ouamane A.**, 2011. Study optimizing the piano key weir spillways. *Labyrinth and Piano Key Weirs*, pp 175-182. ©2011 Taylor & Francis
- **Ouamane A.**, 2005. A new cost effective solution for must spillways. Al-Azhar University.
- **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. 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 KhemisMeliana.
- **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, Spain, pp. 463-470 ©2006 Taylor & Francis.
- **Ouamane A.**, 2006. Hydraulic and Costs data for various Labyrinth Weirs. Q 84, 22^{ème} Congrès International des Grands Barrages. Barcelona. Spain,
- **Ouamane A., Lempérière F.**, 2007. Amélioration du rendement des évacuateurs de crues en labyrinthe. 2^{ème} Colloque International Eau et Environnement, ENSH, Blida.
- **Ouamane A., Lempérière F.**, 2007. Increase of the safety of existing dams - Rehabilitation of weirs- “Symposium: Dam Safety Management. Role of State, Private Companies and Public in Designing, Constructing and Operating of Large Dams. ICOLD 75th Annual Meeting of International Commission on Large Dams, Saint Petersburg, Russia.
- **Ouamane A., Lempérière F.**, 2008. Nouvelles solutions économiques permettant l’accroissement de la capacité des retenues des barrages existants. Séminaire National l’Eau dans son Environnement SNEE, Blida.
- **Ouamane A., Lempérière F.**, 2008. The Piano Key Weir is the solution to increase the capacity of the existing spillways– Progressing World Hydro Development. Conference International HYDRO 2008- Ljubljana, Slovenia.
- **Ouamane A.**, 2009. Etude de l’effet de la géométrie et des conditions d’écoulement aval sur la performance du P.K.Weir. Séminaire International sur les déversoirs en touches de piano, Lyon. France.
- **Ouamane A.**, 2009. Dam engineering in Algeria: progress, needs and prospects. *The International Journal on Hydropower & Dams*, Volume Sixteen, Issue Six, 75-79.
- **Ouamane A., Ben Saïd M.**, 2010. “Economic conceptions of the labyrinth weir allowing the improvement of the management of floods and the increase of the useful capacity of the reservoir. *Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen*, Germany, pp 303-311. N° 158 ©2010 Shaker Verlag.

- **Ouamane A.**, 2010. Amélioration de la forme de déversoir en labyrinthe pour mieux gérer le passage des crues exceptionnelles. 5^{ème} Conférence Internationale sur les ressources en eau dans le bassin méditerranéen, Watmed 5, Lille- France.
- **Ouamane A., Lempérière F.**, 2010. Study of various alternatives of shape of piano key weirs. Conférence Internationale, HYDRO 2010 - Meeting Demands in a Changing World, Lisbon Congress Centre, Lisbon, Portugal.
- **Ouamane A.**, 2011, “Nine years of study of the Piano Key Weir in the university laboratory of Biskra - Lessons and reflections”, Labyrinth and Piano Key Weirs, pp. 51-58. ©2011 Taylor & Francis.
- **Ouamane A.**, 2013m (Keynote lectures) “Improvement of labyrinth weirs shape”. Labyrinth and Piano Key Weirs, pp 15-22. ©2013 Taylor & Francis.