

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



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم: الهندسة المدنية والري  
المرجع:.....

Thèse présentée en vue de l'obtention  
Du diplôme de

## Doctorat en Sciences en : HYDRAULIQUE

Spécialité (Option) : Hydraulique urbaine et aménagement

### Étude comparative entre les déversoirs rectilignes et non rectilignes

Présentée par:

**Abderrahmane NOUI**

Soutenue publiquement le : 29 Novembre 2018

**Devant le jury composé de :**

Dr. BOUZIANE Med Tewfik	Professeur	Président	Université de Biskra
Dr. SAKAA Bachir	Maître de Recherche 'A'	Rapporteur	CRSTRA
Dr. HOUICHI Larbi	Professeur	Examineur	Université de Batna
Dr. REZEG Assia	Maître de Conférences 'A'	Examinatrice	Université de Biskra
Dr. DJEDDOU Messaoud	Maître de Conférences 'A'	Examineur	Université d' Oum El Bouaghi

# إهداء

أهدي هذا العمل المتواضع إلى أبي وأمي رحمهما الله.  
عن أبي هريرة رضي الله عنه أن رسول الله صلى الله عليه وسلم، قال: « إذا مات ابن آدم انقطع عمله إلا من ثلاث: صدقة جارية، أو علم ينتفع به، أو ولد صالح يدعو له » رواه مسلم.  
في هذا السياق، أرجو من كل طالب أو باحث انتفع بهذا البحث المتواضع أن يدعو لوالدي رحمهما الله بالرحمة والمغفرة.

نوي عبد الرحمان

## REMERCIEMENTS

*Je voudrais exprimer ma gratitude au **Docteur SAKAA Bachir**, mon directeur de thèse, pour m'avoir confié ce travail. Je lui suis très reconnaissant pour la qualité des nombreux conseils, son attention, et bien évidemment pour les connaissances et son expérience de la recherche qu'il a su me transmettre, et qui j'en suis sûr me serai bénéfiques dans les années futures.*

*J'exprime mes vifs remerciements au **Professeur BOUZIANE Mohammed Tewfik**, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de soutenance, je tiens à lui exprimer ma profonde reconnaissance.*

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres de jury pour l'honneur qu'il me faisait en participant à ce jury et de bien vouloir juger ce travail :*

- ***Professeur HOUICHI Larbi***
- ***Docteur REZAG Assia***
- ***Docteur DJEDDOU Messaoud***

*Merci à Monsieur le Recteur de l'université Mohamed Khider le **Professeur BOUTERFAIA Ahmed** pour son aide et ses encouragements.*

*Merci à Monsieur le Vice-recteur chargé de la Recherche scientifique, Habilitation universitaire et Post Graduation le **Professeur GUETTALA Abdelhamid** pour son aide et ses encouragements.*

*Merci à Madame la Directrice du Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides (CRSTRA), **Docteur LAKHDARI Fattoum** pour ses encouragements.*

*Merci à Madame la Directrice adjointe du Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides (CRSTRA), **Docteur BOUCHAHEM Nora** pour ses encouragements.*

*Je voudrais remercier **ma femme** pour leur soutien et leurs encouragements pour poursuivre la thèse.*

## RÉSUMÉ

Les risques majeurs technologiques liés à l'eau, notamment la rupture des barrages, sont généralement dus à l'insuffisance de la capacité d'évacuation des déversoirs. Afin d'améliorer la sécurité des barrages, plusieurs types des déversoirs sont inventés, tels que les déversoirs rectilignes et les déversoirs non rectilignes.

Lorsque le seuil d'un déversoir est en alignement rectiligne, ce type de déversoir est appelé déversoir rectiligne, tandis que le déversoir non rectiligne se caractérise par son alignement non rectiligne.

Les déversoirs rectilignes font l'objet de plusieurs travaux de recherche en comparaison avec les déversoirs non rectilignes ; notamment les déversoirs non rectilignes en labyrinthe développés.

Les déversoirs non rectilignes creusés sont à l'origine des déversoirs non rectilignes en labyrinthe développés, mais ils sont caractérisés par le creusement vertical de ses alvéoles. Dans ce sens, trois modèles de conception du déversoir non rectilignes creusés ont été sélectionnés. Le premier se caractérise par un creusement symétrique de ses alvéoles, le second modèle se caractérise par un creusement unique en aval de ses alvéoles. Tandis que la troisième configuration se caractérise par un creusement unique d'alvéoles amont.

Dans ce sens, le présent travail est considéré comme une contribution à l'étude comparative entre les déversoirs rectilignes en mince paroi et les déversoirs non rectilignes creusés par voie analytique, expérimentale et numérique. L'analyse dimensionnelle de l'écoulement a donné une base pour le développement mathématique de relations qui permettent le dimensionnement des déversoirs rectilignes en mince paroi et les déversoirs non rectilignes creusés. L'étude expérimentale a montré que les déversoirs non rectilignes creusés peuvent être une solution efficace pour faire évacuer des grands débits sous des faibles charges en comparaison avec les déversoirs rectilignes en mince paroi. L'analyse numérique et statistique nous permet de présenter des relations mathématiques générales et approchées du coefficient de débit du déversoir non rectiligne creusé.

**MOTS CLÉS:** risque majeur technologique, barrage, déversoir rectiligne, déversoir non rectiligne, capacité d'évacuation.

## ABSTRACT

The major technological risks related to water, in particular dam failure, are generally due to insufficient drainage capacity of the spillway. To improve the safety of dams, several types of spillways are invented, such as rectilinear spillway and non-rectilinear spillway

When the threshold of a spillway is in rectilinear alignment, this type of spillway is called rectilinear spillway, while the non-rectilinear spillway is characterized by its non-rectilinear alignment.

Rectilinear spillways are the subject of several research projects in comparison with non-rectilinear spillways; in particular the non-rectilinear spillways in labyrinth developed.

Non-rectilinear spillway dug are at the origin of non-rectilinear spillways in developed labyrinth, but they are characterized by the vertical digging of its cells. In this sense, three non-rectilinear spillway dug design models were selected. The first is characterized by a symmetrical digging of its cells, the second model is characterized by a unique digging downstream of its alveoli. While the third configuration is characterized by a unique digging of upstream cells.

In this sense, the present work is considered as a contribution to the comparative study between the rectilinear spillways with thin wall and the non-rectilinear spillways dug; analytically, experimentally and numerically. The dimensional analysis of the flow has provided a basis for the mathematical development of relationships that allow the design of rectilinear spillway and non-rectilinear spillways dug. The experimental study has shown that non-rectilinear spillway dug can be an effective solution for evacuating large flows under light loads compared to rectilinear spillway with thin wall. Numerical and statistical analysis allows us to present general and approximate mathematical relations of the flow coefficient of the non-rectilinear spillway dug.

**KEY WORDS:** major technological risk, dam, rectilinear spillway, non-rectilinear spillway, discharge capacity.

## ملخص

يعتبر انهيار السدود من بين المخاطر الكبرى التكنولوجية المتعلقة بالمياه، والذي يعود سببه إلى عدم كفاية قدرة الهدارات على تفريغ الفيضانات. و لتأمين سلامة السدود، تم اختراع عدة أنواع من الهدارات مثل الهدارات المستقيمة و الهدارات الغير مستقيمة.

عندما يكون المقطع الطولي للهدار على شكل مستقيم يسمى هذا النوع هدار مستقيم، في حين يتميز الهدار الغير مستقيم بمقطع طولي غير مستقيم.

الهدارات المستقيمة كانت محل العديد من التجارب البحثية بالمقارنة مع الهدارات الغير مستقيمة، ولا سيما الهدارات الغير مستقيمة ذات شكل متاهة.

الهدارات غير المستقيمة المجوفة هي في الأصل هدارات غير مستقيمة ذات شكل متاهة، ولكنها تتميز بوجود تجويفات عمودية في المصببات.

في هذا السياق تم تصميم ثلاثة نماذج لهذا الهدار الغير المستقيم و المجوف: يتميز النموذج الأول بوجود تجويفات متناظرة للمصببات، ويتميز النموذج الثاني بوجود تجويفات في المصببات من الجهة الخلفية فقط، في حين أن النموذج الثالث يتميز بوجود تجويفات في المصببات من الجهة الأمامية فقط.

يعتبر هذا العمل كمساهمة في المقارنة بين الهدارات المستقيمة و الهدارات الغير المستقيمة المجوفة وذلك عن طريق الدراسة التحليلية والتجريبية والرقمية. وقد أعطى تحليل أبعاد التدفق علاقات رياضية تسمح بتصميم الهدارات المستقيمة والهدارات الغير مستقيمة المجوفة. وقد أظهرت الدراسة التجريبية أن الهدارات الغير مستقيمة المجوفة يمكن أن تكون حلا فعالا لتفريغ تدفقات كبيرة مقارنة مع الهدارات المستقيمة. كما أن التحليل الرقمي والإحصائي سمح لنا بتقديم علاقات رياضية عامة وتقريبية لمعامل التدفق للهدارات الغير مستقيمة المجوفة.

**الكلمات المفتاحية:** كارثة تكنولوجية، سد، هدار مستقيم، هدار غير مستقيم ، القدرة على التفريغ.

# SOMMAIRE

TITRE	PAGE
Remerciements.....	i
Résumé.....	ii
Abstract.....	iii
ملخص.....	iv
Sommaire.....	v
Liste des figures.....	xii
Liste des tableaux.....	xix
Notations et abréviations.....	xx
<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
<b>PARTIE I : ETUDE THEORIQUE</b>	
<b>CHAPITRE I: APERÇU SUR LES DEVERSOIRS TRADITIONNELS</b>	
<b>« RECTILIGNES &amp; NON RECTILIGNES »</b>	
I-1 INTRODUCTION.....	5
I-2 CHAMPS D'UTILISATION DES DEVERSOIRS .....	6
I-3 DIFFERENTS TYPES DE DEVERSOIRS.....	7
I-4 APERÇU SUR LES DEVERSOIRS RECTILIGNES.....	8
I-4-1 Déversoir standard (CREAGER).....	8
I-4-2 Déversoir en mince paroi.....	10
I-4-2-1 Régime d'écoulement sur les déversoirs en mince paroi.....	11
I-4-2-2 Types des déversoirs en mince paroi.....	13
• Déversoir rectangulaire avec contraction latérale.....	14
• Déversoir à échancrure triangulaire.....	14
• Déversoir trapézoïdal.....	15
• Déversoir circulaire.....	16
• Déversoir incliné.....	17
• Déversoir oblique.....	18
I-4-3-Déversoir à seuil épais (Large seuil).....	20
I-4-3-1 Régime d'écoulement sur un déversoir à crête épaisse.....	21
I-4-3-2 Types des déversoirs à crête épaisse.....	22
• Déversoir à seuil épais à profil triangulaire.....	22
• Déversoir de section trapézoïdale.....	22

I-5 APERÇU SUR LES DEVERSOIRS NON RECTILIGNES – TRADITIONNELS.....	23
I-5-1 Le déversoir en labyrinthe traditionnel.....	23
I-5-2 Géométrie du déversoir en labyrinthe traditionnel .....	24
I-5-3 Performance d'un déversoir en labyrinthe traditionnel .....	25
I-5-4 Mode d'écoulement sur le déversoir en Labyrinthe traditionnel .....	27
• Phase écoulement entièrement aéré.....	27
• Phase écoulement partiellement aéré.....	27
• Phase écoulement transitoire.....	27
• Phase écoulement à nappe déprimée.....	28
I-5-5 Débit du déversoir en labyrinthe traditionnel par l'analyse dimensionnelle.....	28
I-6 CONCLUSION.....	31
<b>CHAPITRE II</b>	
<b>ETAT D'ART SUR LES DEVERSOIRS AUTO-STABLES</b>	
II-1 INTRODUCTION.....	34
II-2 CLASSIFICATION DES DEVERSOIRS AUTO-STABLES.....	34
II-3 DEVERSOIR EN LABYRINTHE FUSIBLE (HYDROPLUS).....	35
II-3-1 Caractéristiques du débit.....	36
II-3-2 Description et dimensionnement du système des hausses fusibles.....	37
II-3-2-1 Principe de fonctionnement.....	37
II-3-2-2 Stabilité des hausses fusibles.....	38
a) Avant remplissage de la chambre.....	39
b) Après remplissage de la chambre.....	39
II-3-2-2-1 Stabilité au glissement.....	39
II-3-2-2-2 Stabilité au renversement.....	40
II-4- BLOCS FUSIBLES.....	42
II-4-1 Conception des blocs fusibles.....	42
II-4-2 Emplacement des Blocs fusibles.....	43
II-4-3 Diagramme de stabilité des Blocs fusibles.....	44
II-4-4 Performance des Blocs fusibles.....	44
II-4-5 Construction des Blocs fusibles.....	45
II-5 AUTRES DISPOSITIFS FUSIBLES.....	45
II-5-1 Flashboard.....	45
II-5-2 Dignes fusibles.....	46

II-5-3 Les hausses rabattables (Hydroplus).....	47
II-5-3 -1 Principe de fonctionnement des hausses rabattables.....	47
II-5-4 Les vannes automatiques (Hydroplus).....	49
II-5-4 -1 Principe de fonctionnement des vannes automatiques.....	49
II-5-5 Les boudins gonflables.....	51
II-5-6 Les Murs en L.....	52
II-6 CONCLUSION.....	53
<b>CHAPITRE III</b>	
<b>APERÇU SUR LES NOUVEAUX DEVERSOIRS NON RECTILIGNES</b>	
III-1 INTRODUCTION.....	55
III-2 NOTION DU DEVERSOIR EN LABYRINTHE DEVELOPPE.....	55
III-3 CARACTERISTIQUES DU DEVERSOIR EN LABYRINTHE DEVELOPPE.....	56
III-4 TYPES DES DEVERSOIRS EN LABYRINTHE DEVELOPPES.....	57
III-4-1 Déversoir en labyrinthe développé (type A).....	58
III-4-2 Déversoir en labyrinthe développé (type B).....	58
III-5 MODE D'ÉCOULEMENT SUR LE DEVERSOIR LABYRINTHE DEVELOPPE....	59
III-6 PERFORMANCE HYDRAULIQUE.....	60
III-7 ANALYSE DE LA CAPACITE D'ÉVACUATION .....	60
III-8 TRAVAUX D'OPTIMISATION DU DEVERSOIR DEVELOPPE (type A).....	61
III-8-1 Rapport d'aspect vertical, W/P.....	61
III-8-2 Longueur relative, L/W.....	62
III-8-3 Largeur des alvéoles a et b.....	62
III-8-4 Impact de la longueur des porte-à-faux.....	63
III-8-5 Impact des corps flottants.....	64
III-9 TRAVAUX D'OPTIMISATION DU DEVERSOIR DEVELOPPE (type B) .....	64
III-9-1 Impact du ratio L/W.....	65
III-9-2 Impact de la largeur relative des alvéoles a/b.....	65
III-9-3 Impact du ratio W/P .....	66
III-9-4 Impact de la longueur de la paroi latérale B.....	67
III-10 Influence de différentes conditions sur la performance du déversoir développé .....	67
III-10-1 Effet du taux de remplissage de la surface du plan d'eau aval .....	68
III-10-2 Effet de la contraction latérale sur l'écoulement.....	68
III-10-3 Rendement des guideaux curviligne .....	70

III-10-4 Emplacement avancé du déversoir en labyrinthe développé dans la retenue.....	70
III-11 Différents travaux de recherche sur la performance du déversoir en labyrinthe développé au niveau international .....	71
III-11-1 Effet de la hauteur de la pelle sur la performance du déversoir développé.....	71
III-11-2 Travaux de comparaison entre le déversoir en labyrinthe développé et le déversoir en labyrinthe traditionnel.....	72
III-11-3 Effet de creusement des alvéoles (Parapet) sur la performance du déversoir en labyrinthe développé (type A) .....	73
III-11-4 Effet de largeur des alvéoles sur la performance du déversoir en labyrinthe développé type A (Piroton et al 2012).....	75
III-11-5 Etude de la performance du déversoir en labyrinthe développé fractal.....	76
III-11-6 Etude de la performance du déversoir en labyrinthe développé – cas des petits barrages (Ta Khanh et al, 2012).....	77
III-11-7 Impact des corps flottants sur la performance du déversoir en labyrinthe développé (Tullis et al, 2015).....	79
III-12 Application du déversoir labyrinthe développé pour quelques barrages en France.....	81
III-13 Application du déversoir labyrinthe développé pour quelques barrages en Vietnam...	82
III-14 CONCLUSION.....	83
<b>PARTIE II : ETUDE ANALYTIQUE, EXPERIMENTALE &amp; NUMERIQUE</b>	
<b>CHAPITRE IV</b>	
<b>ANALYSE DIMENSIONNELLE APPLIQUEE AUX DEVERSOIRS</b>	
<b>RECTILIGNES ET DEVERSOIRS NON RECTILIGNES</b>	
IV.1.INTRODUCTION.....	88
IV.2.DEFINITION DE LA MODELISATION.....	89
IV.2.1.La modélisation numérique.....	89
IV.2.2. La modélisation analogique.....	89
IV.2.3. Modèle physique.....	89
IV.3. ANALYSE DIMENSIONNELLE.....	90
IV.3. 1.Théorème $\pi$ de Buckingham (1890-1914).....	90
IV.3. 2. Exemple d'application de Théorème $\pi$ de Buckingham.....	91
IV.3. 3. Les grandeurs physiques et leurs unités en système international.....	92
IV.4. LA SIMILITUDE EN MECANIQUE DES FLUIDES.....	93
IV.4.1.Similitude géométrique.....	93

IV.4.2.Similitude cinématique.....	94
IV.4.3.Similitude dynamique.....	94
IV.5. LOIS DE SIMILITUDE EN MECANIQUE DES FLUIDES.....	95
IV.5.1.Similitude de Reech-Froude.....	96
IV.5.2.Similitude de Reynolds.....	97
IV.5.3 Etapes de conception des modèles réduits.....	98
IV.5.4. Les nombres adimensionnels rencontrés dans le domaine de mécanique des fluides.	99
IV-6 Analyse dimensionnelle appliquée au Déversoir rectiligne en mince paroi – avec contraction latérale – rectangulaire.....	100
IV-7ANALYSE DIMENSIONNELLE APPLIQUEE AU DEVERSOIR CREUSE.....	102
IV-7-1 Configuration géométrique du déversoir non rectiligne creusé.....	102
IV-7-2 Application du Théorème $\pi$ de Buckingham au déversoir non rectiligne creusé.....	104
IV.7.3.Application numérique et mathématique.....	105
IV.8.CONCLUSION.....	113
<b>CHAPITRE V</b>	
<b>ETUDE COMPARATIVE ET EXPERIMENTALE SUR MODELES REDUITS</b>	
V-1 INTRODUCTION.....	115
V-2 OBJECTIF DE L'ETUDE .....	115
V-3 APERÇU SUR LA STATION D'EXPERIMENTATION DES MODELES REDUITS	121
V-4 APPAREILLAGE DE MESURE.....	125
V-4-1 Mesure des débits.....	125
V-4-2 Mesure de la profondeur d'eau.....	126
V-5 METHODE EXPERIMENTALE .....	127
V-6 METHODE D'INTERPRETATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX.....	127
V-7 ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES DEVERSOIRS CREUSES ET LES DEVERSOIRS EN MINCE PAROI.....	130
V-7-1 Capacité d'évacuation du déversoir creusé symétriquement ( $d'/P=0.13$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur.....	130
V-7-2 Capacité d'évacuation du déversoir creusé en aval ( $d'/P=0.13$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur.....	131
V-7-3 Capacité d'évacuation du déversoir creusé en amont ( $d'/P=0.13$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur.....	133
V-7-4 Capacité d'évacuation du déversoir creusé symétriquement ( $d'/P=0.067$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur.....	136

V-7-5 Capacité d'évacuation du déversoir creusé symétriquement ( $d'/P=0.2$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur.....	137
V-7-6 Capacité d'évacuation du déversoir creusé symétriquement ( $d'/P=0.27$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur.....	139
V-7-7 Capacité d'évacuation du déversoir creusé symétriquement ( $d'/P=0.33$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur.....	140
V-7-8 Capacité d'évacuation du déversoir creusé symétriquement ( $d'/P=0.4$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur.....	141
V-7-9 Capacité d'évacuation du déversoir en labyrinthe développé ( $d'/P=0$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur.....	143
V-8 ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES DEVERSOIRS EN LABYRINTHE DEVELOPPE ET LES DEVERSOIRS EN MINCE PAROI.....	146
V-8-1 Capacité d'évacuation du déversoir en labyrinthe développé rectangulaire par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur.....	147
V-8-2 Capacité d'évacuation du déversoir en labyrinthe développé triangulaire par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur.....	148
V-8-3 Capacité d'évacuation du déversoir en labyrinthe développé trapézoïdale par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur.....	149
V-9 ETUDE EXPERIMENTALE SUR MODELES DES DEVERSOIRS CREUSES.....	152
V-9-1 Impact de l'endroit d'emplacement du déversoir non rectiligne creusé.....	152
V-9-2 Effet des corps flottants sur la performance du déversoir non rectiligne creusé.....	156
V-9-3 Effet de la forme d'entrée sur le déversoir non rectiligne creusé.....	157
V-9-4 Comparaison expérimentale entre les déversoirs non rectilignes creusés.....	160
V-10 CONCLUSION.....	164
<b>CHAPITRE VI</b>	
<b>ANALYSE NUMERIQUE ET STATISTIQUE</b>	
VI-1 INTRODUCTION.....	168
VI-2 CHOIX DES OUTILS DE L'ANALYSE NUMERIQUE.....	168
VI-2-1 Définition de la régression multiple.....	168
VI-2-2 La méthode des moindres carrés ordinaire (MCO).....	169
VI-2-3 Présentation de MINITAB 17.....	169
VI-2-4 Différents type de régression par Minitab 17.....	170
VI-2-5 La régression multiple par MINITAB 17.....	170

VI-2-6 Conditions d'application de la régression multiple par MINITAB 17.....	171
VI-3 ANALYSE NUMERIQUE APPLIQUEE SUR LES DEVERSOIRS NON RECTILIGNES CREUSES.....	171
VI-3-1 Introduction des données .....	172
VI-3-2 Application de la régression multiple.....	172
VI-3-3 Résultats numériques.....	174
VI-4 CONCLUSION.....	180
<b>CONCLUSION GENERALE &amp; PERSPECTIVE.....</b>	<b>183</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>193</b>
<b>ANNEXE</b>	

# LISTE DES FIGURES

TITRE	PAGE
<b>PREMIERE PARTIE</b>	
<b>Chapitre I : Aperçu sur les déversoirs traditionnels « rectilignes et non rectilignes »</b>	
Figure I-01 : Essai de mesure de débit par un déversoir (France).....	6
Figure I-02 : Évacuateur de crues – Barrage Bou-Hanifia – Algérie.....	6
Figure I-03: Schéma d'un déversoir rectiligne.....	8
Figure I-04 : Coupe transversal du déversoir standard (creager) .....	9
Figure I-05: Nappe libre et profil géométrique du déversoir type Creager.....	10
Figure I-06: Déversoir en mince paroi – France.....	11
Figure I-07 : Coupe longitudinale d'un déversoir à crête mince en écoulement noyé.....	12
Figure I-08 : Déversoir à crête mince en écoulement noyé en dessous à ressaut éloigné.....	12
Figure I-09 : Les différents types du déversoir en mince paroi.....	13
Figure I-10 : vue en perspective d'un déversoir rectangulaire sans contraction latérale.....	14
Figure I-11 : vue en perspective d'un déversoir rectangulaire avec contraction latérale.....	14
Figure I-12 : Forme de la crête d'un déversoir à échancrure triangulaire.....	15
Figure I-13 : Coupe transversale d'un déversoir trapézoïdal.....	16
Figure I-14 : déversoir circulaire – Maroc.....	17
Figure I-15 : Coupe longitudinale d'un déversoir incliné.....	18
Figure I-16 : Vue en plan d'un déversoir oblique.....	18
Figure I-17 : Déversoir à seuil épais.....	20
Figure I-18 : Coupe longitudinale d'un déversoir à crête épaisse en écoulement noyé.....	21
Figure I-19 : Coupe longitudinale d'un déversoir à crête épaisse en écoulement dénoyé.....	21
Figure I-20 : Vue en perspective d'un déversoir à seuil épais à profil triangulaire.....	22
Figure I-21 : Coupe longitudinale d'un déversoir à crête longitudinale trapézoïdale.....	22
Figure I-22: Vue en plan du déversoir en labyrinthe traditionnel.....	23
Figure I-23: Représentation typique des paramètres du déversoir en labyrinthe traditionnel	24
Figure I-24 : Différentes formes des modèles réduits des déversoirs en labyrinthe.....	25
Figure I-25 : Coefficient de débit d'un déversoir en labyrinthe en fonction de L/W et H/P..	26
Figure I-26 : Ecoulement à faible charge ( <i>BENSAID et al – Magister 2008</i> ).....	27

Figure I-27: Ecoulement à grande charge ( <i>BENSAID et al – Magister 2008</i> ).....	28
Figure I-28: Courbe de conception du déversoir en labyrinthe en fonction de $H_0/P, W/P$ ....	29
<b>Chapitre II : Etat d'art sur les déversoirs auto-stables</b>	
Figure II-01: Schéma d'une hausse fusible (HYDROPLUS – France).....	35
Figure II-02: Hausse fusible opérationnel – France.....	36
Figure II-03 : Hausse fusible (rôle du réservoir).....	37
Figure II-04: Alimentation de la chambre de mise en pression.....	37
Figure II-05 : Hausse fusible avec mise en pression de la chambre et basculement.....	38
Figure II-06 : Forces agissant sur une hausse fusible (Falvey, 1995).....	40
Figure II-07 : Moments appliqués sur la hausse fusible.....	41
Figure II-08: Conception des Blocs fusibles .....	43
Figure II-09: Emplacement des Blocs fusibles .....	43
Figure II-10 : Diagramme de stabilité des blocs fusibles.....	44
Figure II-11: Comparaison d'un seuil classique et d'un seuil équipé de blocs fusibles.....	44
Figure II-12: Phases de construction des blocs fusibles.....	45
Figure II-13 : Déversoir (Flashboard) Etats-Unies.....	46
Figure II-14 : Déversoir (digue fusible) France.....	46
Figure II-15 : Déversoir (les hausses rabattables) Russie.....	47
Figure II-16 : Hausse rabattable – rôle de réservoir.....	48
Figure II-17 : Alimentation de la chambre de hausse rabattable.....	48
Figure II-18 : Basculement de hausse rabattable.....	48
Figure II-19: Schéma d'une vanne automatique.....	49
Figure II-20 : Vanne automatique – rôle de réservoir.....	50
Figure II-21 : Basculement de la vanne automatique.....	50
Figure II-22: Schéma d'un boudin gonflable.....	51
Figure II-23: Boudin gonflable (Photo -Irstea).....	51
Figure II-24 : Barrage Milner (USA).....	52
<b>Chapitre III : Aperçu sur les nouveaux déversoirs non rectilignes</b>	
Figure III-01 : Déversoir en labyrinthe développé réalisé en 2010 au barrage de Gloriettes, dans les Pyrénées – France.....	56
Figure III-02: Configuration géométrique d'un élément de déversoir labyrinthe développé.	57
Figure III-03 : Déversoir en labyrinthe développé - type A.....	58

Figure III-04 : Déversoir en labyrinthe développé - type B.....	58
Figure III-05: Ecoulement en deux nappes déversantes sur déversoir labyrinthe développé	59
Figure III-06 : Mode de l'écoulement sur le déversoir en labyrinthe développé.....	59
Figure III-07 : Comparaison de débit entre le déversoir en labyrinthe développé et le déversoir Creager.....	60
Figure III-08 : Coefficient de débit en fonction du rapport de l'aspect vertical W/P.....	61
Figure III-09 : Coefficient de débit en fonction du ratio L/W.....	62
Figure III-10 : Coefficient de débit en fonction de la largeur des alvéoles amont et aval...	63
Figure III-11 : Coefficient de débit en fonction de la longueur des porte-à-faux .....	63
Figure III-12 : Coefficient de débit en fonction de la présence des corps flottants.....	64
Figure III-13 Courbe des débits en fonction du ratio L/W.....	65
Figure III-14 : Coefficient de débit en fonction des largeurs des alvéoles amont et aval.....	66
Figure III-15: Coefficient du débit en fonction du rapport de l'aspect vertical W/P.....	66
Figure III-16: Coefficient de débit en fonction de la longueur de la paroi latérale.....	67
Figure III-17: Influence du niveau aval sur l'écoulement en amont.....	68
Figure III-18 : Modèles de déversoir avec et sans contraction latérale.....	69
Figure III-19 : Courbes de la charge relative amont en fonction de la charge relative aval..	69
Figure III-20 : Comparaison du coefficient de débit pour un déversoir sans guideaux ( $\alpha = 90^\circ$ ) et celui avec des guideaux curvilignes.....	70
Figure III-21 : Coefficient de débit de la disposition avancée du déversoir en labyrinthe développé et celle avec contraction latérale.....	71
Figure III-22 : Influence de la hauteur de la pelle sur la performance du déversoir en labyrinthe développé.....	72
Figure III-23 : Comparaison entre le déversoir en labyrinthe développé et le déversoir en labyrinthe traditionnel .....	73
Figure III-24 : Comparaison analytique de l'effet de rehausses sur la performance du déversoir en labyrinthe développé (Olivier et al 2011).....	74
Figure III-25 : Effet de creusement des alvéoles sur la performance du déversoir en labyrinthe développé type A.....	75
Figure III-26 : Influence du ratio (a/b) sur la performance du déversoir en labyrinthe développé type A.....	76
Figure III-27 : Configuration géométrique du déversoir labyrinthe développé Fractal.....	76

Figure III-28 : Vue en 3D (déversoirs en labyrinthe développés type A et type B et déversoir traditionnel rectangulaire) testés (Ta Khanh et al, 2012).....	78
Figure III-29: Courbes de submersion pour les trois déversoirs testées (Khanh al, 2012)....	79
Figure III-30 : Essai sur l'effet des corps flottants (Tullis et al, 2015).....	80
Figure III-31 : Barrage de la Raviège – installation virtuelle du déversoir en labyrinthe développé (vue en aval).....	81
Figure III-32 : Barrage de de Van Phong – en cours de construction – Vietnam.....	83
<b>DEUXIEME PARTIE</b>	
<b>Chapitre IV: Analyse dimensionnelle appliquée aux déversoirs rectilignes et déversoirs non rectilignes</b>	
Figure IV-01: Modèle physique employé pour simuler les conditions environnementales d'un terminal méthanier. © Conseil national de recherches du Canada.....	89
Figure IV-02: Coefficient de traînée de cylindre 2D dans un écoulement permanent.....	91
Figure IV-03: Similitude géométrique.....	93
Figure IV-04: Similitude cinématique.....	94
Figure IV-05: Similitude dynamique.....	94
Figure IV-06: Déversoir rectiligne en mince paroi avec contraction latérale.....	100
Figure IV-07 : déversoir non rectiligne creusé.....	102
Figure IV-08 : déversoir en labyrinthe développé.....	102
Figure IV- 09: Vue en plan du déversoir non rectiligne creusé.....	103
Figure IV- 10: Vue en profil du déversoir non rectiligne creusé.....	104
<b>Chapitre V : Etude comparative et expérimentale sur modèles réduits</b>	
Figure V-01: Schéma d'un déversoir rectiligne à paroi mince.....	117
Figure V-02: Vue en profil d'un déversoir non rectiligne creusé.....	118
Figure V-03: La station d'expérimentation des modèles réduits.....	121
Figure V-04 : Vue de l'aval de la station d'expérimentation des modèles réduits.....	122
Figure V-05 : Vue en plan de la station d'expérimentation des modèles réduits.....	123
Figure V-06 : Modèle d'expérimentation (Vue global).....	123
Figure V-07 : Modèle d'expérimentation (Vue en profil).....	124
Figure V-08 : Vue de profil en 3D du dispositif expérimental (S.Bordji – Magister 2012)..	124
Figure V-09 : Principe de mesure du débit par le débitmètre à ultrason.....	125

Figure V-10 : Débitmètre ultrason (Prosonic Flow).....	126
Figure V-11 : Tableau manométrique.....	126
Figure V-12 : Les paramètres du déversoir à écoulement libre et noyé.....	127
Figure V-13 : Méthode de comparaison graphique entre les courbes des débits du déversoir creusé et les courbes des débits du déversoir en mince paroi.....	129
Figure V-14 : Modèle du déversoir en mince paroi (D01).....	130
Figure V-15 : Modèle du déversoir en creusement symétrique (D03).....	130
Figure V-16: Courbes des débits du déversoir non rectiligne avec creusement symétrique ( $d'/P=0.13$ ) comparée à celle du déversoir rectiligne en mince paroi.....	131
Figure V-17 : Modèle du déversoir creusé uniquement en aval (D05) .....	132
Figure V-18 : Courbes des débits du déversoir non rectiligne avec creusement uniquement en aval ( $d'/P=0.13$ ) comparée à celle du déversoir rectiligne en mince paroi	132
Figure V-19 : Modèle du déversoir creusé uniquement en amont (D04).....	133
Figure V-20 : Courbes des débits du déversoir non rectiligne avec creusement uniquement en amont ( $d'/P=0.13$ ) comparée à celle du déversoir en mince paroi.....	134
Figure V-21 : Différents modèles testés des déversoirs creusés symétriquement (augmentation ou diminution de la profondeur de creusement des alvéoles).	135
Figure V-22 : Courbes des débits du déversoir non rectiligne avec creusement symétrique ( $d'/P=0.067$ ) comparée à celle du déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur.....	137
Figure V-23 : Courbes des débits du déversoir non rectiligne avec creusement symétrique ( $d'/P=0.2$ ) comparée à celle du déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur.....	138
Figure V-24 : Courbes des débits du déversoir non rectiligne avec creusement symétrique ( $d'/P=0.27$ ) comparée à celle du déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur.....	139
Figure V-25 : Courbes des débits du déversoir non rectiligne avec creusement symétrique ( $d'/P=0.33$ ) comparée à celle du déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur.....	140
Figure V-26 : Courbes des débits du déversoir non rectiligne avec creusement symétrique ( $d'/P=0.4$ ) comparée à celle du déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur.....	142
Figure V-27 : Modèle du déversoir en labyrinthe développé (D11).....	143

Figure V-28 : Courbes des débits du déversoir en labyrinthe développé ( $d/P=0$ ) comparée à celle du déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur...	144
Figure V-29 : Forme en plan triangulaire.....	147
Figure V-30 : Forme en plan trapézoïdale.....	147
Figure V-31 : Forme en plan rectangulaire.....	147
Figure V-32 : Courbes des débits du déversoir en labyrinthe développé rectangulaire comparée à celle du déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur....	148
Figure V-33 : Courbes des débits du déversoir en labyrinthe développé triangulaire comparée à celle du déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur...	149
Figure V-32 : Courbes des débits du déversoir en labyrinthe développé trapézoïdale comparée à celle du déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur...	150
Figure V-35: Modèle D03 (sans socle) .....	153
Figure V-36: Modèle D03 (avec socle).....	153
Figure V-37 : Coefficients de débit en fonction de l'emplacement du déversoir non rectiligne creusé D03 ( $d'$ amont = $d'$ aval).....	153
Figure V-38: Modèle A03 (sans socle) .....	154
Figure V-39: Modèle A03 (avec socle).....	154
Figure V-40 : Coefficients de débit en fonction de l'emplacement du déversoir non rectiligne creusé D04.....	154
Figure V-41: Modèle D05 (sans socle).....	155
Figure V-42: Modèle D05 (avec socle).....	155
Figure V-43: Coefficients de débit en fonction de l'emplacement du déversoir non rectiligne creusé D05 .....	155
Figure V-44 : Ecoulement libre.....	156
Figure V-45 : Présence des corps flottants.....	156
Figure V-46 : Ecoulement après l'évacuation des corps flottants.....	156
Figure V-47: Coefficients du débit en fonction de l'effet des corps flottants sur la performance du déversoir non rectiligne creusé.....	157
Figure V-48: Forme d'entrée plan.....	158
Figure V-49: Forme d'entrée en arc.....	158
Figure V-50: Courbes du débit en fonction de la forme d'entrée en amont.....	159
Figure V-51: Coefficients du débit en fonction de la forme d'entrée en amont.....	159
Figure V-52: Courbes de débit en fonction du ratio ( $d'/P$ ).....	161

Figure V-53: Coefficient de débit en fonction des modèles avec ratio ( $d/P \leq 0.27$ ).....	162
Figure V-54: Coefficient de débit en fonction des modèles avec ratio ( $d/P \geq 0.27$ ).....	163
<b>Chapitre VI : Analyse numérique et statistique</b>	
Figure VI-01 : L'interface de Minitab 17.....	170
Figure VI-02 : Menu de Régression – Minitab 17.....	171
Figure VI-03 : Introduction des données.....	172
Figure VI-04: Application de l'analyse par régression multiple.....	173
Figure VI-05: introduction du variable de réponse et les variables prédicateurs.....	173
Figure VI-06: Rapport de création du modèle (déversoir non rectiligne creusé).....	174
Figure VI-07: Rapport de l'ajustement de $C_w$ (th) avec $C_w$ (exp) du déversoir non rectiligne creusé .....	175
Figure VI-08: Courbes de $C_w$ , expérimentales, théoriques et ajustés en fonction de ( $h^*/P$ ) modèle D02.....	176
Figure VI-09: Courbes de $C_w$ , expérimentales, théoriques et ajustés en fonction de ( $h^*/P$ ) modèle D03.....	176
Figure VI-10: Courbes de $C_w$ , expérimentales, théoriques et ajustés en fonction de ( $h^*/P$ ) modèle D06.....	177
Figure VI-11: Courbes de $C_w$ , expérimentales, théoriques et ajustés en fonction de ( $h^*/P$ ) modèle D07.....	177
Figure VI-12: Courbes de $C_w$ , expérimentales, théoriques et ajustés en fonction de ( $h^*/P$ ) modèle D08.....	178
Figure VI-13: Courbes de $C_w$ , expérimentales, théoriques et ajustés en fonction de ( $h^*/P$ ) modèle D09.....	178

# LISTE DES TABLEAUX

TITRE	PAGE
<b>PREMIERE PARTIE</b>	
<b>Chapitre I : Aperçu sur les déversoirs traditionnels « rectilignes et non rectilignes »</b>	
Tableau I-01: Classification générale des déversoirs.....	7
Tableau I-02: Valeurs du coefficient $\beta$ pour différentes valeurs de l'angle du déversoir.....	19
Tableau I-03: Détermination du type d'écoulement pour le déversoir à crête épaisse.....	21
<b>Chapitre III : Aperçu sur les nouveaux déversoirs non rectilignes</b>	
Tableau III-01: Résultats expérimentaux du déversoir fractal (EDF 2009).....	77
Tableau III-02: Débits évacués par les différents évacuateurs de crues.....	82
<b>DEUXIEME PARTIE</b>	
<b>Chapitre IV : Analyse dimensionnelle appliquée aux déversoirs rectilignes et déversoirs non rectilignes</b>	
Tableau IV-01 : Les grandeurs physiques et leurs unités.....	92
Tableau IV-02 : Quelques nombres adimensionnels rencontrés en mécanique des fluides	99
Tableau IV-03: Liste des paramètres et leurs dimensions (déversoir en mince paroi).....	100
Tableau IV-04 : Liste des paramètres et leurs dimensions (déversoir creusé).....	106
<b>Chapitre V : Etude comparative et expérimentale sur modèles réduits</b>	
Tableau V-01: Caractéristiques géométriques des modèles expérimentés.....	120
Tableau V-02 : Tableau récapitulatif des résultats obtenus.....	145
Tableau V-03 : Tableau récapitulatif des résultats obtenus (différentes formes en plan).....	151
<b>Chapitre VI : Analyse numérique et statistique</b>	
Tableau VI-01: Erreurs relatives maximales et moyennes entre $C_w \text{ exp} - C_w \text{ th} - C_w \text{ ajus}$	179

# NOTATIONS

**a** : Largeur de l'alvéole amont (m)

**A** : Section de l'écoulement dans le bassin de simulation (m<sup>2</sup>)

**a/b** : (Paramètre adimensionnelle) rapport de l'alvéole amont sur l'alvéole aval

**A<sub>c</sub>** : Surface de la chambre du fond (m<sup>2</sup>)

**b** : Largeur du déversoir (m)

**B** : Longueur de la paroi latérale du déversoir (m)

**B/B'** : Longueurs relatives des parois

**B'** : Largeur de la base du déversoir (m)

**C<sub>d</sub>** : Coefficient de débit

**C<sub>D</sub>** : Coefficient de frottement

**c<sub>e</sub>** : Coefficient de correction

**C<sub>L</sub>** : Coefficient de portance

**C<sub>P</sub>** : Coefficient de pression

**C<sub>w</sub> théorique** : Coefficient théorique de débit du déversoir

**C<sub>w</sub>** : Coefficient expérimental de débit du déversoir

**C<sub>wajust</sub>** : Coefficient ajusté de débit du déversoir

**d** : Longueur du porte à faux aval (m)

**d'<sub>amont</sub>** : Profondeur de creusement de l'alvéole amont (m)

**d'<sub>aval</sub>** : Profondeur de creusement de l'alvéole aval (m)

**d'/P** : Rapport de la profondeur de creusement de l'alvéole à la hauteur maximale du déversoir

**D** : Hauteur maximale aval du déversoir (m)

**Fg** : La force nette manifestée par le poids du godet et la base (Newton)

**Fr** : Nombre de Froude

**g** : Accélération de l'apesanteur (m/s<sup>2</sup>)

**h** : Charge piézométrique mesurée (mce)

**H** : Hauteur maximale des parois ( $H=2P/3$ ) (m)

**H'** : Hauteur maximale des parois latérales  $H' = [2(P - d')/3]$  (m)

**h\*** : Charge totale sur le seuil du déversoir (mce)

**H\*/P** ou **h\*/P** : (Paramètre adimensionnelle) charge relative

**$h_c$**  : Charge cinétique (mce)  
 **$H_d$**  : Hauteur piézométrique en aval (mce)  
 **$H_o$**  : Charge totale de chute (mce)  
 **$H_v$**  : Charge cinétique d'approche en amont (mce)  
 **$H_w$**  : Profondeur d'eau dans le puits (mce)  
 **$L$**  : Longueur développée du déversoir ( $L=a+b+2B$ ) (m)  
 **$L/W$**  : (paramètre adimensionnelle) rapport de la longueur développée sur la largeur du déversoir  
 **$L_c$**  : longueur de la crête de la hausse fusible (m)  
 **$L_w$**  : Longueur du puits (m)  
 **$Ma$**  : Nombre de Mach  
 **$P$**  : Hauteur maximale amont du déversoir (m)  
 **$Q$**  : Débit évacué ( $m^3/s$ )  
 **$q$**  : Performance du déversoir expérimenté  
 **$Q_{cr}$**  : Débit calculé pour un déversoir rectiligne à mince paroi ( $m^3/s$ )  
 **$R$  carré (ajust)** : Ecart type ajusté  
 **$R$  carré**: Ecart type  
 **$r$**  : Rapport de quantité du prototype (m)  
 **$Re$**  : Nombre de Reynolds  
 **$t$**  : Epaisseur des parois (m)  
 **$v$**  : Vitesse d'écoulement (m/s)  
 **$V_b$**  : Volume d'eau dans le godet ( $m^3$ )  
 **$V_c$**  : Volume du matériau dans la base ( $m^3$ )  
 **$V_s$**  : Volume du matériau dans le godet ( $m^3$ )  
 **$W$**  : Largeur du déversoir (m)  
 **$W/P$**  : (Paramètre adimensionnelle) rapport de la largeur totale sur la hauteur du déversoir  
 **$We$**  : Nombre de Weber  
 **$w_i$**  : Largeur du déversoir ( $w=a+b$ ) (m)  
 **$W_w$**  : Largeur du puits (m)  
 **$Y_b$**  : Bras de levier de la force de l'eau dans le godet (m)  
 **$Y_C$**  : Bras de levier du matériau dans la base (m)  
 **$Y_g$**  : Bras de levier de la base et du godet (m)

$Y_s$  : Bras de levier du matériau dans le godet (m)

$Y_u$  : Bras de levier au centre de gravité de la pression (m)

$Y_w$  : Bras de levier de la force de l'eau dans le puits (m)

$\gamma$  : Rapport de capacité thermique

$\Delta h$  : Différence de charge (mce)

$\Delta H$  : Perte d'énergie (mce)

$\varepsilon/L$  : Rugosité adimensionnelle

$\bar{H}$  : Charge amont sur le déversoir (mce)

$\bar{C}_d$  : Coefficient de débit

$\bar{h}_0$  : Hauteur d'eau sur le déversoir (mce)

$\bar{w}$  : Hauteur de pelle (m)

$\alpha$  : Angle du mur (degré)

$(\Delta p + \rho Z)$  : La pression piézométrique (mce)

$\rho_w$  : Densité de l'eau

$\rho_c$  : Densité du matériau dans la base

$\rho_s$  : Densité du matériau dans le godet

$\mu$  : Coefficient de débit d'un déversoir standard de type Creager ( $\mu=0.47-0.49$ )

# ABREVIATIONS

**A.B.H.S.M.D** : Agence du Bassin Hydraulique de SOUSS MASSA- Maroc

**A.N.B.T** : Agence Nationale des Barrages et Transferts - Algérie

**E.A.U.R.M.C** : Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse - France

**EDF** : Electricité de France

**HYDROCOOP** : Association d'expertise en barrages - France

**HYDROPLUS** : Société française des concessions et de la construction - France

**I.C.O.L.D** : Commission internationale des grands barrages - France

**IRSTEA** : Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et  
l'agriculture - France

**LAHE** : Laboratoire aménagements hydrauliques et environnement – université de Biskra -  
Algérie

# **Introduction Générale**

## INTRODUCTION GENERALE

Parmi les principaux ouvrages annexes des barrages, on distingue ; la vidange de fond, le tour de prise d'eau et l'évacuateur de crues .....Etc. La vidange de fond assure la vidange totale ou partielle de la retenue, par contre le tour de prise d'eau permet l'exploitation de la retenue, tandis que **le déversoir ou évacuateur de crue** est une structure construite pour mesurer le débit, dériver ou évacuer l'eau retenue derrière un vannage ou barrage fixe, il permet le passage des crues exceptionnelles sans incident et sans que le barrage soit submergé **(LAVALLEE and al., 2000)**.

Les risques majeurs technologiques liés à l'eau ; la rupture des barrages, sont généralement dus à l'insuffisance de la capacité d'évacuation des déversoirs **(DEGOUTTE, 1993)**. Afin d'améliorer la sécurité des barrages, plusieurs types des déversoirs sont inventés, tels que les déversoirs rectilignes et les déversoirs non rectilignes.

Lorsque le seuil d'un déversoir est en alignement rectiligne, ce type de déversoir est appelé déversoir rectiligne, tandis que le déversoir non rectiligne se caractérise par son alignement non rectiligne **(BARCOUDA et al., 2006)**.

Les déversoirs rectilignes font l'objet de plusieurs travaux de recherche en comparaison avec les déversoirs non rectilignes, notamment les déversoirs non rectilignes en labyrinthe développés.

Les déversoirs non rectilignes creusés sont à l'origine des déversoirs non rectilignes en labyrinthe développés, mais ils sont caractérisés par un creusement vertical de ses alvéoles. Dans ce sens, trois modèles de conception du déversoir non rectilignes creusés ont été sélectionnés. Le premier se caractérise par un creusement symétrique de ses alvéoles, le second modèle se caractérise par un creusement unique en aval de ses alvéoles. Tandis que la troisième configuration se caractérise par un creusement unique d'alvéoles amont **(MACHIELS and al., 2012)**.

Le présent travail s'est intéressé en général à la comparaison théorique & expérimentale entre les déversoirs rectilignes en mince paroi et les déversoirs non rectilignes en labyrinthe développés afin de vérifier l'écart de la capacité d'évacuation entre eux.

Ainsi, nous tenterons d'examiner un type des déversoirs non rectilignes en labyrinthe développés; le déversoir non rectiligne creusé par voie analytique, expérimental et numérique, afin d'optimiser sa configuration géométrique, de vérifier l'impact de sa géométrie sur son

rendement et de proposer des expressions générales approchées qui permettent de déterminer le débit qui transite par ce type des déversoirs.

À cet effet, le présent travail est scindé en deux parties, chaque partie englobe trois chapitres :

**La première partie** présente une recherche bibliographique et théorique sur les différents types d'évacuateurs de crues, elle est répartie comme suit :

- Le premier chapitre présente un aperçu sur les anciens déversoirs ; les déversoirs traditionnels « rectilignes et non rectilignes », ses caractéristiques géométriques et leurs fonctionnements hydrauliques.

- Le deuxième chapitre, est considéré comme un état d'art sur les déversoirs auto-stables (nouvelle technologie), il est consacré sur une recherche approfondie sur les déversoirs auto-stables, notamment le système des hausses fusibles et les dispositifs fusibles, afin de mieux comprendre ses caractéristiques géométriques, leurs dimensionnements, leurs modes de fonctionnement hydrauliques et ses avantages.

- Le troisième chapitre, présente une recherche bibliographique et théorique sur les déversoirs en labyrinthe développés afin de mieux comprendre l'influence de ses paramètres géométriques, ses fonctionnements et leurs rendements du point de vue hydraulique.

**La deuxième partie** présente une étude comparative entre les déversoirs rectilignes et les déversoirs non rectilignes par voie analytique, expérimentale & numérique.

Cette partie englobe les trois chapitres suivants:

- Dans le quatrième chapitre, nous tenterons d'examiner par voie analytique les paramètres adimensionnels régissant l'écoulement sur les déversoirs rectilignes en mince paroi et les déversoirs non rectilignes creusés.

- Nous expliquons dans le cinquième chapitre les résultats expérimentaux obtenus sur :

- La comparaison entre les déversoirs non rectilignes creusés et les déversoirs en mince paroi de même largeur;
- La comparaison entre les déversoirs non rectilignes en labyrinthe développés (forme en plan) et les déversoirs en mince paroi de même largeur;
- Etude expérimentale sur modèles réduits des déversoirs non rectilignes creusés.

- En sixième chapitre, on explique une analyse numérique et statistique des résultats expérimentaux obtenus sur les déversoirs non rectilignes creusés. En utilisant un logiciel développé de statistique MINITAB 17, en basons sur la méthode de régression multiple et les paramètres adimensionnels afin de proposer des relations théoriques générales approchées qui expriment la capacité d'évacuation de ce type de déversoir.

# **Partie I**

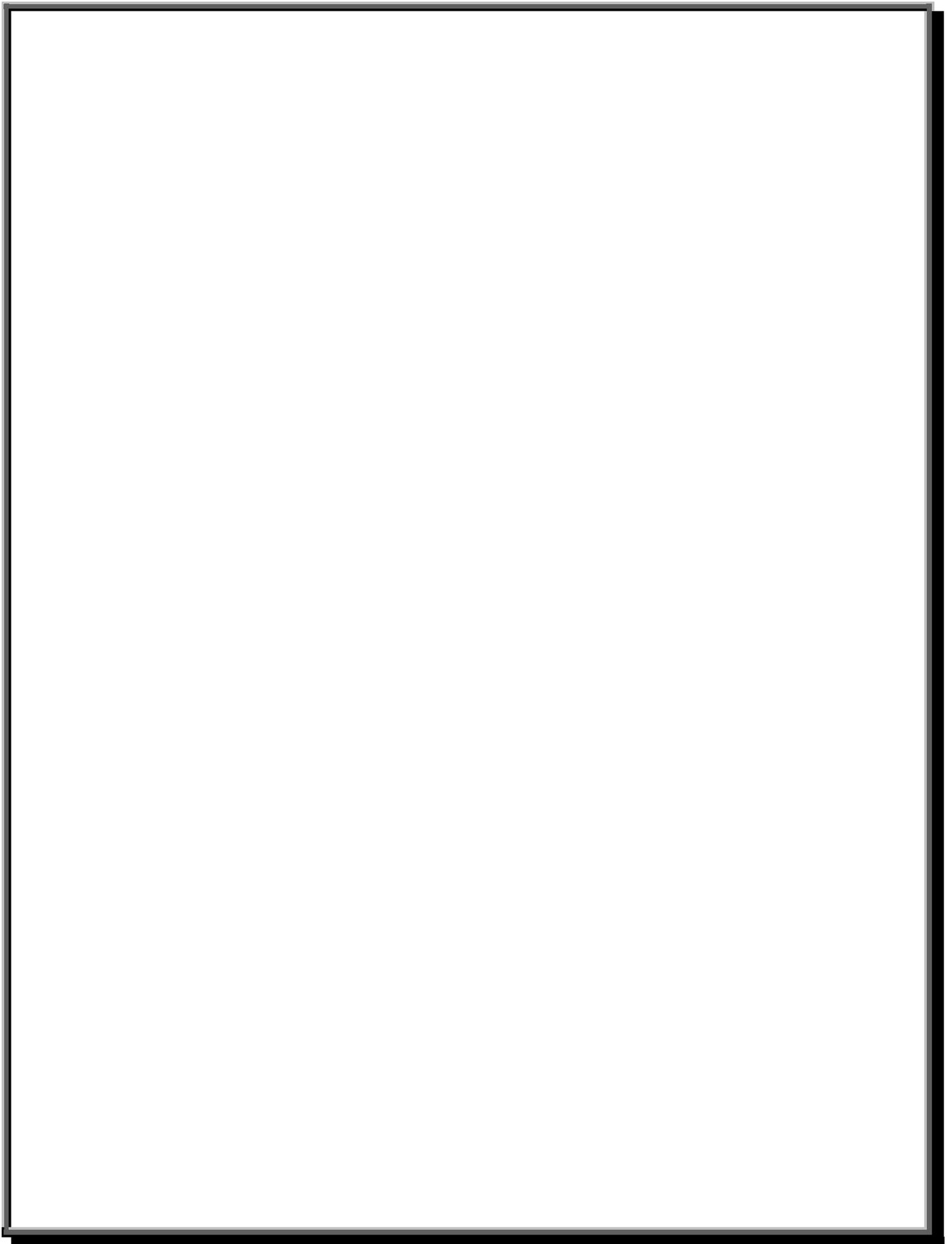
## **Etude Théorique**

# Chapitre I :

Aperçu Sur les

Déversoirs traditionnels

« Rectilignes & non  
rectilignes »



## CHAPITRE I

### APERÇU SUR LES DEVERSOIRS TRADITIONNELS

#### « RECTILIGNES ET NON RECTILIGNES »

### I-1 INTRODUCTION

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

Trois grandes classes d'ouvrages hydrauliques, considérés comme des singularités hydrauliques, sont fréquemment rencontrés : les vannes, les barrages et les déversoirs. Les ouvrages hydrauliques sont nombreux et génèrent des phénomènes particuliers, difficilement maîtrisables sans une connaissance approfondie de leurs caractéristiques et de leurs fonctions hydrauliques précises (**LAVALLEE and al., 2000**).

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

L'utilisation des déversoirs remonte probablement au moins aux premiers grands aménagements hydrauliques de l'antiquité. Au moyen Âge, l'utilisation croissante des moulins à eau, en complément des moulins à vent impliquait le contrôle des débits, par l'utilisation de vannages, de seuils et de déversoirs pour absorber et étaler d'éventuelles crues brutales (**CAMPUS, 1956**).

À cet effet, l'objectif visé par ce chapitre est de présenter un aperçu sur les anciens déversoirs ; les déversoirs traditionnels « rectilignes et non rectilignes », ses caractéristiques géométriques et leurs fonctionnements hydrauliques.

## I-2 CHAMPS D'UTILISATION DES DEVERSOIRS

Les barrages ne sont pas conçus en principe pour être surmontés par les crues qui risqueraient de les ébranler et de les affouiller à leur base. Il faut que celles-ci soient évacuées par un dispositif spécial. Ce sera généralement un déversoir superficiel placé latéralement au barrage. Un déversoir ou évacuateur de crue est une structure construite pour mesurer le débit, dériver ou évacuer l'eau retenue derrière un vannage ou barrage fixe, dont la hauteur excèderait une certaine limite (DEGOUTTE, 1993).



Figure I-01 : Essai de mesure de débit par un déversoir – France (E.A.U.R.M.C)



Figure I-02 : Évacuateur de crues – Barrage Bou-Hanifia – Algérie (A.N.B.T)

**I-3 DIFFERENTS TYPES DES DEVERSOIRS**

On peut classifier les déversoirs, selon plusieurs critères spécifiques (le contrôle du déversement, mode de fonctionnement, le régime d'écoulement, l'alignement de la crête...etc), comme il est indiqué dans le tableau suivant :

<b>Principe de classement</b>	<b>Type de déversoir</b>	<b>Exemples</b>
<b>Le contrôle de déversement</b>	Contrôlé	Déversoir vanné
	Non contrôlé	Déversoir circulaire
<b>L'alignement de la crête du déversoir</b>	Rectiligne	<i>Déversoir à seuil épais</i>
		<i>Déversoir en mince paroi</i>
	Non rectiligne	<i>Déversoir en labyrinthe développé</i>
		<i>Déversoir en labyrinthe traditionnel</i>
<b>Le régime d'écoulement sur le seuil du déversoir</b>	À seuil libre	Déversoir latéral
		Déversoir de type Bec de Canard
	En charge	Déversoir en siphon
		Déversoir en tulipe
<b>Le mode de fonctionnement du déversoir</b>	Stable	Déversoir Creager
	Auto-stable	Déversoir en Hausses fusibles

**Tableau I-01 : Classification générale des déversoirs (PALLU et al., 2010)**

#### I-4 APERÇU SUR LES DEVERSOIRS RECTILIGNES

Lorsque le seuil d'un déversoir est en alignement rectiligne, ce type de déversoir est appelé déversoir rectiligne (figure I-03). Le débit qui transite sur un déversoir rectiligne est étroitement lié à la largeur du déversoir  $W$  et la charge sur le seuil  $h$  (SINNINGER et al., 1989).

Deux types de déversoir sont distingués selon le rapport entre la hauteur de la charge ( $h$ ) sur la crête et l'épaisseur de la crête ( $e$ ). Le déversoir est dit mince lorsque  $h > 2*e$  et épais lorsque  $h < 1.5*e$  (zone de transition dans la gamme  $1.5*e < h < 2*e$ ). Les deux types de déversoir se différencient en termes de coefficient de débit et de sensibilité à l'envoie par l'aval.

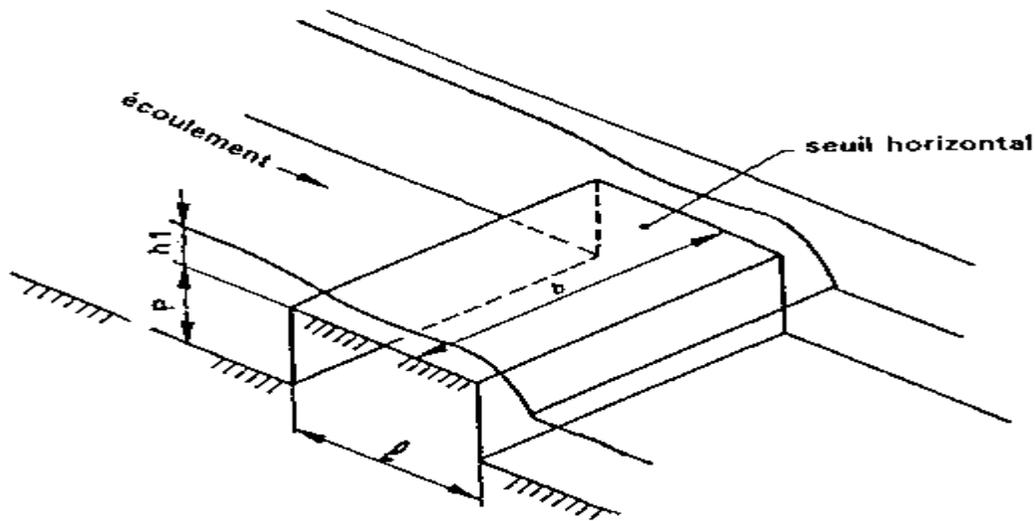


Figure I-03: Schéma d'un déversoir rectiligne

##### I-4-1 DEVERSOIR STANDARD (CREAGER)

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

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

$$Q = C_d b \sqrt{2gH^{3/2}} \quad (\text{I-01})$$

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

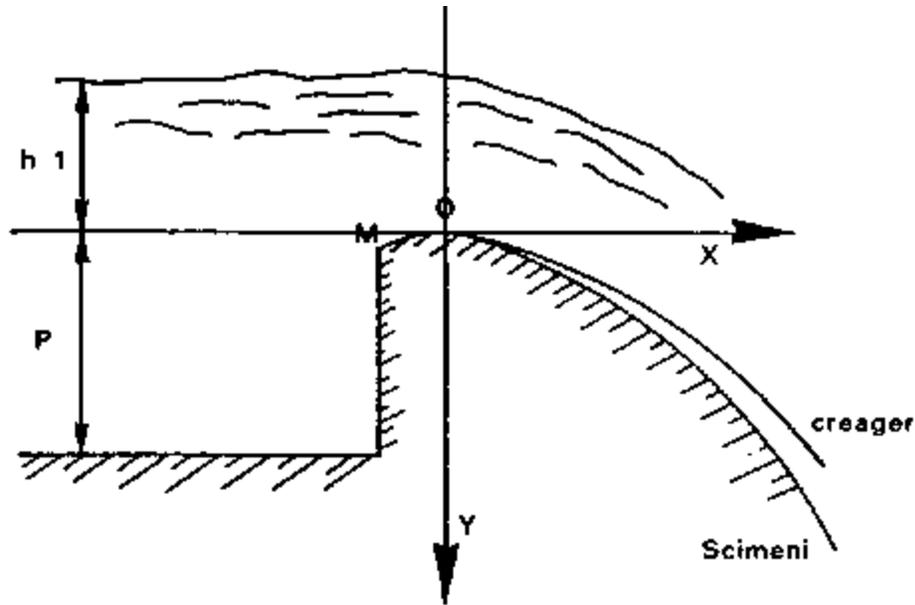


Figure I-04 : Coupe transversal du déversoir standard (Creager)

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

- Quand la charge sur le seuil du déversoir standard est inférieure à la charge de dimensionnement ( $H/H_d < 1$ ), le déversoir standard est considéré comme surdimensionné et les pressions sur le radier sont plus fortes mais positives, donc acceptable. Dans ces conditions d'écoulement, le coefficient de débit diminue ( $C_d < C_{dD}$ );  $H / H_d \rightarrow 0$ ;  $C_d \rightarrow 0,385$ .
- Quand la charge atteint une grandeur égale à la charge de dimensionnement ( $H_D$ ), ( $H/H_d = 1$ ), l'écoulement sur le déversoir standard correspond à celui d'un déversoir en mince paroi. Dans ces conditions la pression sur le radier est négligeable est le coefficient de débit atteint sa valeur maximale  $C_d = C_{dD} = 0,494$ .
- Quand la charge sur le seuil dépasse la charge de dimensionnement ( $H/H_d > 1$ ), le déversoir standard est considéré comme sous dimensionné. Ainsi, les pressions sur le radier deviennent négatives (risque de cavitation si  $H/H_D > 1,4$  ou l'écoulement se sépare du déversoir). Cependant, le coefficient de débit augmente ( $C_d > C_{dD}$ ). En pratique des valeurs de  $H/H_D = 1.1$  à  $1.3$  sont acceptées (SINNINGER., 1988).

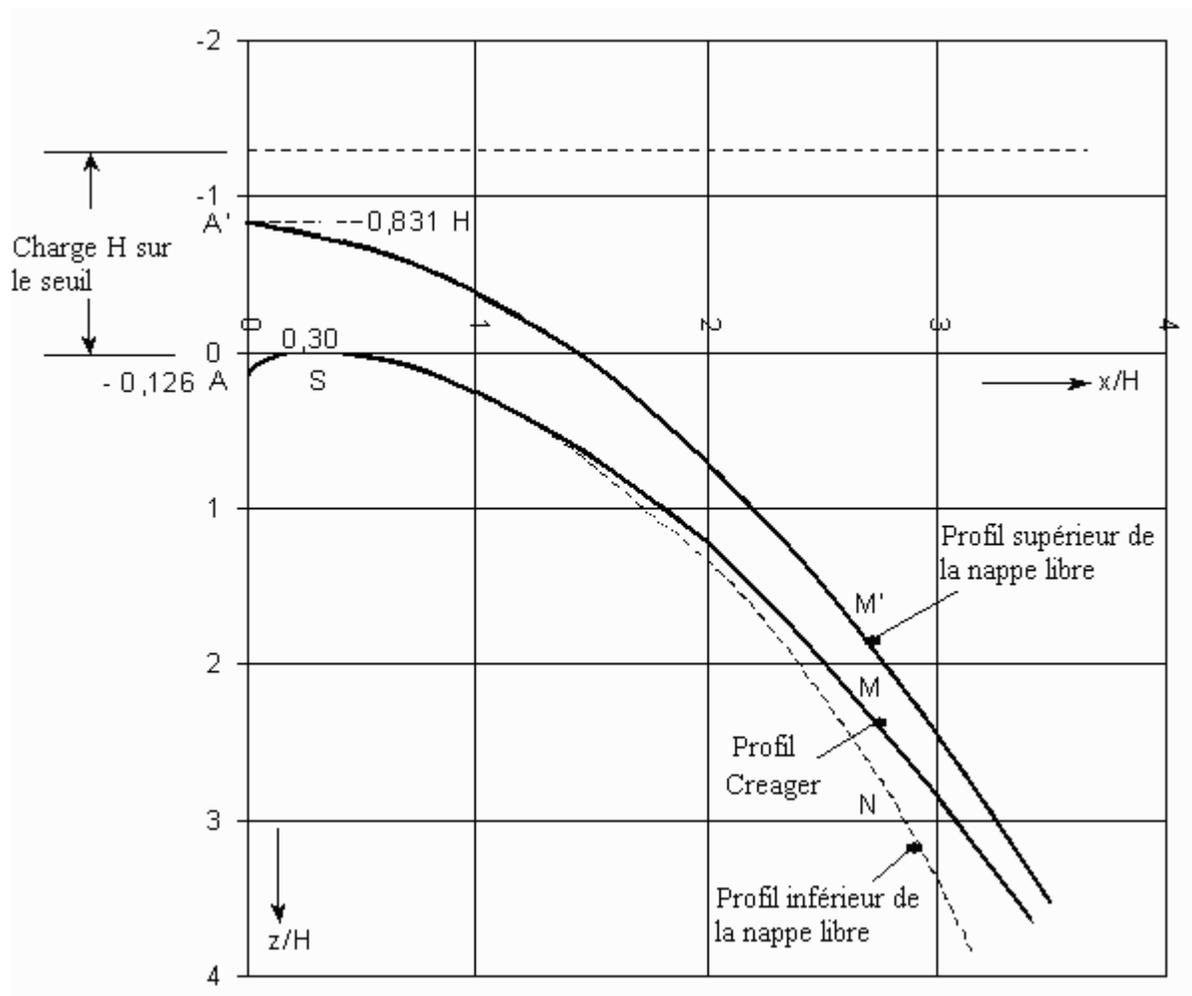


Figure I-05: Nappe libre et profil géométrique du déversoir type Creager (SINNINGER., 1988).

#### I-4-2 DEVERSOIR EN MINCE PAROI

Ce type de déversoir constitue une structure qui permet de mesurer le débit qui transite par cet organe. Si la paroi mince est placée verticalement dans un canal rectangulaire prismatique et la nappe inférieure étant suffisamment aérée, cette structure est appelée déversoir en mince paroi standard. Un tel déversoir est caractérisé par la hauteur de pelle ( $\bar{w}$ ) du fond du canal jusqu'à la crête, sa largeur ( $b$ ) et sa hauteur d'eau amont ( $\bar{h}_0$ ) (SINNINGER et al., 1989).

Selon (BERNOULLI., 1738) la charge amont sur le déversoir est :

$$\bar{H} = h_0 + \frac{Q^2}{2gb^2(h_0 + \bar{w})^2} \quad (\text{I-02})$$

Où :

$\bar{H}$  : Charge amont sur le déversoir (m)

$h_0$  : Hauteur d'eau sur le déversoir (m)

$b$  : Largeur du seuil du déversoir (m)

$\bar{w}$  : Hauteur de pelle (m)

$Q$  : Débit de transit (m<sup>3</sup>/s)



Figure I-06: Déversoir en mince paroi à échancrure triangulaire - France (E.A.U.R.M.C)

#### I-4-2-1 Régime d'écoulement sur les déversoirs en mince paroi

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

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

Où :

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

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

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

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

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

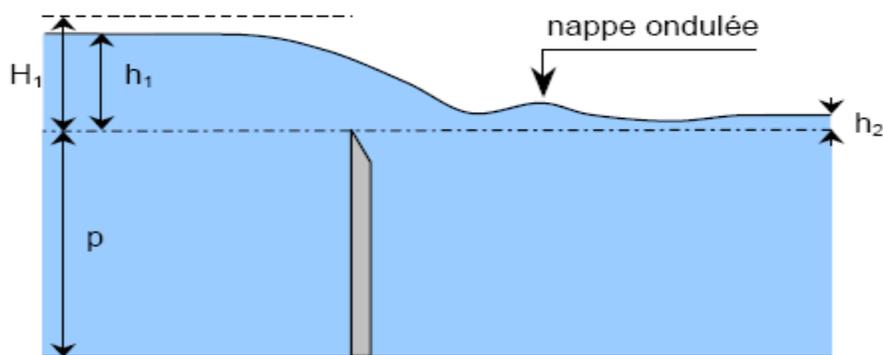
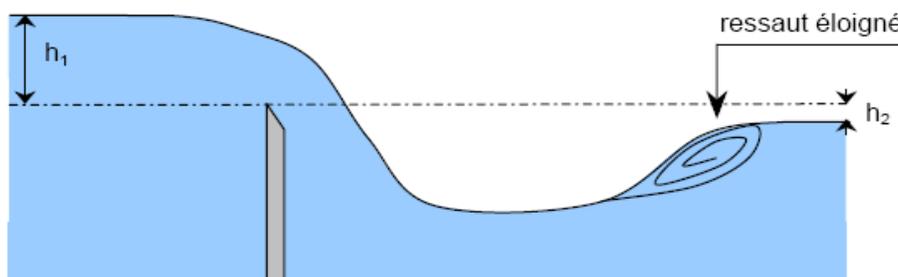


Figure I-07 : Coupe longitudinale d'un déversoir à crête mince en écoulement noyé

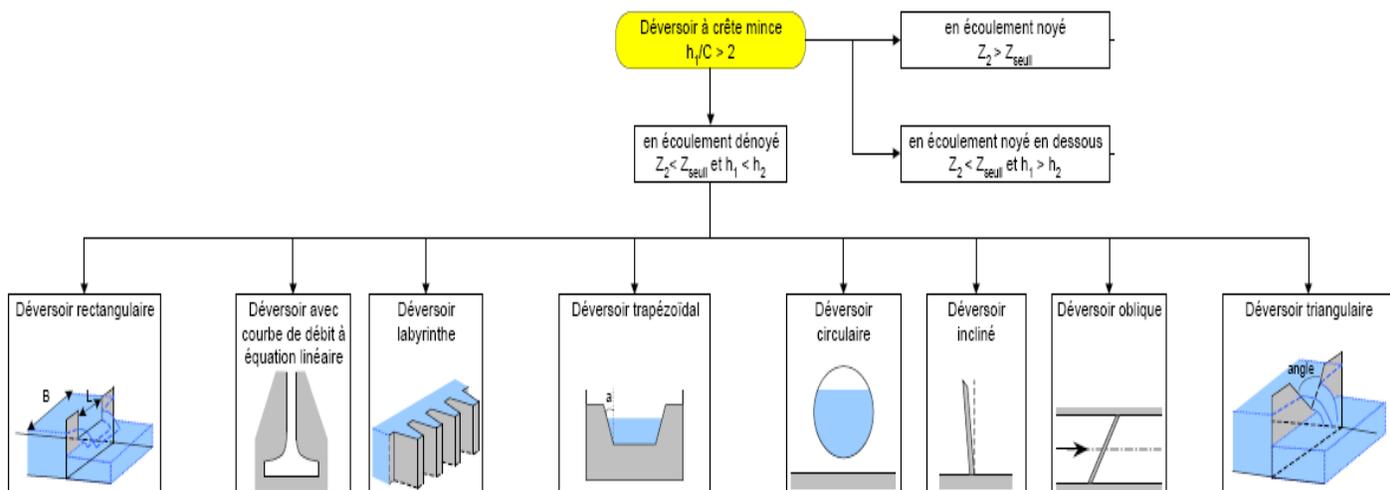


**Figure I-08 : Déversoir à crête mince en écoulement noyé en dessous à ressaut éloigné**

**I-4-2-2 Types des déversoirs en mince paroi**

Les déversoirs en mince paroi se différencient comme suit : (LADREYT et al., 2005)

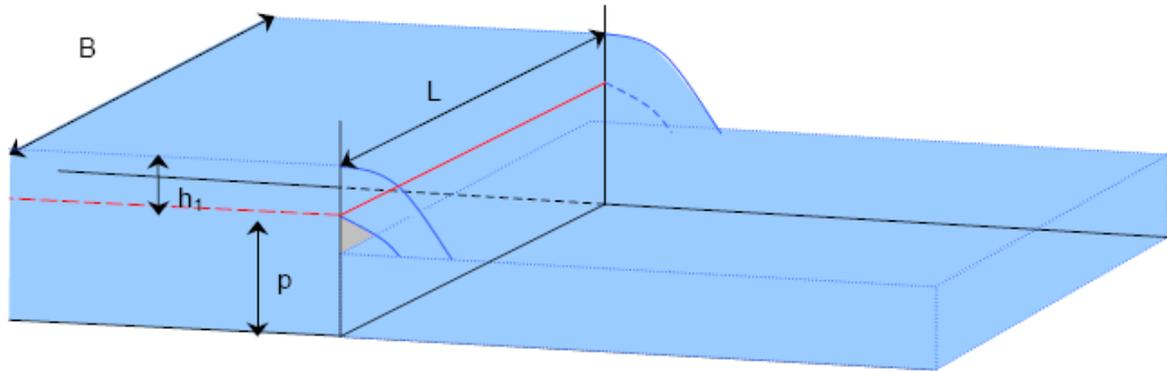
- Déversoir sans contraction latérale
- Déversoir avec contraction latérale
- Déversoir à échancrure triangulaire
- Déversoir trapézoïdal
- Déversoir circulaire
- Déversoir incliné
- Déversoir oblique



**Figure I-09 : Les différents types du déversoir en mince paroi**

• ***Déversoir rectangulaire sans contraction latérale***

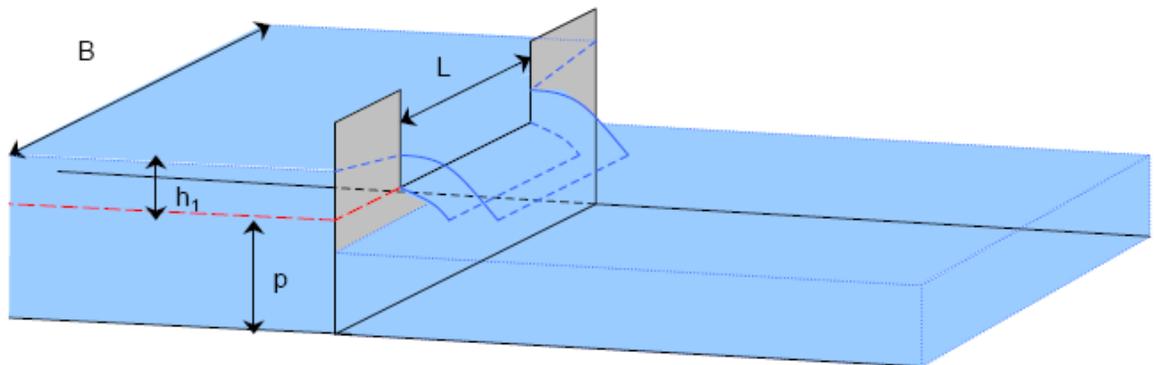
Un déversoir rectangulaire est dit « sans contraction latérale » lorsque la largeur d'écoulement sur le déversoir ( $L$ ) est égale à la largeur d'écoulement ( $B$ ) en amont du déversoir.



**Figure I-10 : Vue en perspective d'un déversoir rectangulaire sans contraction latérale**

- *Déversoir rectangulaire avec contraction latérale*

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



**Figure I-11 : Vue en perspective d'un déversoir rectangulaire avec contraction latérale**

- *Déversoir à échancrure triangulaire*

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

$$Q = C_e \frac{8}{15} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \sqrt{2gh_e}^{2/5} \quad (\text{I-03})$$

Où:

Q : débit (m<sup>3</sup>/s)

C<sub>e</sub> : coefficient de débit

g: accélération de la pesanteur (m/s<sup>-2</sup>)

θ; l'angle formé par les parois de l'échancrure (°)

h<sub>e</sub> : hauteur de la surface liquide amont par rapport au point bas de l'échancrure (m).

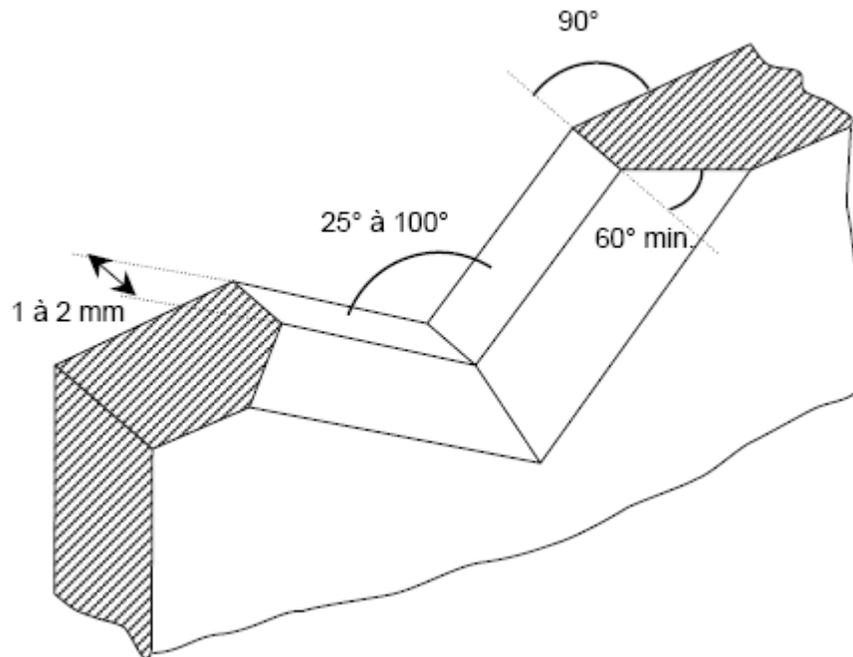


Figure I-12 : Forme de la crête d'un déversoir à échancrure triangulaire

- **Déversoir trapézoïdal**

Si l'échancrure du déversoir à la forme d'un trapèze isocèle évasé vers le haut, le débit s'écoulant au travers de cette section trapézoïdale peut être déterminé par une formule ne dépendant pas du coefficient de débit.

D'après *Gourley et Grimp* l'expression du débit pour une valeur quelconque de l'angle  $\alpha$  d'inclinaison pour un déversoir trapézoïdal isocèle est donnée par la relation suivante :

$$Q=1.32h^{2.47} \operatorname{tg}\alpha+1.96w^{1.02} h^{1.47} \quad (\text{I-04})$$

Où:

W : largeur de la petite base du trapèze (m)

$\alpha$  : L'angle entre la verticale et le côté du trapèze ( $^{\circ}$ )

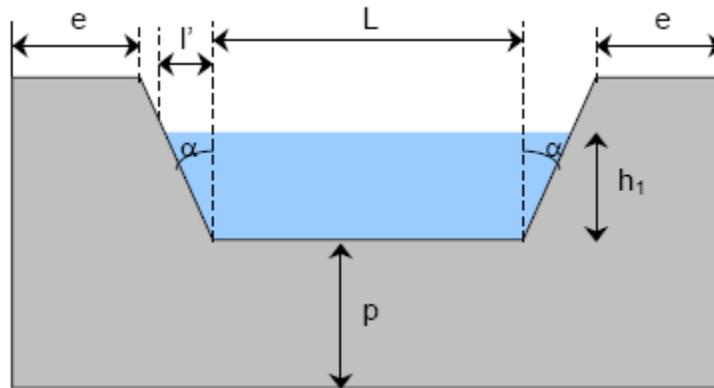


Figure I-13 : Coupe transversale d'un déversoir trapézoïdal

- **Déversoir circulaire**

Ce type de déversoir, assez similaire à un écoulement de type orifice du point de vue géométrique, n'en est pas moins totalement différent du point de vue hydraulique. En effet, ce type de déversoir (figure I-14) comporte une section d'écoulement à surface libre et présente les avantages suivants :

- ✓ simplicité et facilité d'exécution et de mise en place ;
- ✓ facilité de ventilation de la nappe ;
- ✓ une plus grande précision que le déversoir rectangulaire pour la mesure des petits débits.

La formule générale du débit du déversoir circulaire est donnée sous la forme (*Stauss et Von Sanden*):

$$Q=\mu Kd^{5/2} \quad (\text{I-05})$$

Où:

d' : diamètre d'ouverture (m)

K : fonction du degré de remplissage h/d ( $m^{1/2}/s$ ).

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

$$K = 3.203 \left( \frac{h}{d'} \right)^{1.975} - 0.842 \left( \frac{h}{d'} \right)^{3.78} \quad (\text{I-06})$$



Figure I-14 : Déversoir circulaire – Maroc (A.B.H.S.M.D)

- *Déversoir incliné*

Un déversoir incliné (figure I-15) a une crête perpendiculaire à l'axe du canal, mais le plan qui le contient est incliné par rapport à la verticale. En considérant l'angle d'inclinaison ( $i$ ), d'après la théorie de (**BOUSSINESQ., 1871**), le coefficient de débit de ce type de déversoir est égal au produit du coefficient de débit d'un déversoir vertical par un coefficient K :

$$K = 1 - 0,3902 (i/180) \quad (\text{I-07})$$

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

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

$$Q = C_v \mu_1 \sqrt{2g} L h^{3/2} \quad (\text{I-08})$$

$C_v$ : coefficient de vitesse

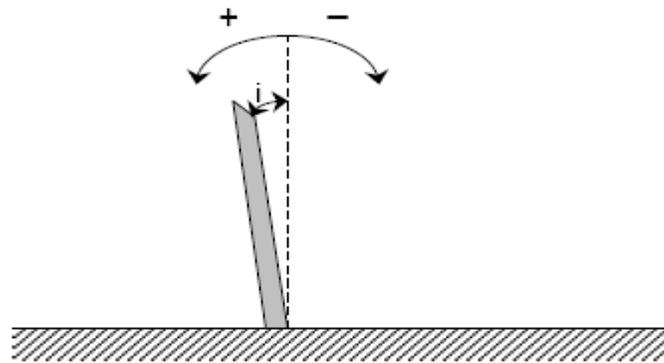


Figure I-15 : Coupe longitudinale d'un déversoir incliné

- **Déversoir oblique**

C'est un déversoir vertical dont la crête est disposée obliquement par rapport à l'axe longitudinal du canal dans lequel il est placé (figure I-16).

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

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

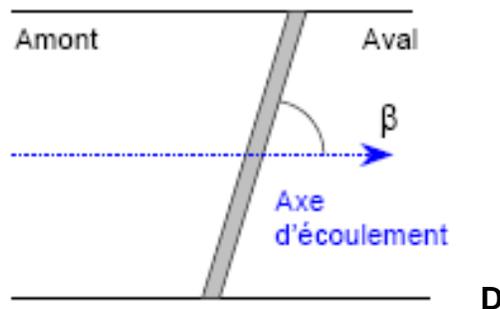


Figure I-16 : Vue en plan d'un déversoir oblique

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

$$Q = [1 - (h\beta/P)] Q_n \quad (I-09)$$

Où:

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

$\beta$  : fonction empirique sans dimension de l'angle  $\varepsilon$ .

$\varepsilon$	$\beta$
$< 15^\circ$	-
$15^\circ$	<b>0.691</b>
$20^\circ$	<b>0.526</b>
$25^\circ$	<b>0.420</b>
$30^\circ$	<b>0.357</b>
$35^\circ$	<b>0.298</b>
$40^\circ$	<b>0.244</b>
$45^\circ$	<b>0.200</b>
$50^\circ$	<b>0.166</b>
$55^\circ$	<b>0.139</b>
$60^\circ$	<b>0.110</b>
$65^\circ$	<b>0.084</b>
$70^\circ$	<b>0.061</b>
$75^\circ$	<b>0.048</b>
$90^\circ$	<b>0</b>

**Tableau I-02 : Valeurs du coefficient  $\beta$  pour différentes valeurs de l'angle d'oblicité du déversoir**  
(LENCASTRE., 1969)

### I-4-3-DEVERSOIR A SEUIL EPAIS (LARGE SEUIL)

Le déversoir est considéré à seuil épais dans le cas où la largeur du seuil est suffisamment grande pour qu'elle assure une forme régulière de la nappe déversante le long du seuil, les filets liquides sont parallèles et horizontaux. Ce type de déversoir à angles vifs, représentés dans la figure (I-17), peut s'imposer notamment pour des phases de construction de barrages. Comparés au déversoir en mince paroi, deux paramètres supplémentaires relatifs à la pente amont ( $\theta$ ) et la longueur de la crête ( $L_c$ ) du déversoir doivent être considérés. Le calcul simplifié introduit le coefficient de correction ( $c_e$ ) dans la formule générale du déversoir en mince paroi. (TISON., 1950).

$$Q = C_d c_e b \sqrt{2gH}^{3/2} \quad (I-10)$$

Où :

Q : Débit évacué ( $m^3/s$ )

$C_d$  : Coefficient de débit

$c_e$  : Coefficient de correction

b : Largeur du déversoir (m)

H : Charge totale sur le déversoir (m)

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

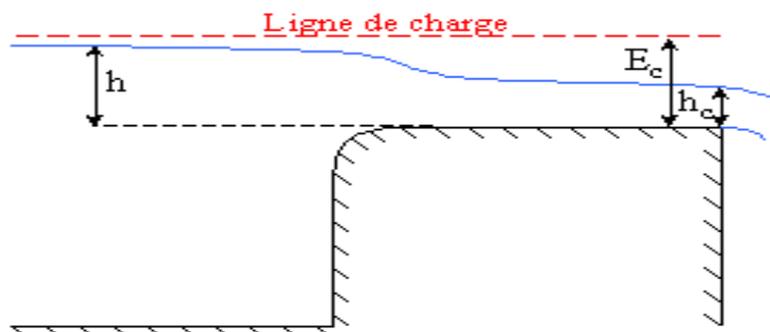


Figure I-17 : Déversoir à seuil épais

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

**I-4-3-1 Régime d'écoulement sur un déversoir à crête épaisse**

Deux types d'écoulement se caractérisent le déversoir à seuil épais, selon le tableau (I-03) :

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

**Tableau I-03 : Détermination du type d'écoulement pour le déversoir à crête épaisse**

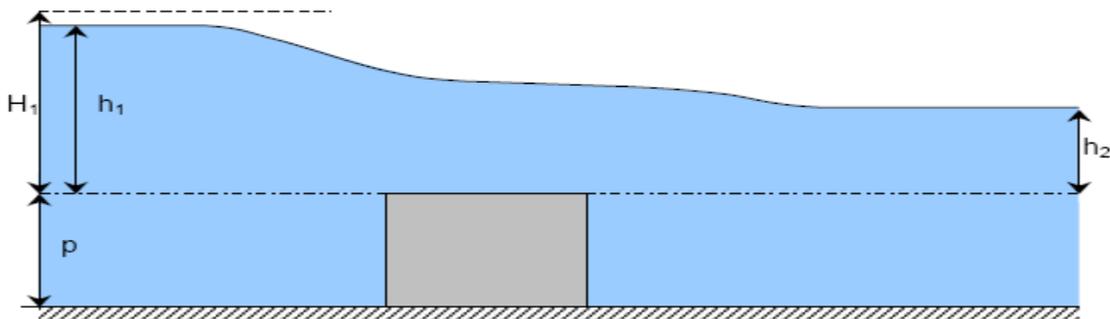
Où :

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

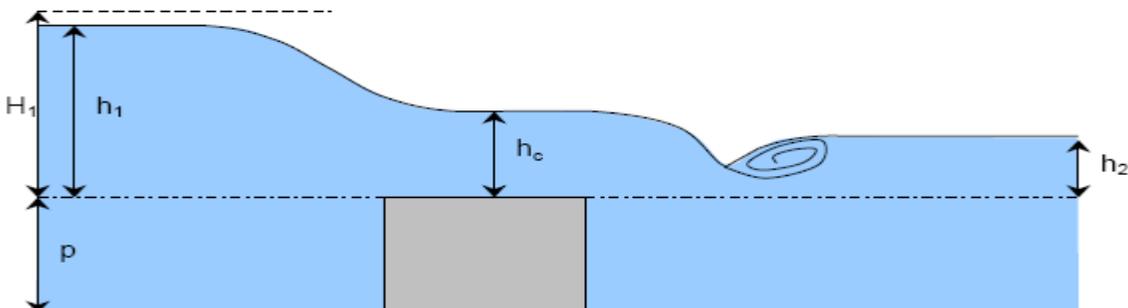
$h_2$  : hauteur d'eau aval par rapport au seuil (m) (au-dessus ou au-dessous de la crête du seuil)

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

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



**Figure I-18 : Coupe longitudinale d'un déversoir à crête épaisse en écoulement noyé**



**Figure I-19 : Coupe longitudinale d'un déversoir à crête épaisse en écoulement dénoyé**

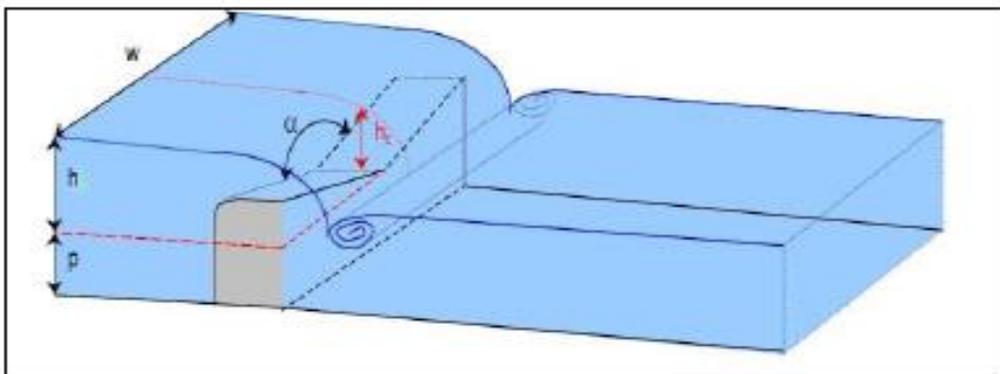
### I-4-3-2 Types des déversoirs à crête épaisse

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

- déversoir de forme triangulaire
- déversoir de section trapézoïdale

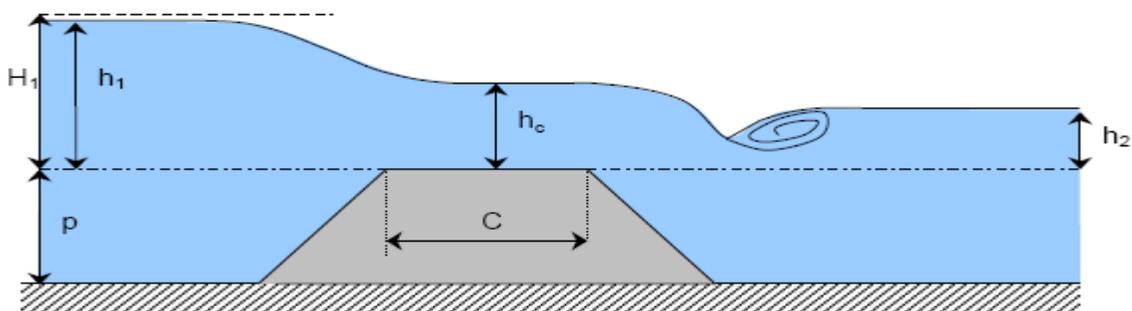
- *Déversoir à seuil épais à profil triangulaire*

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



**Figure I-20 : Vue en perspective d'un déversoir à seuil épais à profil triangulaire**

- *déversoir de section trapézoïdale*



**Figure I-21 : Coupe longitudinale d'un déversoir à crête longitudinale trapézoïdale**  
**I-5 APERÇU SUR LES DEVERSOIRS NON RECTILIGNES - TRADITIONNELS**

Les déversoirs à crête non rectiligne sont caractérisés par un seuil déversant plus long que la largeur de l'emprise du déversoir. Cette caractéristique fait que ce type de déversoir est plus efficace que les déversoirs à crête rectiligne. Les déversoirs non rectilignes regroupent deux principaux types des déversoirs tels que :

- Les déversoirs en labyrinthe traditionnels
- Les déversoirs en en labyrinthe développés (nouvelle technologie)

Dans ce sens, on va expliquer dans cette recherche bibliographique uniquement les déversoirs en labyrinthe traditionnels.

**I-5-1 Le déversoir en labyrinthe traditionnel**

Le déversoir en labyrinthe traditionnel se caractérise par un axe brisé en plan, sous forme d'éléments de formes trapézoïdale, rectangulaire ou triangulaire, répétés périodiquement. Cette disposition augmente vivement la longueur de la crête et par conséquent la capacité d'évacuation qui est plus importante que celle d'un évacuateur de crue rectiligne. Cependant, la discontinuité de l'alignement de la crête conduit à un écoulement complexe au fur et à mesure que la charge sur le seuil du déversoir augmente. Par conséquent, il est conseillé de concevoir ce type d'ouvrage pour des charges moyennes.



**Figure I-22: Vue en plan du déversoir en labyrinthe traditionnel (I.C.O.L.D)**

### I-5-2 Géométrie du déversoir en labyrinthe traditionnel

Les seuils labyrinthes sont en général des murs verticaux assez minces en béton armé épousant en plan une forme polygonale régulière et symétrique, les alvéoles d'entrée et de sortie étant identiques (LEMPERIERE., 2000). La géométrie en plan est définie par les paramètres de longueur, la largeur, par le cycle ( $W$ ), l'angle des murs latéraux ( $\alpha$ ), et le nombre de cycles ( $n$ ). La longueur et la largeur par cycle peuvent être combinées pour former l'accroissement de longueur sans dimensions ( $L/W$ ). La géométrie verticale du labyrinthe est décrite par la hauteur de déversoir ( $P$ ) et le rapport d'aspect vertical ( $W/P$ ).

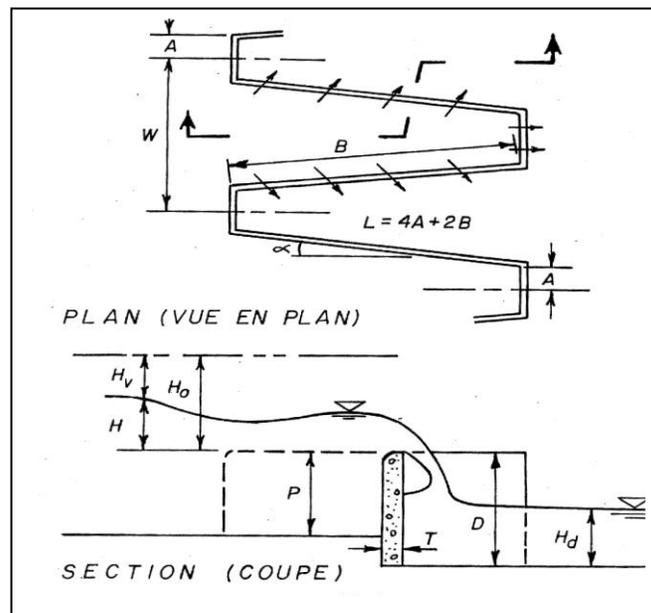
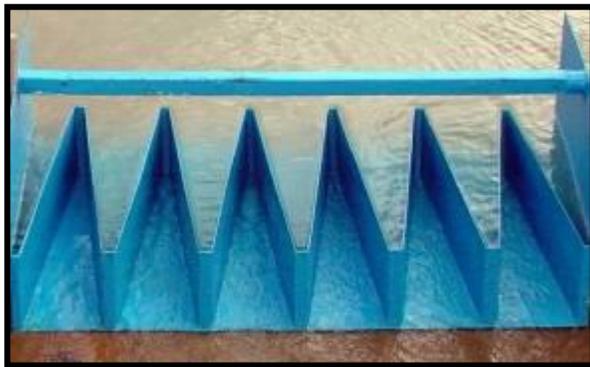
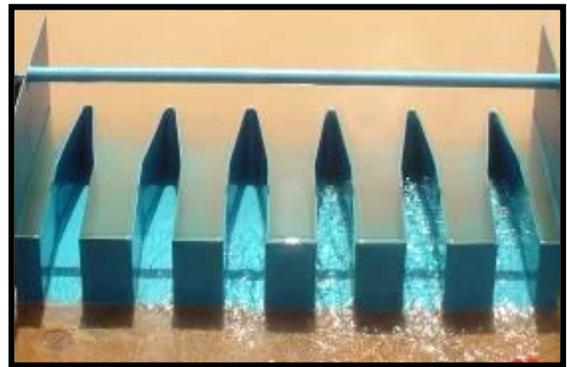


Figure I-23 : Représentation typique des paramètres du déversoir en labyrinthe traditionnel

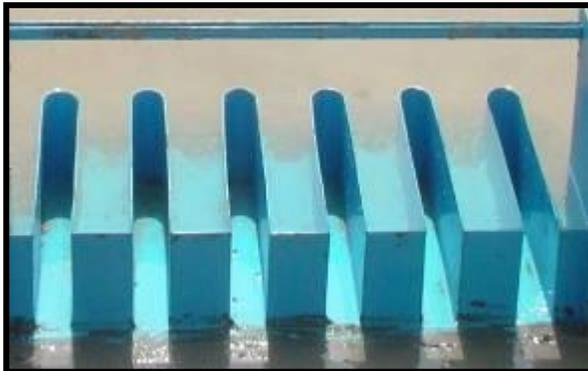
$\alpha$ : Angle du mur ( $^{\circ}$ )	A : Demi-longueur des parois frontales (m)
W : Largeur de cycle (m)	B : Longueur du mur latéral (m)
L : Longueur d'un cycle de crête (m)	P : Hauteur amont des parois (m)
T : Epaisseur du mur (m)	D : Hauteur aval des parois (m)
$H_o$ : Charge totale de chute (mce)	$H_v$ : Charge cinétique en amont (mce)
H : Hauteur piézométrique en amont (m)	$H_d$ : Hauteur piézométrique en aval (m)



a)-Forme trapézoïdale



b)-Forme rectangulaire profilée



c)- Forme rectangulaire avec entrée arrondie



d)- Forme rectangulaire avec entrée angulaire

**Figure I-24 : Différentes formes des modèles réduits des déversoirs en labyrinthe traditionnel  
(BENSAID et al – Magister 2008)**

### I-5-3 Performance d'un déversoir en labyrinthe traditionnel

La première analyse de la performance hydraulique d'un déversoir en labyrinthe traditionnel est attribuée à (HAY et TAYLOR., 1970). Dans leurs travail ils ont constaté que la performance d'une crête en labyrinthe pour une géométrie particulière en plan peut être exprimé comme  $(QL/QN)$  où,  $(QL)$  exprime le débit sur un déversoir en labyrinthe de longueur  $(L)$ , sous la charge  $(H)$  et  $(QN)$  le débit sur un déversoir rectiligne de largeur  $(W)$  sous la même charge. Lorsque la courbe de  $(QL/QN)$  est en fonction de  $(H/P)$  pour un déversoir en labyrinthe triangulaire et lorsque la largeur d'un cycle est supérieure à 2,5 fois la hauteur du déversoir, la performance du déversoir en labyrinthe,  $(QL/QN)$ , approche la grandeur du ratio  $(L/W)$  quand la charge  $(H)$  tend vers zéro. Réciproquement, l'efficacité diminue quand la charge de

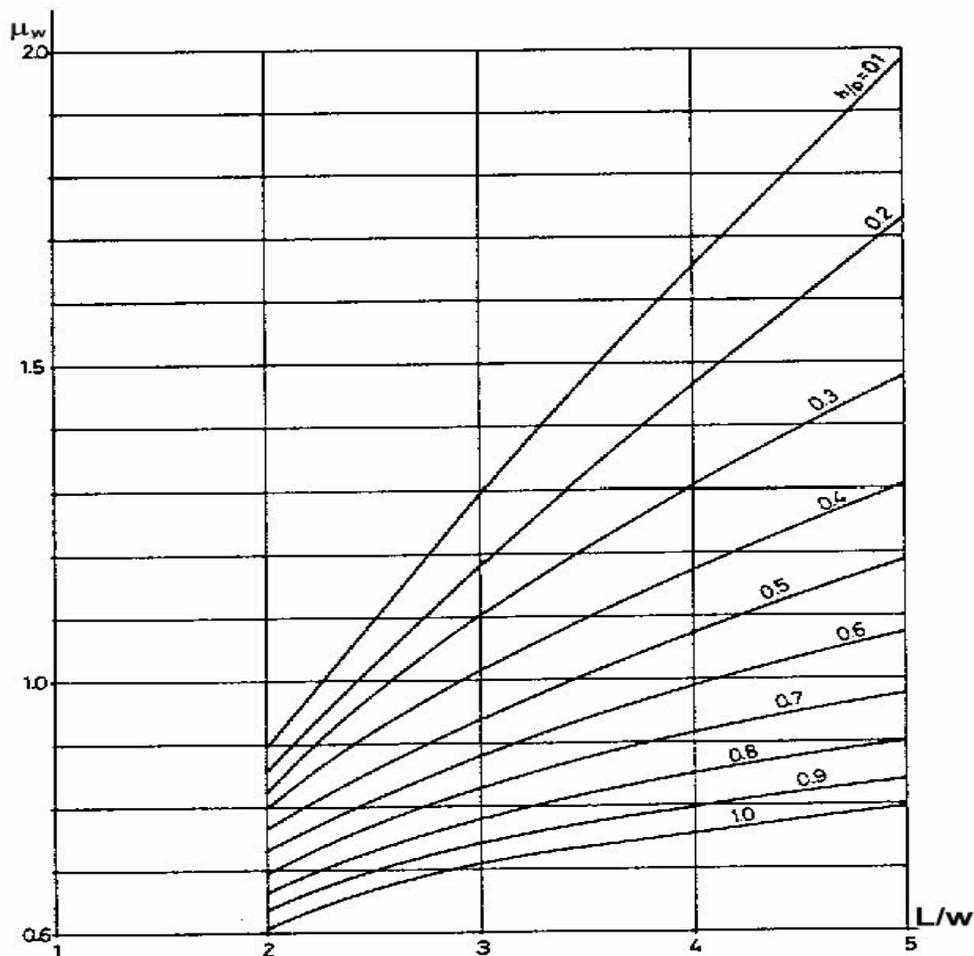
fonctionnement augmente. Cette étude (HAY et TAYLOR., 1970). montre que ce type de déversoir fonctionne efficacement à des faibles charges.

Une autre analyse de la performance hydraulique d'un déversoir en labyrinthe traditionnel est attribuée par Magalhaes. Il a constaté d'après ses études expérimentales que les valeurs de coefficient de débit obtenues sont inférieures à ceux obtenus par Hay et Taylor.

Il a présenté le coefficient de débit en fonction de la charge relative (H/P) qui représente la charge totale (H=H<sub>p</sub> +H<sub>v</sub>).

La figure (I-25) présente les résultats obtenus de coefficient du débit :

$$\mu_w = f(H/P, L/W) \quad (I-11)$$



**Figure I-25 : Coefficient de débit d'un déversoir en labyrinthe traditionnel en fonction de L/W et H/P (MAGALHAES., 1985)**

#### **I-5-4 Mode d'écoulement sur le Déversoir en Labyrinthe traditionnel**

Généralement le mode d'écoulement sur le déversoir en labyrinthe traditionnel passe par quatre phases principales : entièrement aéré, partiellement aéré, de transition et déprimé (LUX et HINCHLIFF., 1985).

- ***Phase écoulement entièrement aéré:***

Cette condition d'écoulement se produit à des faibles charges amont où la lame d'eau tombe librement par-dessus la crête du déversoir. Dans de telle condition, la direction de l'écoulement et les vitesses d'approche peuvent avoir une influence sur le coefficient de débit. Cependant, l'épaisseur de la nappe et l'écoulement aval n'affecte pas la capacité d'évacuation du déversoir.



**Figure I-26 : Ecoulement à faible charge (BENSAID et al – Magister 2008)**

- ***Phase écoulement partiellement aéré :***

Généralement le niveau d'eau aval augmente avec l'augmentation de la charge en amont, ceci entraîne la rencontre des nappes opposées avant d'atteindre le radier des alvéoles aval. Par contre, le niveau d'eau aval devient élevée et la surface d'eau au sommet amont devient limitée, ainsi l'aération sous la nappe devient difficile, Cette condition représente le début d'interférence de la nappe et aboutit à une baisse du coefficient de débit. Elle indique aussi le début de la phase partiellement aérée.

- ***Phase écoulement transitoire :***

Pour les grandes charges amont et des niveaux d'eau aval élevés, la nappe devient déprimée aux divers endroits le long de la crête. Les poches d'air stable formées lors de la phase précédente se brisent en petites poches qui se déplacent en amont le long des murs latéraux, causant ainsi une instabilité de la nappe. Cette condition est le début de l'écoulement de transition. Elle est caractérisée par une nappe alternée entre l'entraînement d'air intermittent et l'écoulement ferme de l'eau, et peut facilement être identifiée comme une discontinuité dans la courbe de coefficient de débit.

- ***Phase écoulement à nappe déprimée :***

Quand l'écoulement sur la crête du labyrinthe forme une nappe fermée non aérée. L'écoulement est dans la phase déprimée. Dans cette phase d'écoulement, l'épaisseur de la nappe et la profondeur d'eau aval ne permettent pas le soutirage de l'air sous la nappe. Comme la charge amont augmente, cette condition d'écoulement mène finalement à la pleine submersion du déversoir en labyrinthe traditionnel.



**Figure I-27: Ecoulement à grande charge (BENSAID et al – Magister 2008)**

### **I-5-5 Débit du déversoir en labyrinthe traditionnel par l'analyse dimensionnelle**

Etant donné que l'écoulement sur le déversoir en labyrinthe traditionnel est tridimensionnel et ne se prête pas aisément à une description mathématique, la solution la plus directe pour exprimer mathématiquement la fonction du débit, implique une combinaison d'analyse dimensionnelle et expérimentale. L'utilisation de cette technique a permis à (**LUX et HINCHLIFF., 1985**) de présenter l'équation simplifiée de débit pour les déversoirs en labyrinthe traditionnel.

Afin de simplifier cette analyse, l'échelle des modèles et les vitesses ont été supposées être d'une grandeur suffisante, la viscosité et les effets de la tension superficielle pourraient être négligés. Avec cette supposition, le seul paramètre important du fluide qui reste est l'accélération de la pesanteur ( $g$ ).

L'analyse dimensionnelle résulte que le débit par cycle d'un déversoir en labyrinthe traditionnel est en fonction des paramètres suivants :

$$Q_w = f(L, A, W, P, D, T, R, H_0, H_d, g) \quad (I-12)$$

Où :

L : Longueur développée de déversoir (m)

P : Hauteur amont du déversoir (m)

W : Largeur du déversoir (m)

D: Hauteur aval du déversoir (m)

T : Epaisseur du déversoir (m)

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

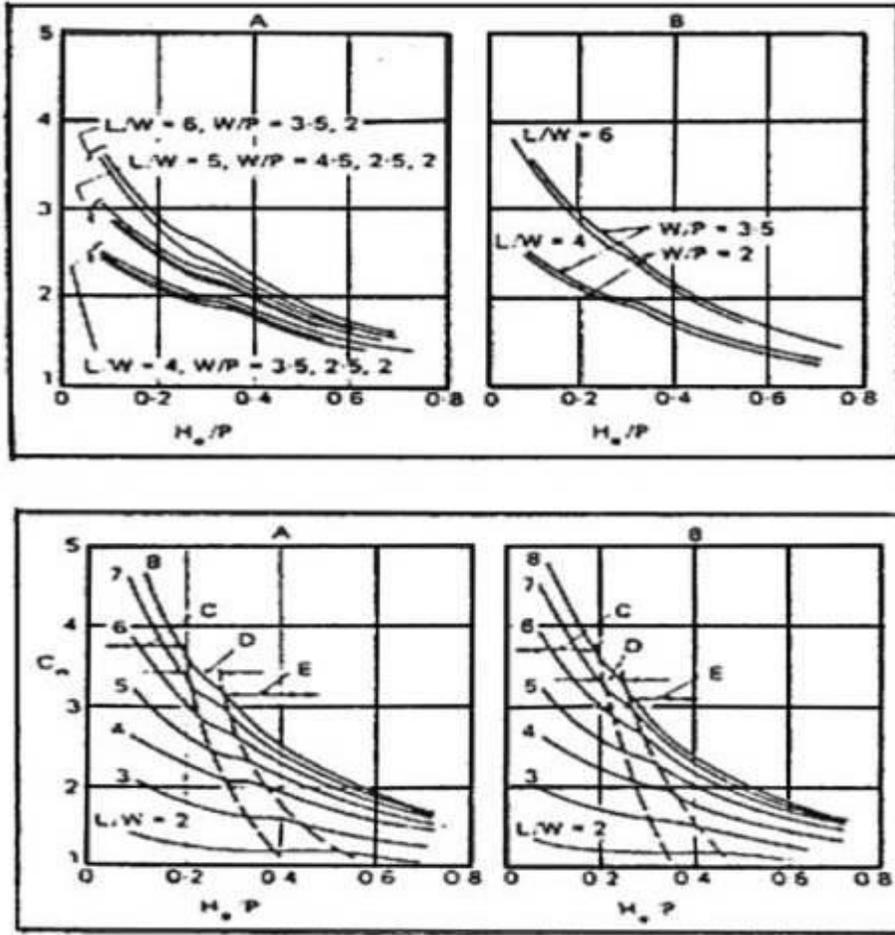
$H_0$  : Charge totale d'eau sur le déversoir (m)

$H_d$  : Niveau d'eau à l'aval du déversoir (m)

Par la fixation des paramètres adimensionnels  $A/W$ ,  $D/P=1$ ,  $R=0$ ,  $T = 12.7$  mm

L'équation (I-12) devient:

$$C = f(L/W, W/P, H_0/P) \quad (I-13)$$



**Figure I-28: Courbe de conception du déversoir en labyrinthe traditionnel en fonction de  $H_0/P$ ,  $W/P$  et  $L/W$  (LUX et HINCHLIFF., 1985)**

Les chercheurs (1982) ont proposé la relation suivante :

$$Q = C_w [(W/P) / ((W/P) + K)] \cdot Wg^{1/2} \cdot H^{3/2} \tag{I-14}$$

$K$  = constante qui dépend de la forme en plan du déversoir

$K = 0.18$  (pour la forme triangulaire)

$K = 0.1$  (pour la forme trapézoïdale)

Avec :  $A/W = 0.0765$

Pour obtenir la valeur du débit totale, la largeur du déversoir ( $W$ ) présentée à l'équation (I-12) doit être remplacée par la largeur totale du déversoir.

L'analyse des graphiques de (LUX et HINCHLIFF., 1985) par (AFCHAR., 1988) a fait apparaitre que la réduction du coefficient de débit avec l'accroissement de la charge relative

( $H_0/P$ ) est provoquée par la présence des interférences de la nappe qui commencent au sommet amont du déversoir et se déplace vers le sommet aval.

La figure (I-28) montre trois zones différents C, D et E

- La zone E : définie la limite entre la phase déprimée et la phase de transition
- La zone D : définie la limite entre la phase de transition et la phase partiellement aérée
- La zone C : définie la limite entre la phase partiellement aérée et la phase complètement aérée

Dans la zone déprimée le déversoir en labyrinthe fonctionne de la même façon qu'un déversoir rectiligne et les courbes s'aplatissent dans cette zone, ceci indique une faible variation de coefficient de débit ( $C_w$ ).

## **I-6 CONCLUSION**

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

Les déversoirs traditionnels peuvent classer en deux types :

- Déversoirs rectilignes
- Déversoirs non rectilignes

***La recherche bibliographique sur les déversoirs rectilignes a montré que :***

- Les principaux types de déversoirs rectilignes sont :
  - ☒ Déversoirs standard.
  - ☒ Déversoirs à mince paroi ;
    - Déversoir sans contraction latérale
    - Déversoir avec contraction latérale
    - Déversoir à échancrure triangulaire
    - Déversoir trapézoïdal
    - Déversoir circulaire
    - Déversoir incliné
    - Déversoir oblique
  - ☒ Déversoirs à seuil épais ;
    - déversoir de forme triangulaire
    - déversoir de section trapézoïdale
- Ainsi, la bibliographie a montré que pour une singularité à crête mince, l'écoulement peut être de trois types (écoulement noyé, écoulement noyé en dessous, écoulement dénoyé), tandis que pour une singularité à crête épaisse, l'écoulement ne peut être que de deux types (écoulement noyé, écoulement dénoyé).
- Les déversoirs à seuil épais offre un passage facile aux corps flottants, et il est solide et peu altérable.
- Ces types des déversoirs peuvent utilisés comme dispositifs de mesure de débit (débitmètre), et peuvent utilisés comme des évacuateurs de crues.
- Leurs rendements hydrauliques sont très faibles devant les déversoirs non rectilignes.

***La recherche bibliographique sur les déversoirs non-rectilignes (traditionnels) a montré que :***

- La géométrie en plan du déversoir en labyrinthe traditionnel est caractérisée par une ligne centrale discontinue qui engendre un écoulement tridimensionnel compliqué. Elle peut prendre plusieurs configurations géométriques :
  - Angulaire

- Rectangulaire
  - Triangulaire
  - Arrondie
- La bibliographie a montré aussi que l'écoulement sur un déversoir en labyrinthe traditionnel passe par quatre phases d'écoulement distinct en fonction de la charge sur le déversoir :
- Un écoulement complètement aéré
  - Un écoulement partiellement aéré
  - Un écoulement de transition
  - Un écoulement déprimé
- La performance d'un déversoir en labyrinthe traditionnel a été définie pour la première fois par **(HAY et TAYLOR., 1970)** qui ont montré que la performance du déversoir en labyrinthe est dépendante des paramètres géométriques du déversoir et des conditions d'approches.
- Une approche numérique du coefficient de débit basée sur l'expérimentation et l'analyse dimensionnelle est attribuée à **(LUX et HINCHLIFF., 1985)**. Cette approche montre que le coefficient du débit est lié aux paramètres adimensionnels du déversoir en labyrinthe traditionnel.

# **Chapitre II :**

Etat d'Art sur

Les Déversoirs auto-stables

## CHAPITRE II

### ETAT D'ART SUR LES DEVERSOIRS AUTO-STABLES

#### II-1 INTRODUCTION

Le recours à la technologie est indispensable dans tous les domaines surtout dans le domaine de la sécurité de l'humanité contre les risques majeurs. La rupture des barrages est considérée comme un risque majeur technologique dû à l'insuffisance de la capacité d'évacuation des évacuateurs de crues.

Parmi les nouvelles techniques utilisées dans le domaine de la sécurité des barrages, on distingue l'innovation des évacuateurs de crues auto-stables.

À titre d'exemple, l'installation de hausses fusibles (déversoir auto-stable) a permis d'augmenter de 500 millions de m<sup>3</sup> la capacité de stockage de réservoirs existants dans le monde, soit la consommation annuelle d'eau potable de plus de 10 millions de personnes (**HYDROPLUS., 2005**).

À cet effet, un aperçu sera consacré uniquement sur les déversoirs auto-stables afin de mieux comprendre ses caractéristiques géométriques, leurs dimensionnements, leurs modes de fonctionnement hydrauliques et ses avantages.

#### II-2 CLASSIFICATION DES DEVERSOIRS AUTO-STABLES

Ces systèmes permettent d'augmenter la capacité utile du réservoir, tout en conservant des capacités d'évacuation satisfaisantes.

Les déversoirs auto-stables sont classifiés, selon leurs mode de fonctionnement comme suit:

- les hausses fusibles
- les blocs fusibles
- flashboards
- les digues fusibles
- les hausses rabattables
- les vannes automatiques
- les boudins gonflables
- les murs en « L » fusibles

### II-3 DEVERSOIR EN LABYRINTHE FUSIBLE (HYDROPLUS)

Ce système est composé de caissons, ou "hausses", posés sur le déversoir et qui fonctionnent au fur et à mesure de l'élévation de l'eau comme un barrage, un déversoir ou un fusible. Les hausses fusibles ont été inventées par (LEMPERIERE., 1989) comme un système simple, robuste et sûr pour augmenter le stockage réel ou la capacité de déversoir.

Les hausses fusibles sont constituées en béton ou en acier, les hausses fusibles sont juxtaposées sur la crête d'un seuil. Grâce à un système élaboré d'étanchéité latérale, les hausses fusibles remplissent leur qualité de voile étanche dans toutes les configurations envisageables: seuil droit, seuil courbe, seuil libre à double courbure en crête de barrage voûte.

Les hausses fusibles sont l'équivalent mécanique d'un bouchon fusible qui fonctionne jusqu'à une certaine pression puis il s'efface. Les niveaux du réservoir auxquelles chaque hausse fusible s'efface peuvent être déterminés avec une précision contrôlée. Chaque hausse se compose de trois composants comme indiqué dans la figure (II-01); un godet fabriqué en métal ou en béton armé, une base et un puits d'admission qui est connecté à une chambre sous la base. L'accumulation d'eau de suintement dans la chambre de fond est évitée en prévoyant deux drains pour chaque chambre (FALVEY., 1995).

Ce système permet d'augmenter la capacité utile du barrage de 1 million de m<sup>3</sup>, ce qui soutient l'étiage tout en améliorant l'irrigation en été et la sécurité de l'ouvrage lors des crues.

Les hausses fusibles peuvent augmenter, la capacité de déversoir et le stockage de réservoir.

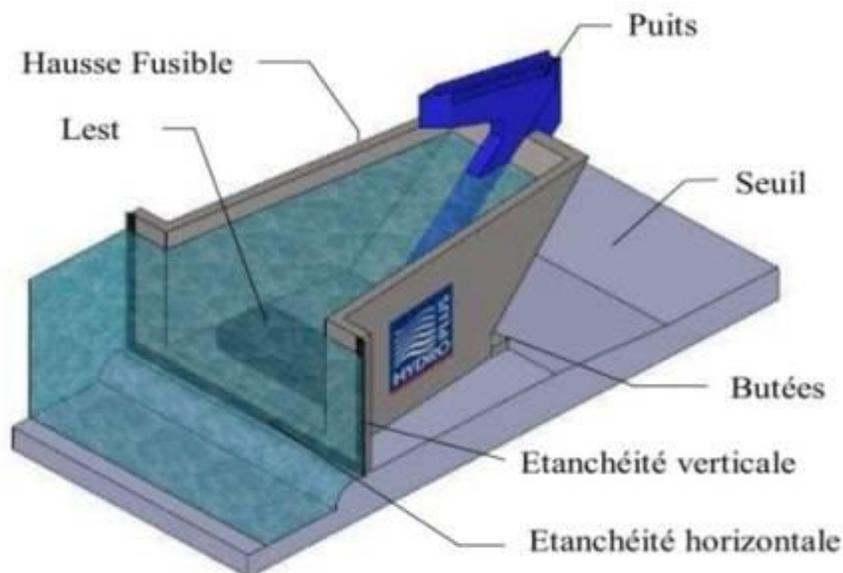


Figure II-01: Schéma d'une hausse fusible (HYDROPLUS – France)

### II-3-1 Caractéristiques du débit

Des études hydrauliques détaillées des caractéristiques de débit des hausses fusibles ont été réalisées au laboratoire National d'Hydraulique (LNH) à Chatou (France) et au laboratoire Tennessee Valley Authority (TVA) à Norris, (USA).

Les caractéristiques de débit sont exprimées employant le coefficient de débit ( $C_d$ ) pour les déversoirs définis par (ROUSE., 1960):

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d L_c h^{3/2} \quad (\text{II-01})$$

Q: débit ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

g : accélération de la pesanteur ( $\text{m}/\text{s}^2$ )

$L_c$  : longueur de la crête de la hausse fusible (m)

h: différence entre le niveau d'eau dans le réservoir et le niveau de la crête (m)



Figure II-02: Hausse fusible opérationnel - (HYDROPLUS – France)

Les hausses fusibles sont conçues pour fonctionner avec une nappe aérée. Les essais à la (TVA) ont montré que le coefficient de débit était constant jusqu'au point où le niveau d'eau aval devient égal au niveau de la crête.

## II-3-2 Description et dimensionnement du système des hausses fusibles

### II-3-2-1 Principe de fonctionnement

Lorsque le niveau d'eau est bas, la "hausse" agit comme un prolongement du barrage. En cas de crue faible ou moyenne, elle joue un rôle de déversoir. En cas de crue exceptionnelle, elle joue un rôle de "fusible", elle bascule afin d'accroître les capacités d'évacuation du déversoir.

Selon le niveau d'eau dans la retenue, les éléments de rehausse fonctionnent comme un barrage, un déversoir, ou un fusible (FALVEY., 1995).

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

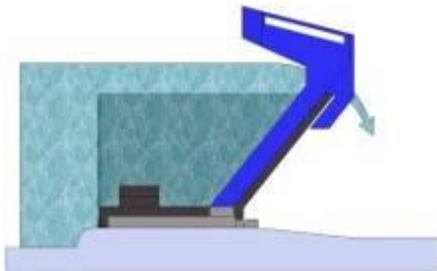


Figure II-03 : Hausse fusible (rôle du réservoir)

b) Lorsque le niveau de l'eau s'élève au-dessus de la côte d'arase des hausses, celles-ci fonctionnent comme un déversoir à surface libre, jusqu'à une certaine épaisseur de lame d'eau. La forme dite en labyrinthe de la partie supérieure des hausses permet d'allonger la longueur du seuil déversant qui peut être de l'ordre de quatre fois la longueur du seuil d'origine. Pendant cette phase de fonctionnement, chaque élément reste largement auto stable comme dans la phase précédente.

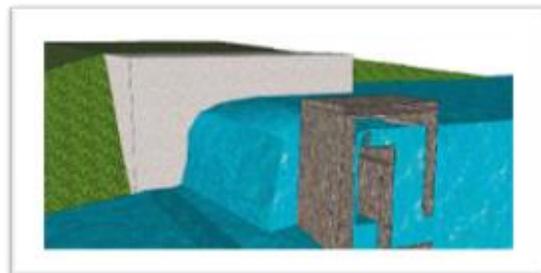
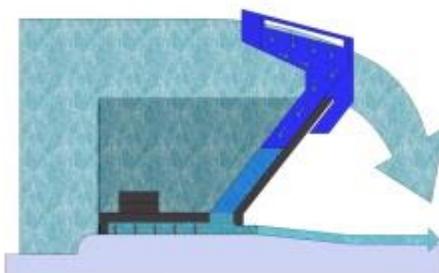
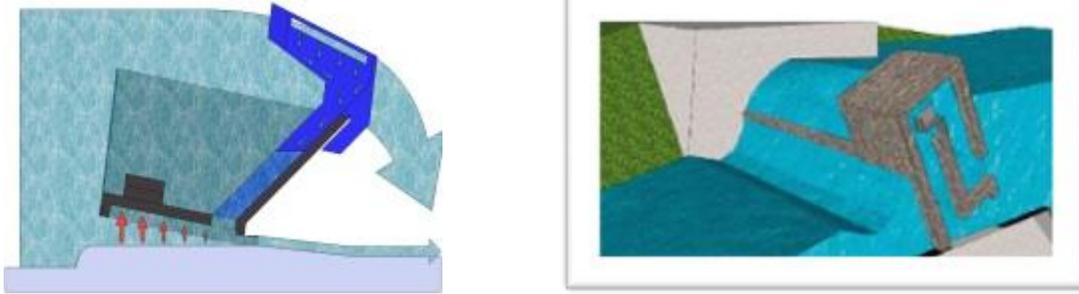


Figure II-04: Alimentation de la chambre de mise en pression

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



**Figure II-05 : Hausse fusible avec mise en pression de la chambre et basculement**

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

### **II-3-2-2 Stabilité des hausses fusibles**

Le basculement des éléments est provoqué automatiquement, à une cote précise, prédéterminée par la mise en charge d'une chambre aménagée à la base des éléments.

Dans le cas des évacuateurs de crues de barrages, on souhaite moduler, en fonction de l'importance de la crue, le nombre de rehausses qui basculent.

Dans le cas des digues, le basculement des hausses peut être commandé pour une cote unique de façon à disposer, en un délai assez court, de la totalité de la capacité d'écêtement du déversoir.

Le principe de calcul de la stabilité des hausses est de passer brutalement pour une cote d'eau déterminée d'une situation de stabilité largement assurée à une situation d'instabilité.

Lors du remplissage du puits et de la chambre, le système des forces auxquelles est soumise la hausse est modifié rapidement, par application d'une sous pression sous sa base (FALVEY., 1995).

a) Avant remplissage de la chambre

Forces stabilisatrices :

- Poids propre de la hausse
- Poids de l'eau dans l'alvéole amont
- Butée aval

Forces motrices :

- Poussée hydrostatique sur la face verticale amont.

b) Après remplissage de la chambre

Forces stabilisatrices :

- Poids propre de la hausse
- Poids de l'eau dans l'alvéole amont
- Butée aval

Forces motrices :

- Poussée hydrostatique sur la face verticale amont
- Sous-pression sous la base de la hausse.

Pour tenir compte de la présence d'une purge de la chambre, on ne prend pas en compte dans les calculs la pleine sous-pression mais seulement 70 à 80% de cette dernière.

**II-3-2-2-1 Stabilité au glissement**

La stabilité au glissement est assurée par des butées dans le bord aval du déversoir qui sont ancrées dans le seuil. L'ampleur de la force exercée sur la butée peut être estimée en calculant la force hydrostatique amont appliquée sur la hausse :

$$F_s = F_{s1} + F_{s2} = \frac{\rho_w g h^2 W_w}{2} + \frac{\rho_w g (H + 2h) H W}{2} = \frac{\rho_w g H^2}{2} \left( \frac{h^2}{H^2} W_w + W + \frac{2h}{H} W \right) \quad (\text{II-02})$$

Où :

 $W$  : Largeur de la hausse fusible (m) $W_w$  : Largeur du puits (m) $\rho_w$  : Densité de l'eau (kg/m<sup>3</sup>) $F_{s1}$  et  $F_{s2}$  : forces motrices (newton)

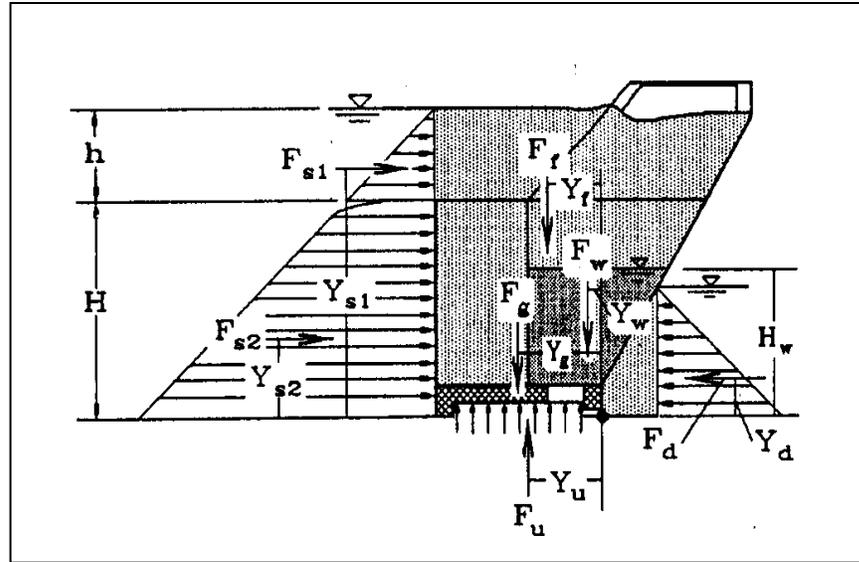


Figure II-06 : Forces agissant sur une hausse fusible (FALVEY., 1995).

### II-3-2-2-2 Stabilité au renversement

Les moments de renversement résultent des forces amont sur la hausse (moment amont) et la force de la sous-pression dans la chambre (le moment de sous-pression). La restauration des moments est causée par la masse de la hausse (moment de la hausse), la masse de l'eau dans la hausse (le moment d'eau) et le niveau d'eau aval (moment en aval). La hausse tourne autour de l'extrémité aval quand les moments de renversement excèdent les moments de restauration.

Le moment amont se compose du moment de la force hydrostatique sur le puits plus celui de la force hydrostatique sur le godet (alvéole). Le moment peut être estimé en négligeant la variation de profondeur d'écoulement par le godet (alvéole).

Le moment amont est égal à :

$$M_s = M_{s1} + M_{s2} \quad (\text{II-03})$$

$$\text{Où : } M_{s1} = F_{s1} Y_{s1} = \frac{\rho_w g h}{2} (h W_w) \left( H + \frac{h}{3} \right) = \frac{\rho_w g W_w h^2 (3H + h)}{6} \quad (\text{II-04})$$

$$\text{et : } M_{s2} = F_{s2} Y_{s2} = (\rho_w g h) (H W_w) \frac{H}{2} + \frac{\rho_w g H}{2} (H W_w) \frac{H}{3} = \frac{\rho_w g W H^2 (H + 3h)}{6} \quad (\text{II-05})$$

Le moment de sous-pression est déterminé par la superficie de la chambre de fond et la profondeur d'eau dans le puits:

$$M_u = \rho_w g A_c H_w Y_u \quad (\text{II-06})$$

$A_c$  : Surface de la chambre du fond ( $\text{m}^2$ )

$H_w$  : Profondeur d'eau dans le puits (m)

$Y_u$  : Bras de levier au centre de gravité de la pression (m)

$\rho_w$  : Densité de l'eau ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

La chambre du fond se caractérise par une grande superficie. A cet effet, le moment ( $M_u$ ) augmente rapidement avec l'accroissement de la hauteur d'eau sur la hausse. L'effet sur le moment est montré dans la figure (II-07) par la ligne continue presque verticale entre les hauteurs d'eau superficielles ( $H_c$ ) et ( $H_n$ ).

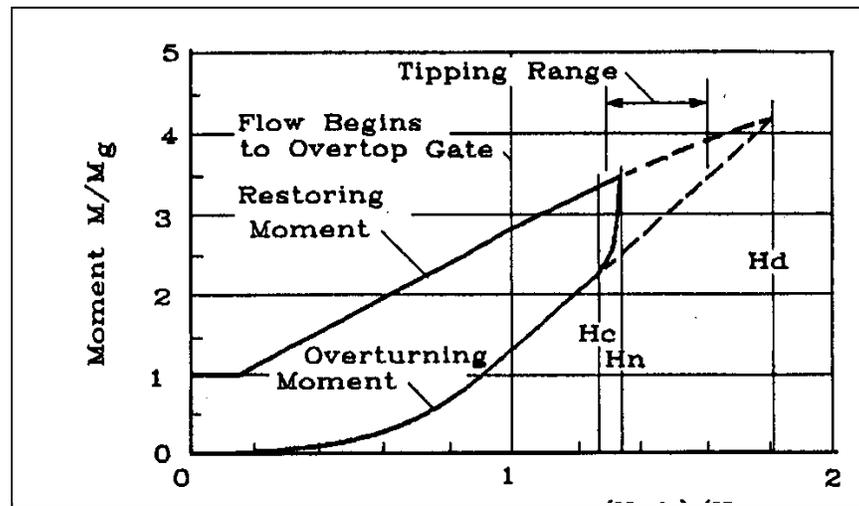


Figure II-07: Moments appliqués sur la hausse fusible

Les essais expérimentaux ont montré que la profondeur d'eau entre les hausses est approximativement égale au tiers de la profondeur d'eau amont (FALVEY., 1995).

Le moment de la hausse est donné par:

$$M_g = F_g Y_g = \rho_s V_s Y_s + \rho_c V_c Y_c \quad (\text{II-07})$$

Où :

$F_g$  : La force nette manifestée par le poids du godet et la base (newton)

$V_c$  : Volume du matériau dans la base ( $\text{m}^3$ )

$V_s$  : Volume du matériau dans le godet ( $\text{m}^3$ )

$Y_c$  : Bras de levier du matériau dans la base (m)

$\rho_c$  : Densité du matériau dans la base (kg/m<sup>3</sup>)

$Y_g$  : Bras de levier de la base et du godet (m)

$\rho_s$  : Densité du matériau dans le godet (kg/m<sup>3</sup>)

$Y_s$  : Bras de levier du matériau dans le godet (m)

Le moment d'eau est dû au poids de l'eau dans le godet. Ce poids comprend seulement l'eau dans le godet et non pas l'eau dans la chambre. Le moment d'eau est donné par :

$$M_w = \rho_w g (V_b Y_b + W_w H_w L_w Y_w) \quad (\text{II-08})$$

$H_w$  : Profondeur d'eau dans le puits (m)

$L_w$  : Longueur du puits (m)

$V_b$  : Volume d'eau dans le godet (m<sup>3</sup>)

$Y_b$  : Bras de levier de la force de l'eau dans le godet (m)

$Y_w$  : Bras de levier de la force de l'eau dans le puits (m)

Le moment aval est dû au niveau d'eau sur le côté aval de la hausse. Le niveau varie approximativement d'un tiers de la profondeur d'eau en amont à l'extrémité amont du godet au deux tiers à l'extrémité aval du godet. Le niveau d'eau à l'extrémité aval du godet est approximativement égal à un tiers de la profondeur amont. Le moment aval est donné approximativement par :

$$M_d \approx \frac{\rho g [(H+h)/3]}{2} [(H+h)/3] W_w \frac{(H+h)/3}{3} \approx \frac{\rho g (H+h)^3 W_w}{182} \quad (\text{II-09})$$

## II-4- Blocs fusibles

### II-4-1 Conception des blocs fusibles

C'est un nouveau déversoir rectiligne qui fonctionne en mode auto-stable, des essais expérimentaux pour le développement hydraulique de ce déversoir étaient déjà entamés depuis 2003 au laboratoire des Aménagements Hydrauliques et Environnement (LAHE) de l'université de Biskra. Pour s'assurer que la sous-pression est totale, la partie inférieure amont du bloc sera laissée ouverte. Les extrémités latérales pourront rester également ouvertes ou être fermées, créant ainsi sous le bloc une chambre fermée sur trois côtés et ouverte à l'amont.

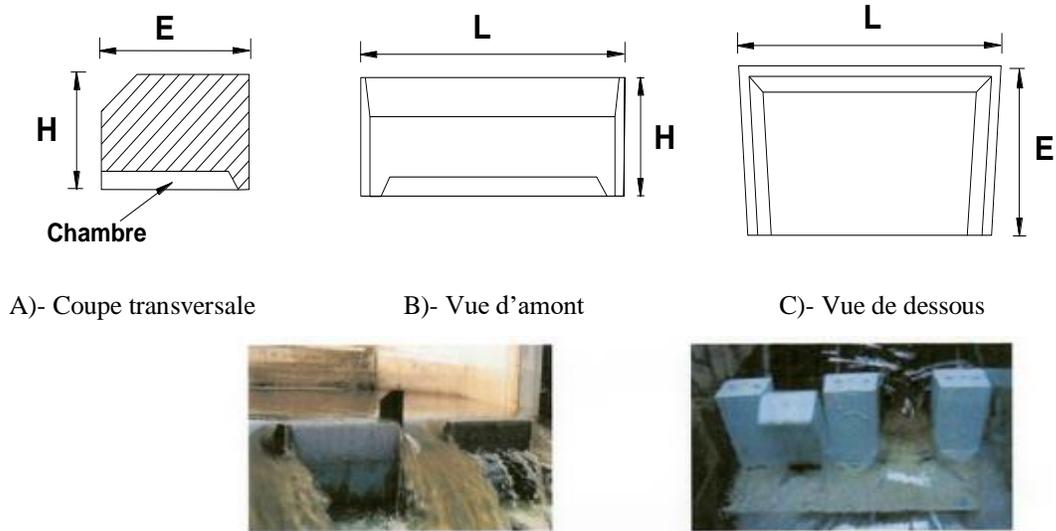


Figure II-08: Conception des Blocs fusibles

### II-4-2 Emplacement des Blocs fusibles

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

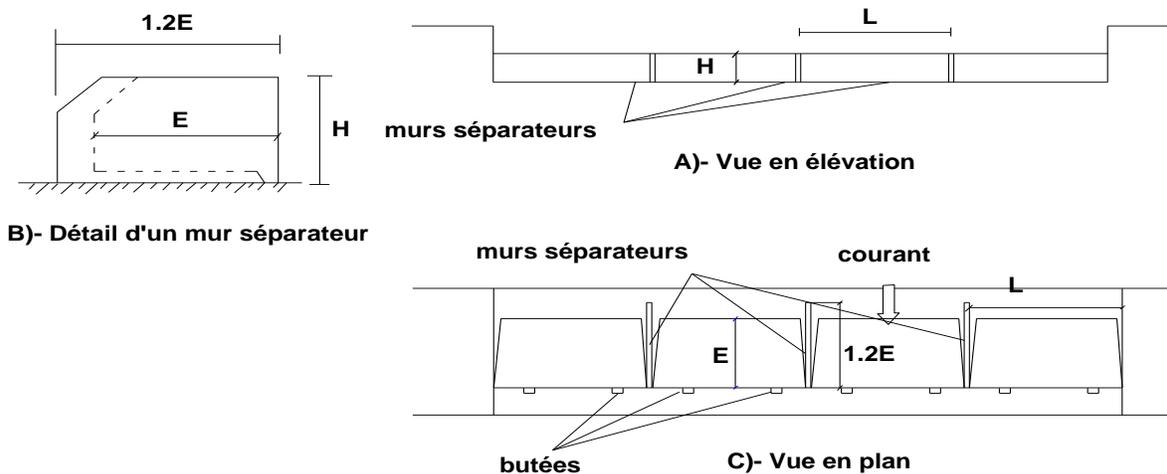


Figure II-09: Emplacement des Blocs fusibles

### II-4-3 Diagramme de stabilité des Blocs fusibles

La figure (II-10) montre les courbes théoriques de stabilité, la ligne brisée (MV) représente le moment des forces verticales et la courbe (MH) le moment des forces horizontales en fonction d'une charge d'eau totale (W) à l'amont d'un bloc d'épaisseur (e) et de hauteur (H).

Le renversement du bloc correspond au point de rencontre de ces deux courbes. La ligne brisée (MV1) en pointillée correspond à une épaisseur de bloc augmentée de 10 %.

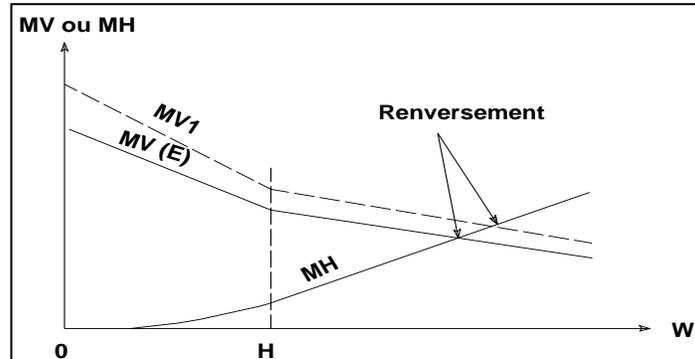


Figure II-10 : Diagramme de stabilité des blocs fusibles

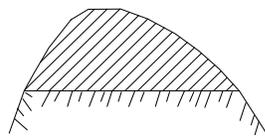
### II-4-4 Performance des Blocs fusibles

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

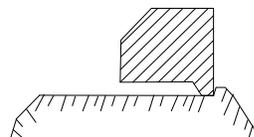
On peut utiliser la formule approchée suivante pour un bloc ayant la forme générale décrite aux paragraphes précédents et une densité moyenne :

$$h = E - 0,4 H \quad (\text{II-10})$$

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



Seuil classique



Bloc fusible

Figure II-11: Comparaison d'un seuil classique et d'un seuil équipé de blocs fusibles.

### II-4-5 Construction des Blocs fusibles

La construction des blocs fusibles est très simple, elle passe par les étapes suivantes:

- Coulage du béton sur une couche de matériaux tout venant
- Couverture par une membrane plastique
- Installation de supports pour assurer la stabilité du bloc.

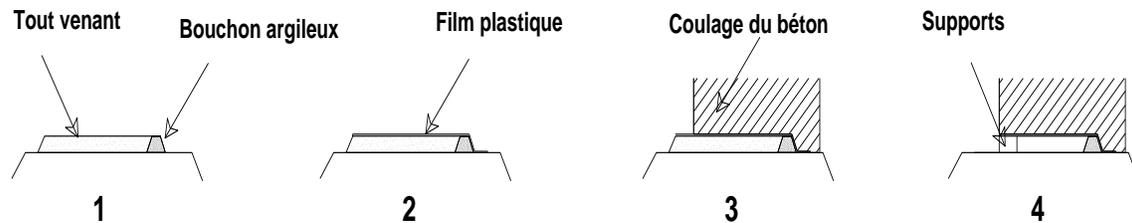


Figure II-12: Phases de construction des blocs fusibles

### II-5 AUTRES DISPOSITIFS FUSIBLES

Les dispositifs fusibles ont pour principe de s'effacer pour laisser passer les crues de faible probabilité et sont en général détériorés, si non entraînés par le courant, et le plus souvent perdus.

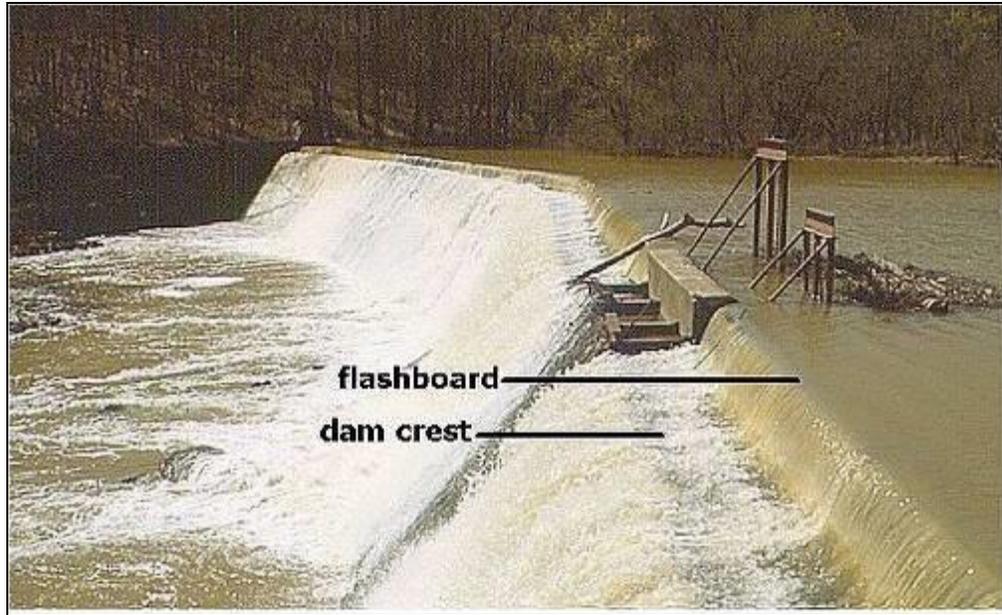
Des dispositifs fusibles très économiques ont été utilisés depuis longtemps dans des versions simplifiées telles que les « flashboards » aux Etats-Unis et les digues fusibles en Chine (LEMPERIERE et al., 2006), et les murs en « L fusibles » lors de la rénovation du barrage Milner (Etats Unis - Central Idaho).

#### II-5-1 Flashboard

Une masse de bois, en béton ou en acier placée sur la crête d'un déversoir pour élever le niveau d'eau de retenue mais qui peuvent être rapidement éliminée dans le cas d'une crue par un dispositif de déclenchement, ou par l'échec délibérément conçu de la flashboard ou de ses supports.

Ce sont le plus souvent des planches de bois maintenues verticalement contre des poteaux en tubes métalliques fixés dans un seuil en béton. Les planches sont démontées à la main avant la saison des crues ou bien les tubes plient sous la pression de l'eau pour une épaisseur de lame déversante donnée. Ce dispositif est très économique mais peu précis.

Des milliers de petits barrages aux Etats Unis ont utilisé des « flashboards » depuis plus de 100 ans.



**Figure II-13 : Déversoir (Flashboard) Etats-Unies**

### II-5-2 Digues fusibles

Utilisées en Chine comme évacuateurs de sécurité pour des débits parfois très importants, leur coût est très réduit.

Au fil des années, une certaine cohésion peut apparaître progressivement dans les matériaux constitutifs de la digue (sans parler de la végétation qui peut pousser sur sa surface) de sorte que la charge d'eau nécessaire pour entraîner la rupture de la digue tend à augmenter, la digue devenant de moins en moins fusible (LEMPERIERE et al., 2006).



**Figure II-14 : Déversoir (digue fusible) - France**

### II-5-3 Les hausses rabattables (Hydroplus)

Hydroplus a récemment mis au point un nouveau système : les hausses rabattables.

Ce dispositif fusible basé sur les mêmes principes de déclenchement que la Hausse Fusible, n'est pas entraîné par la crue mais s'efface vers le bas tel un clapet. Il pourra être remis manuellement en place par l'exploitant après le passage de la crue.

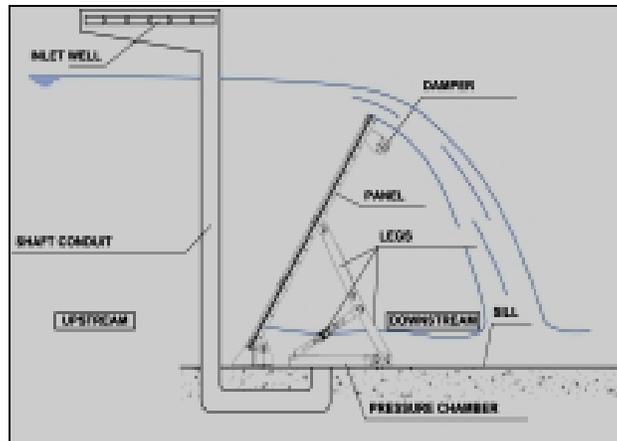
Contrairement au modèle fusible, la hausse rabattable n'est pas emportée par la crue ; elle se rabat pour laisser déferler les lames mais reste en place. Une fois la crue passée, il suffit de remettre la hausse dans sa position originale. Après avoir réalisé de nombreux essais sur modèle en laboratoire, une première installation a eu lieu en juillet 2004 sur le barrage de Khorobrovskaya en Russie. Les hausses rabattables sont une solution idéale pour les projets dont la période de retour des premiers basculements est peu élevée.



Figure II-15 : Déversoir (les hausses rabattables) - Russie

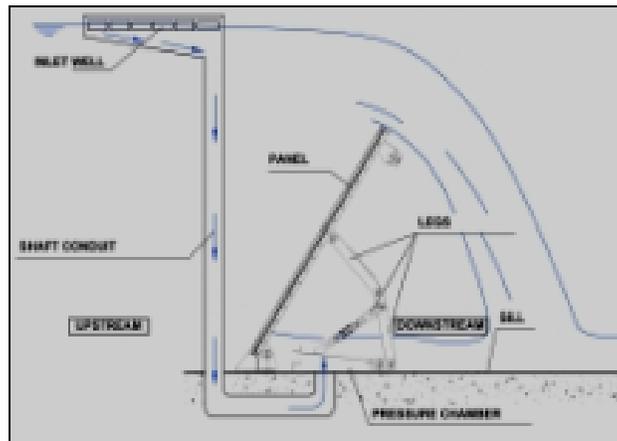
#### II-5-3 -1 Principe de fonctionnement des hausses rabattables

- a) Le niveau de stockage de la retenue est élevé au niveau de la crête déversante du panneau. Lorsque le réservoir est plein, la crue se déverse au-dessus de la crête de la hausse rabattable qui agit comme un seuil libre.



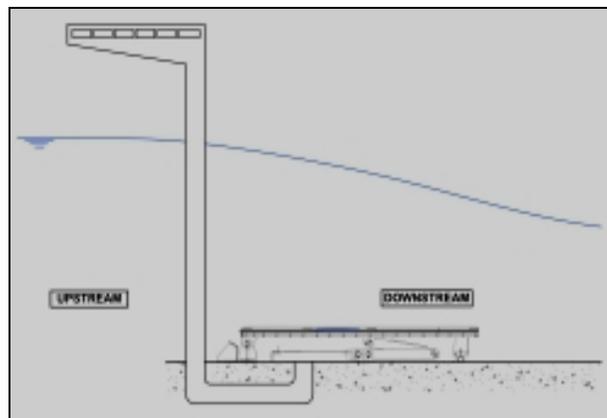
**Figure II-16 : Hausse rabattable – rôle de réservoir**

- b) Lorsque, pendant les grandes crues, le niveau d'eau amont atteint la crête du puits d'alimentation (déporté dans une structure annexe), la chambre de sous-pression est alimentée.



**Figure II-17 : Alimentation de la chambre de hausse rabattable**

- c) L'effort de sous-pression généré dans cette chambre vient actionner le mécanisme de basculement de la hausse rabattable. Le panneau se rabat afin d'évacuer la crue.



**Figure II-18 : Basculement de hausse rabattable**

### II-5-4 Les vannes automatiques (Hydroplus)

Ce dispositif fusible basé sur un principe de déclenchement simple, toujours autonome et sans apport d'énergie, n'est pas entraîné par la crue : il bascule autour d'un axe, et se repositionne après le passage de la crue. Les niveaux d'eau amont pour le basculement et le redressement sont paramétrables au moment du projet, et peuvent être réajustés ultérieurement. C'est l'outil ultime pour optimiser la gestion et la sécurité des ouvrages qui ne disposent pas d'énergie ou d'exploitation 24/24.

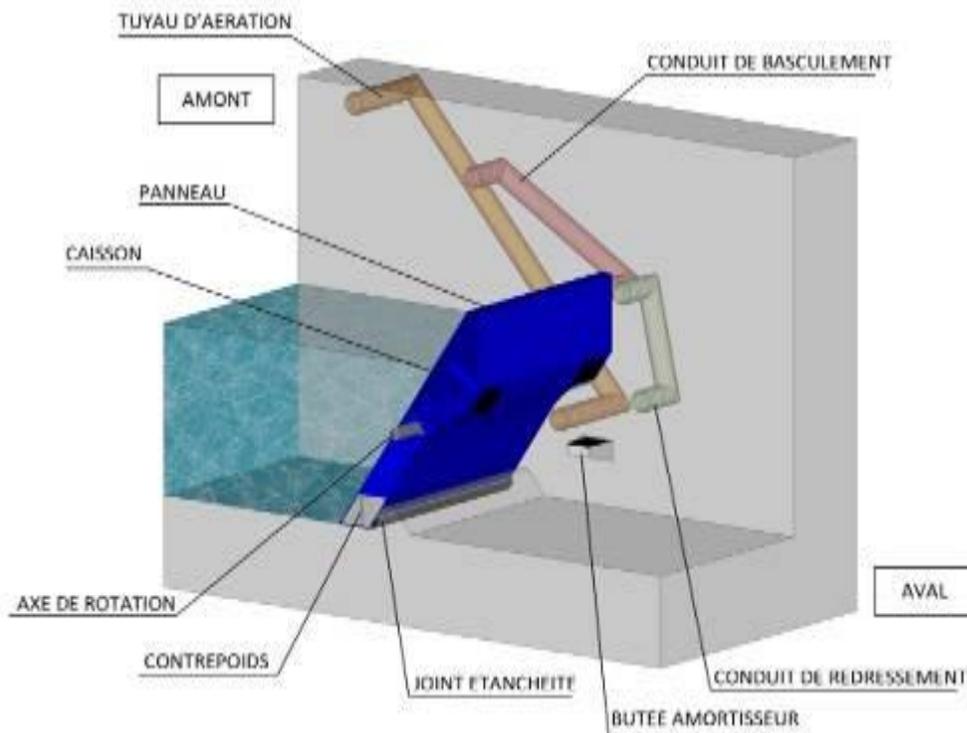
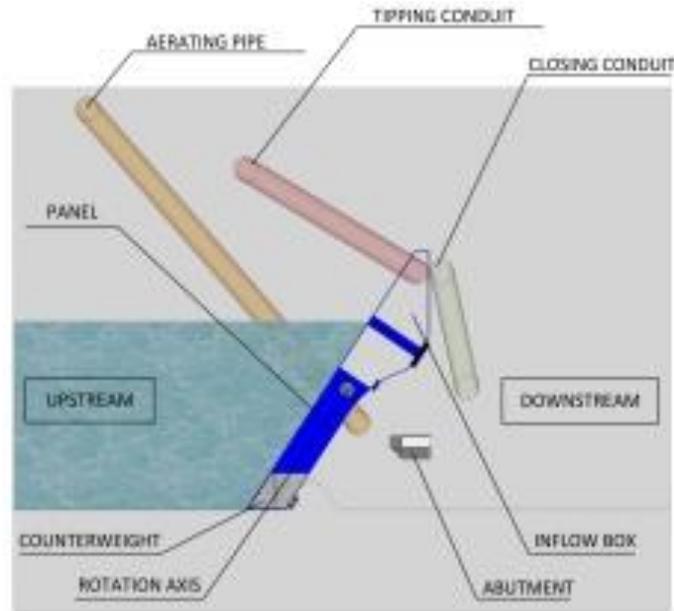


Figure II-19: Schéma d'une vanne automatique (HYDROPLUS – France)

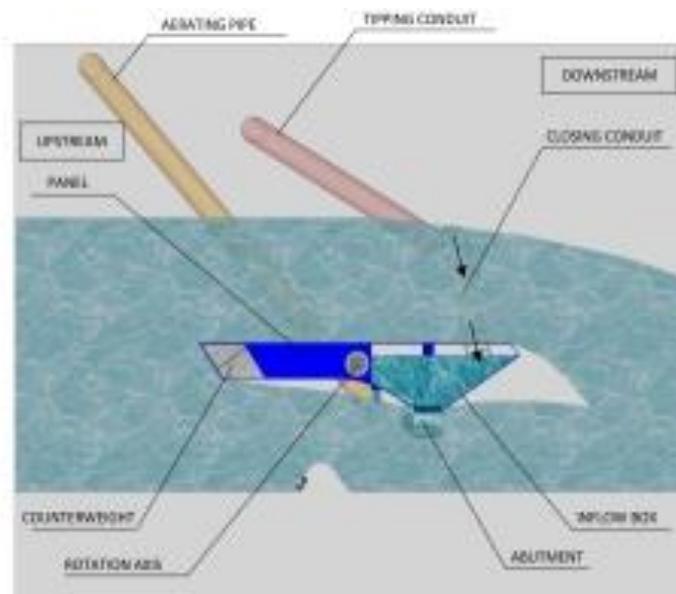
#### II-5-4 -1 Principe de fonctionnement des vannes automatiques

La vanne automatique est composée d'un panneau articulé placé en travers de l'écoulement. Un compartiment accueille un contrepoids en partie basse du panneau ce qui confère une grande stabilité à la vanne en position fermée. L'eau du réservoir est stockée jusqu'à la crête de la vanne et s'évacue par simple déversement par-dessus la crête pour des crues d'intensité modérée.



**Figure II-20 : Vanne automatique – rôle de réservoir**

Lors d'épisodes de crues exceptionnelles, le niveau du réservoir atteint la cote de basculement de la vanne automatique. De l'eau s'engouffre alors dans le conduit de basculement qui débouche dans le caisson de la vanne. Ce dernier, localisé en partie supérieure du panneau, se remplit et agit comme un surpoids déstabilisant. L'action combinée de la poussée de l'eau avec ce surpoids additionnel provoque l'ouverture du panneau.



**Figure II-21 : Basculement de la vanne automatique**

### II-5-5 Les boudins gonflables

Il s'agit de boudins gonflables à l'air, constitués d'une enveloppe souple, en caoutchouc armé, d'environ 10 mm d'épaisseur. Les boudins gonflés à l'eau, capables de supporter des charges importantes ne se justifient pas pour les déversoirs de digues, justement du fait de la charge limitée (1,0 à 1,5 m).

L'enveloppe est fixée à la structure au moyen d'un plat métallique boulonné sur une ligne d'ancrages dans une poutre en béton armé encastrée dans le seuil déversant.

Cette solution présente donc de grands avantages de souplesse et de fiabilité.

D'après le retour d'expérience sur les barrages et seuils en rivière, la durabilité des enveloppes exposées à l'air est estimée à plus de 40 ans.

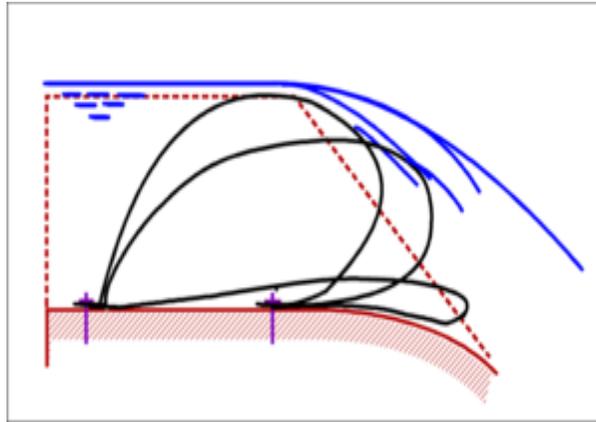


Figure II-22 : Schéma d'un boudin gonflable



Figure II-23 : Boudin gonflable (source -IRSTEA)

### II-5-6 Les Murs en « L »

Cette solution consiste à mettre en place, au dessus du seuil déversant fixe, un fusible rustique constitué d'un mur de rehausse en béton armé préfabriqué en forme de L, adossé à un remblai en graviers fins érodables placé à l'aval des panneaux béton.

Le mécanisme de cette solution est le suivant :

L'eau atteignant la crête des panneaux en béton armé, passe en surverse et vient éroder le remblai placé à l'aval. L'appui des panneaux devenant insuffisant, il n'équilibre plus le moment de renversement de la poussée hydrostatique : les murs basculent et sont entraînés rapidement par les eaux. Etant donné la taille réduite des panneaux, le basculement de ceux-ci se produit en chaîne. Le mécanisme de rupture peut être amélioré en plaçant, sur chaque panneau, une barbacane inclinée en PVC de diamètre 50 cm. Le rôle de cette barbacane est d'introduire un gradient hydraulique à l'intérieur du remblai dans sa partie basse, juste avant la surverse par dessus les panneaux.

Un exemple d'application de cette solution est l'utilisation des murs en L lors de la rénovation du barrage Milner (Etats Unis - Central Idaho).



Figure II-24 : Barrage Milner -USA

## II-6 CONCLUSION

En guise de ce travail, on peut dire que le déversoir auto-stable est une solution tentante pour améliorer l'efficacité hydraulique d'un déversoir tout en limitant sa longueur est d'aménager un merlon érodable en crête du seuil déversant.

Les déversoirs auto-stables sont nombreux, ils sont plusieurs types :

- les hausses fusibles
- les blocs fusibles
- flashboards
- les digues fusibles
- les hausses rabattables
- les vannes automatiques
- les boudins gonflables
- les murs en « L » fusibles

Ces déversoirs ont fait leurs preuves sur les barrages ou les seuils en rivière. L'application de ce type de dispositif aux digues pose avant tout un problème du coût de réalisation comme de maintenance ultérieure (en particulier pour les systèmes à éléments perdus), dans la mesure où :

- il est nécessaire d'équiper de grands linéaires, les déversoirs de digue faisant souvent plusieurs centaines de mètres de longueur ;

- l'événement devant provoquer l'effacement de la totalité du fusible et a priori plus fréquent pour une digue que pour un barrage.

Enfin, quel que soit le type de fusible retenu, il convient de veiller à ce que le déversoir sur lequel il sera installé soit dimensionné de façon à résister sans dommage à la crue débordante, y compris dans la situation dégradée d'un dysfonctionnement du fusible provoquant une aggravation locale des contraintes d'écoulement.

# **Chapitre III :**

Aperçu sur

les nouveaux déversoirs

non rectilignes

## CHAPITRE III

### APERÇU SUR LES NOUVEAUX DEVERSOIRS NON RECTILIGNES

#### III-1 INTRODUCTION

Plusieurs travaux ont été effectués par les chercheurs hydrauliciens afin de développer les organes de la sécurité des barrages, notamment les évacuateurs de crues non rectilignes.

Un nouveau type des déversoirs non rectilignes appelé **déversoir en labyrinthe développé** a été développé par Hydrocoop (France) en collaboration avec le laboratoire d'aménagements hydrauliques et environnement (LAHE) de l'université de Biskra (Algérie) et le laboratoire national d'hydraulique et de l'environnement et d'électricité de France (EDF-LNHE Chatou). En raison de sa facilité d'implantation sur le couronnement, et surtout de son efficacité en comparaison avec les déversoirs à crête linéaire.

Un exemple de ce type de déversoir ; (la construction en cours) d'un déversoir en labyrinthe développé sur le barrage d'Ouldjet Mellegue (Tébessa- Algérie). (**A.N.B.T., 2015**)

Dans ce présent travail, une littérature scientifique approfondie a été consacrée aux déversoirs en labyrinthe développés afin de mieux comprendre l'influence de ses paramètres géométriques, ses fonctionnements et leurs rendements du point de vue hydraulique.

#### III-2 NOTION DU DEVERSOIR EN LABYRINTHE DEVELOPPE

Le déversoir en labyrinthe développé à l'origine est un déversoir non rectiligne en labyrinthe traditionnel, mais il se caractérise en comparaison par l'ancien labyrinthe par l'existence des radiers inclinés des alvéoles amont et aval, ce qui favorise l'utilisation des porte-à-faux. (**LEMPÉRIÈRE et al., 2003**).

Cette nouvelle forme de déversoir représente une alternative économique et efficace pour l'évacuation des crues et l'accroissement de la capacité des retenues des barrages.

Leurs principaux avantages sont les suivants :

- Pas d'organes mobiles, donc une fiabilité accrue ;
- Très peu d'entretien.
- Il réduit considérablement le coût de la construction de la plupart des nouveaux barrages ;
- Peut assurer la sécurité des barrages à faible coût ;

- Peut assurer le stockage ou l'efficacité de prévention des crues de plusieurs barrages existants ;
- Peut être placé sur des sections réduites de barrages poids existants ou nouveaux ;
- Permet l'évacuation des débits spécifiques jusqu'à  $100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  ;
- Il est structurellement simple et facile à construire avec les ressources locales de chaque pays ;
- Multiplie le débit spécifique d'un déversoir Creager par trois ou plus pour la même largeur du déversoir et sous la même charge.
- Le déversoir en labyrinthe développé peut être employé pour des débits spécifiques de 5 à  $100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ .



**Figure III-01 : Déversoir en labyrinthe développé réalisé en 2010 au barrage de Gloriettes, dans les Pyrénées – France**

### **III-3 CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DU DEVERSOIR EN LABYRINTHE DEVELOPPE**

Le déversoir en labyrinthe développé tire son nom de sa géométrie particulière, alternance d'alvéoles amont et aval. Ces alvéoles sont de forme rectangulaire afin de simplifier la géométrie de l'ouvrage. Leur dimensionnement résulte d'un compromis entre l'augmentation de la capacité du déversoir par profilage des alvéoles et la diminution des coûts par simplification de la structure. Les radiers des alvéoles présentent des pentes alternées, favorisant l'utilisation de porte-à-faux. Il se caractérise par ces principaux paramètres géométriques :

P : la hauteur du déversoir (m)

W : la largeur d'un cycle d'alvéoles (m)

L : longueur développée du déversoir ( $L=a+b+2B$ ) (m)

n : le nombre de cycle

B : la longueur du déversoir latéral (m)

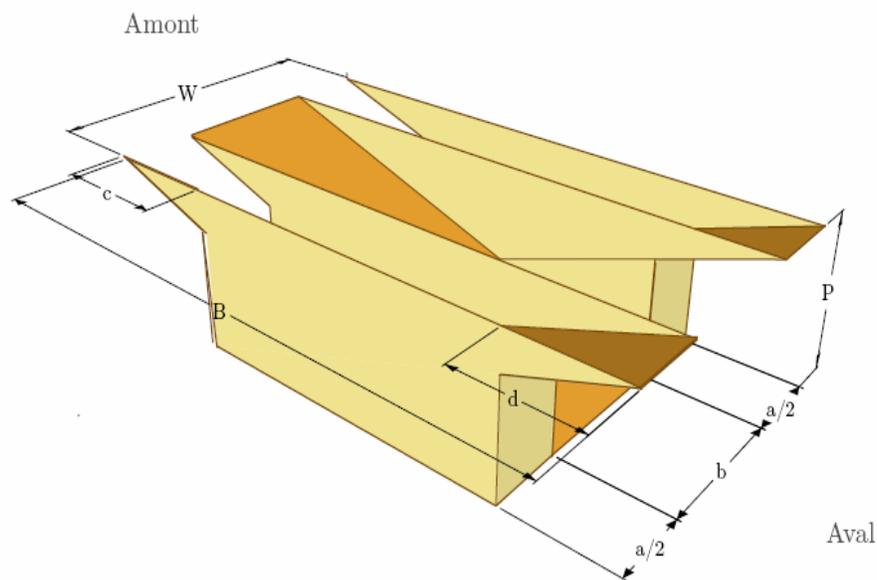
B' : largeur de la base (m)

a : la largeur de l'alvéole amont (m)

b : la largeur de l'alvéole aval (m)

c : la longueur du porte-à-faux amont (m)

d : la longueur du porte-à-faux aval (m)



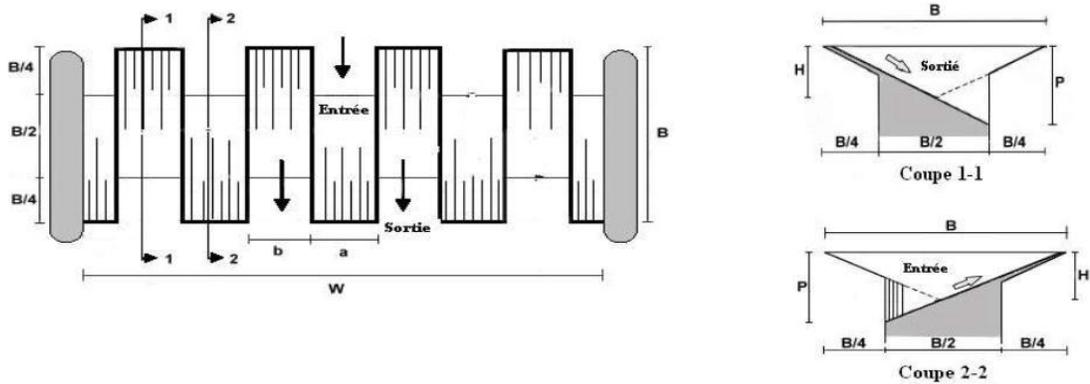
**Figure III-02: Configuration géométrique d'un élément de déversoir en labyrinthe développé (LEMPÉRIÈRE et al., 2006)**

#### III-4 TYPES DES DEVERSOIRS EN LABYRINTHE DEVELOPPE

Deux types de déversoir en labyrinthe développé ont été sélectionnés, le premier avec des porte-à-faux en amont et en aval (type A) et le second avec des porte-à-faux en amont (type B).

**III-4-1 Déversoir en labyrinthe développé (type A)**

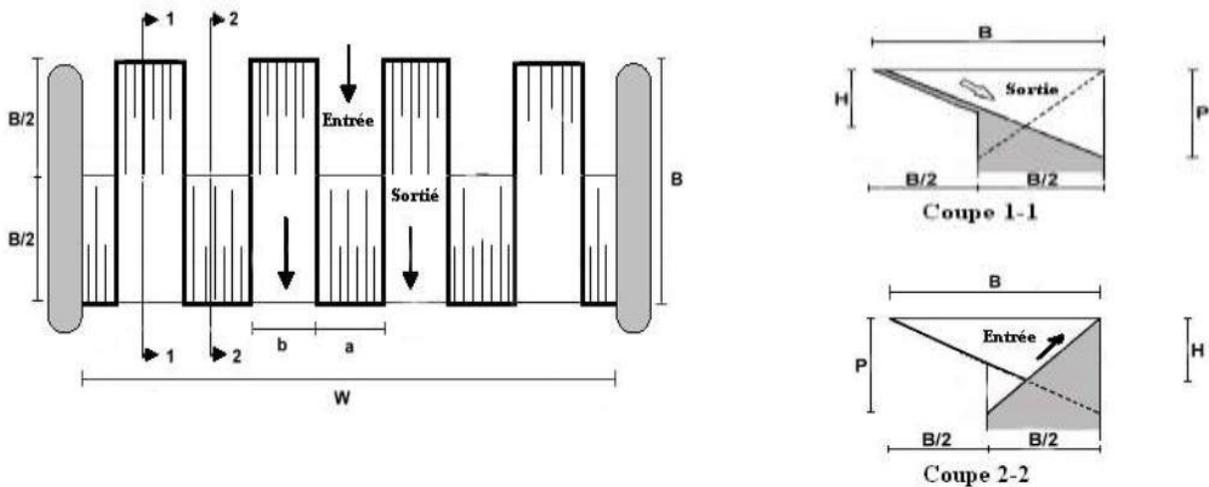
Les porte-à-faux amont et aval sont identiques (Figure III-03). Ce type de déversoir peut être une solution pour l'amélioration de la capacité des retenues et/ou la capacité d'évacuation de plusieurs déversoirs des barrages existants (LEMPERIERE et al., 2006)



**Figure III-03 : Déversoir en labyrinthe développé - (type A)**

**III-4-2 Déversoir en labyrinthe développé (type B)**

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



**Figure III-04 : Déversoir en labyrinthe développé – (type B)**

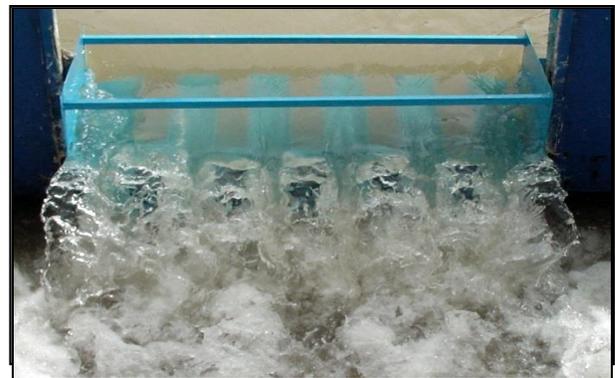
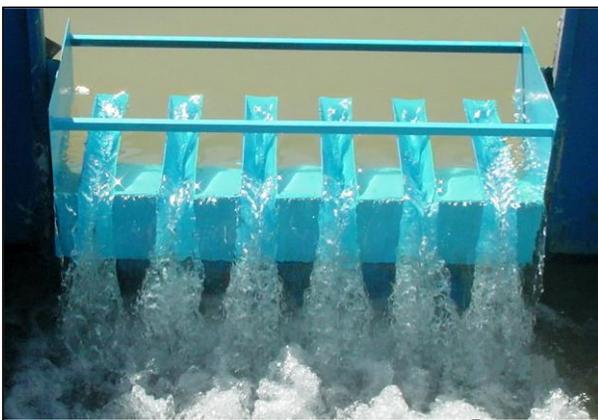
### III-5 MODE D'ÉCOULEMENT SUR LE DEVERSOIR EN LABYRINTHE DEVELOPPE

L'écoulement sur le déversoir en labyrinthe développé se caractérise par deux nappes déversantes, la première sous forme d'un jet du fond qui s'écoule le long du radier incliné de l'alvéole aval et la deuxième sous forme d'un écran plus au moins mince. La deuxième nappe qui est superficielle favorise l'aération du déversoir à cause de la présence des porte-à-faux (*Figure III-05*). Ce type d'écoulement est remarqué pour des charges faibles ou moyennes. Par contre, l'écoulement prend la forme d'une nappe solidaire quand la charge sur le déversoir devient importante (**LEMPERIERE et al, 2006**).



**Figure III-05 : Écoulement en deux nappes déversantes sur déversoir en labyrinthe développé**

Lorsque le seuil du déversoir se termine par une chute libre de la lame déversante, il convient de veiller à la bonne aération de cette lame afin d'éviter la mise en dépression entre cette lame et le corps du barrage.



**Figure III-06 : Mode de l'écoulement sur le déversoir en labyrinthe développé**

**(LEMPERIERE et al, 2006).**

### III-6 PERFORMANCE HYDRAULIQUE

La performance hydraulique du déversoir en labyrinthe développé est en fonction des paramètres sans dimensions dérivant directement de la géométrie du déversoir et de la charge d'exploitation qui sont d'importance principale (LEMPERIERE et al, 2006).

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

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

$$C_w = f\left(\frac{D}{P}, \frac{W}{P}, \frac{L}{W}, \frac{b}{a}, \frac{c}{d}, \frac{h^*}{P}, \frac{t}{P}, \frac{R}{P}\right) \quad (\text{III-01})$$

### III-7 ANALYSE DE LA CAPACITE D'EVACUATION

Le débit spécifique du déversoir en labyrinthe développé est comparé ci-dessous au débit du déversoir standard de type Creager en fonction de la profondeur de la lame déversante  $h^*$  :

- Le débit spécifique d'un déversoir Creager est près de  $2,2h^{*1.5}$  ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ).
- Le débit spécifique d'un PK-Weir est près de  $1,7nh^{*1.5}$  pour  $h^* < 0.3H$ .

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

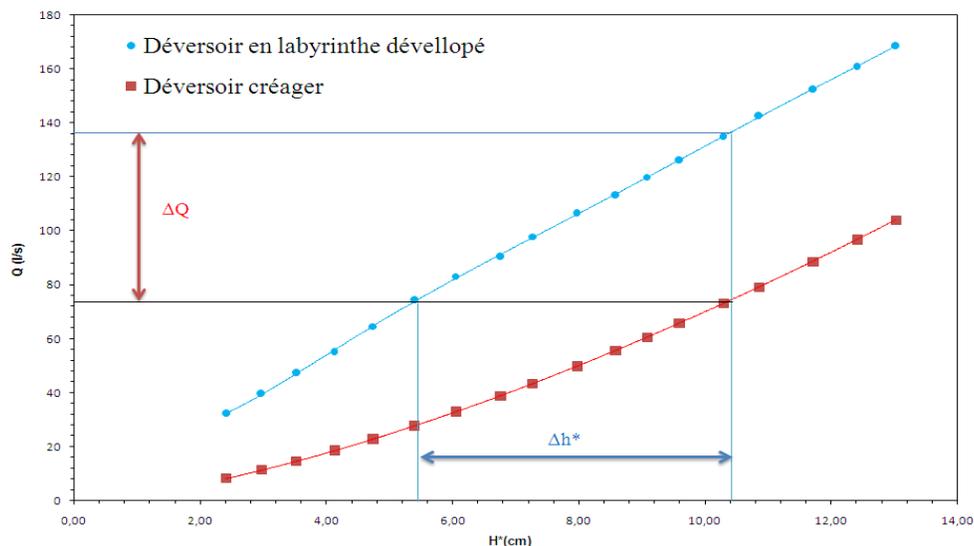


Figure III-07 : Comparaison de débit entre le déversoir en labyrinthe développé et le déversoir Creager

### III-8 TRAVAUX D'OPTIMISATION DU DEVERSOIR EN LABYRINTHE DEVELOPPE (TYPE A) - UNIVERSITE DE BISKRA

Le déversoir en labyrinthe développé (type A) a fait l'objet d'une investigation intensive au laboratoire Aménagements Hydrauliques et Environnement de l'Université de Biskra (LAHE) pour optimiser sa géométrie selon ses rapports adimensionnels.

#### III-8-1 Rapport d'aspect vertical, W/P

Le rapport d'aspect vertical qui représente la géométrie verticale peut avoir deux indications, la première reflète l'effet de la variation de la hauteur pour une largeur de cycle fixe et la seconde indique l'influence de la variation de la largeur pour une hauteur du déversoir fixe.

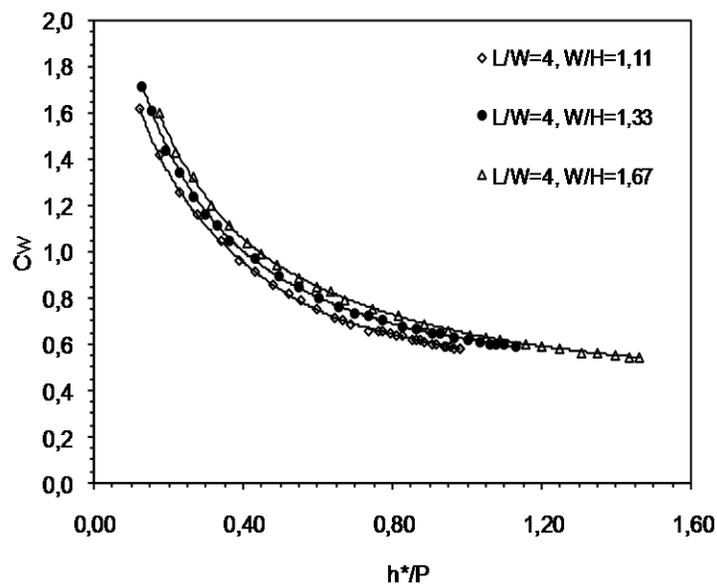


Figure III-08 : Coefficient de débit en fonction du rapport de l'aspect vertical W/P

Les résultats des essais obtenus sur trois modèles du déversoir en labyrinthe développé de même largeur de cycle et de hauteur différente indiquent que le coefficient de débit du déversoir est dépendant du paramètre W/P.

L'accroissement de la hauteur de 25% fait augmenter la capacité d'évacuation d'environ 6% (Figure III-08).

### III-8-2 Longueur relative, $L/W$

Le travail réalisé par (LEMPERIERE et al, 2006), montre effectivement que l'accroissement de la longueur du déversoir en labyrinthe développé fait augmenter la capacité d'évacuation d'une manière significative, faire augmenter le ratio  $L/W$  de deux fois cela conduit à un accroissement du coefficient de débit de plus de 50% pour les charges relatives  $h^*/P < 0.4$ . Cependant, l'efficacité diminue remarquablement pour les charges relatives  $h^*/P > 0.6$ .

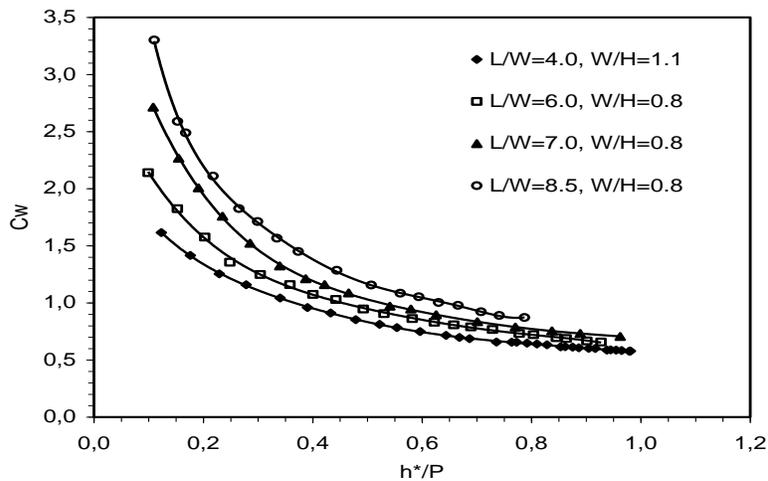


Figure III-09 : Coefficient de débit en fonction du ratio  $L/W$

### III-8-3 Largeur des alvéoles a et b

Pour vérifier l'impact de la variation de la largeur des alvéoles amont et aval sur l'écoulement trois cas ont été considéré ( $b/a = 0.67, 1.0$  et  $1.5$ ).

L'étude a montré que le choix de la largeur de l'alvéole amont supérieure à l'alvéole aval permet d'avoir un rendement meilleur, en particulier pour les charges relatives  $h^*/P < 0.5$ .

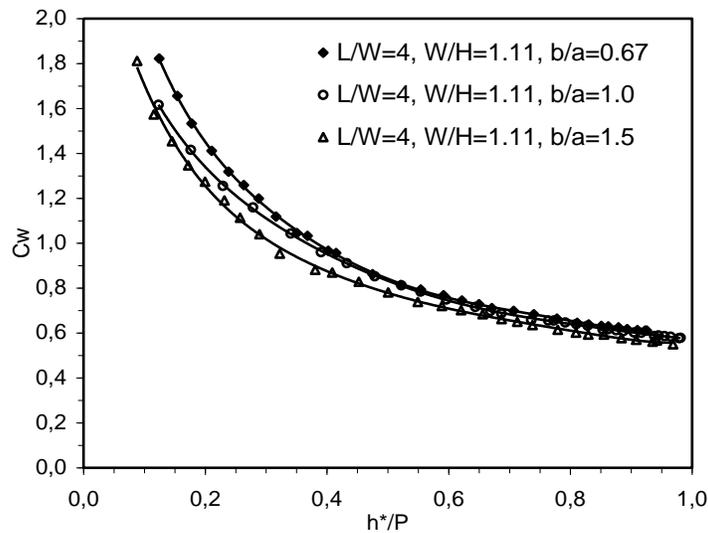


Figure III-10 : Coefficient de débit en fonction de la largeur des alvéoles amont et aval

### III-8-4 Impact de la longueur des porte-à-faux

Une étude expérimentale a été effectuée sur trois modèles à différentes dispositions de porte-à-faux. L'étude a montré que :

- La disposition sans porte-à-faux aval ( $d/c=0$ ) se caractérise par un rendement plus élevé que les modèles avec porte-à-faux aval.
- le rendement de la disposition avec des porte-à-faux symétriques ( $d/c=1$ ) est plus grand que celui du modèle avec des porte-à-faux non symétriques.

De ce fait, le modèle sans porte-à-faux aval peut être considéré comme une solution pour les grands débits spécifiques (LEMPERIERE et al, 2006).

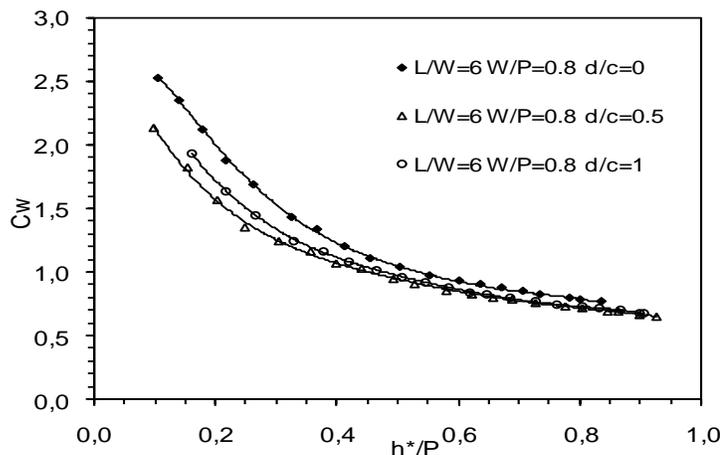


Figure III-11: Coefficient de débit en fonction de la longueur des porte-à-faux

### III-8-5 Impact des corps flottants

Les déchets flottants peuvent provenir des décharges, des campings et haltes nautiques, des exploitations agricoles, des industriels et artisans, ou encore des berges. Ils s'accumulent contre les barrages.

La figure (III-12) montre l'impact des corps flottants qui se caractérise par une réduction du coefficient de débit pour des charges relatives  $H^*/P < 0.5$ , au-delà de cette valeur, l'écoulement redevient normal et le coefficient de débit prend des valeurs égales aux valeurs correspondant à l'écoulement libre.

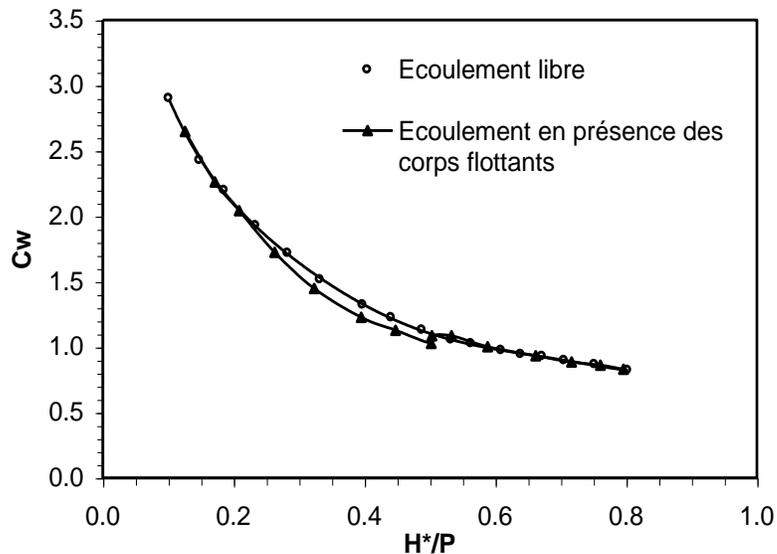


Figure III-12 : Coefficient de débit en fonction de la présence des corps flottants

### III-9 TRAVAUX D'OPTIMISATION DU DEVERSOIR EN LABYRINTHE DEVELOPPE (TYPE B) – UNIVERSITE DE BISKRA

Le déversoir en labyrinthe développé du (type B) a fait l'objet d'une étude détaillée au laboratoire Aménagements Hydrauliques et Environnement (Université de Biskra) pour définir la forme optimale de ce type de déversoir. Ce travail qui a été réalisé par (NOUI et al., 2007).

### II-9-1 Impact du ratio L/W

L'étude du ratio L/W a fait l'objet d'expérimentation de trois modèles des ratios ( $L/W=4$ ), ( $L/W=6$ ), ( $L/W=8$ ), le déversoir en labyrinthe développé avoir des écarts très faibles de rendement pour des pentes ( $P/B \leq 0.36$ ), mais pour des pentes ( $P/B \geq 0.5$ ) le déversoir en labyrinthe développé continue à avoir des écarts très remarquables de rendement;

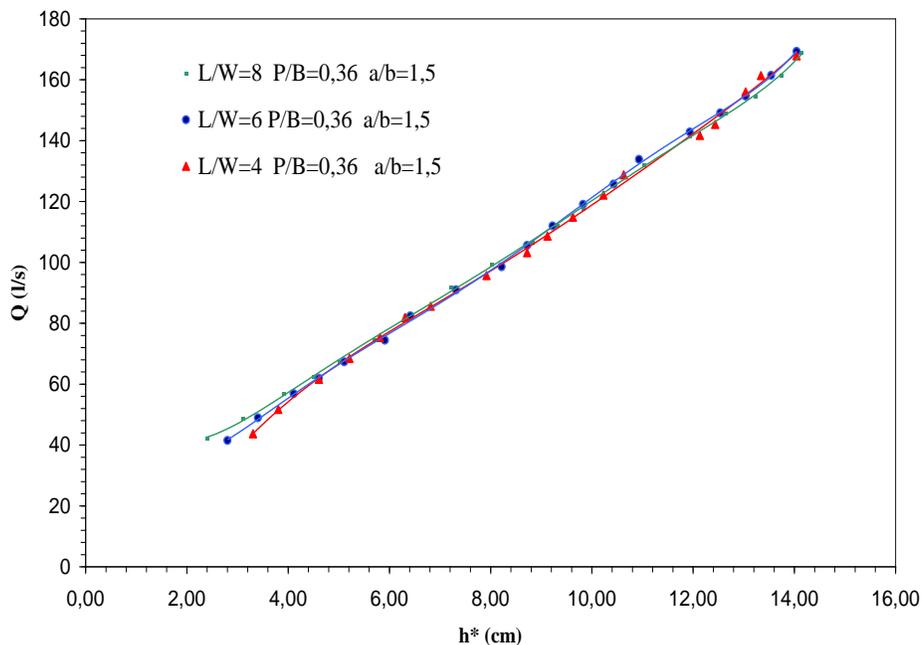


Figure III-13 : Courbe des débits en fonction du ratio L/W

### III-9-2 Impact de la largeur relative des alvéoles a/b

L'expérimentation de trois modèles de largeur d'alvéoles différentes ( $a$ ,  $b$ ) a montré que la largeur des alvéoles la plus efficace correspond à une largeur de l'alvéole amont égale à 1.2 fois la largeur de l'alvéole aval. Ceci peut être intéressant de point de vue pratique et économique. Donc, il est plus rentable de concevoir le déversoir en labyrinthe développé avec un ratio  $a/b=1,2$ .

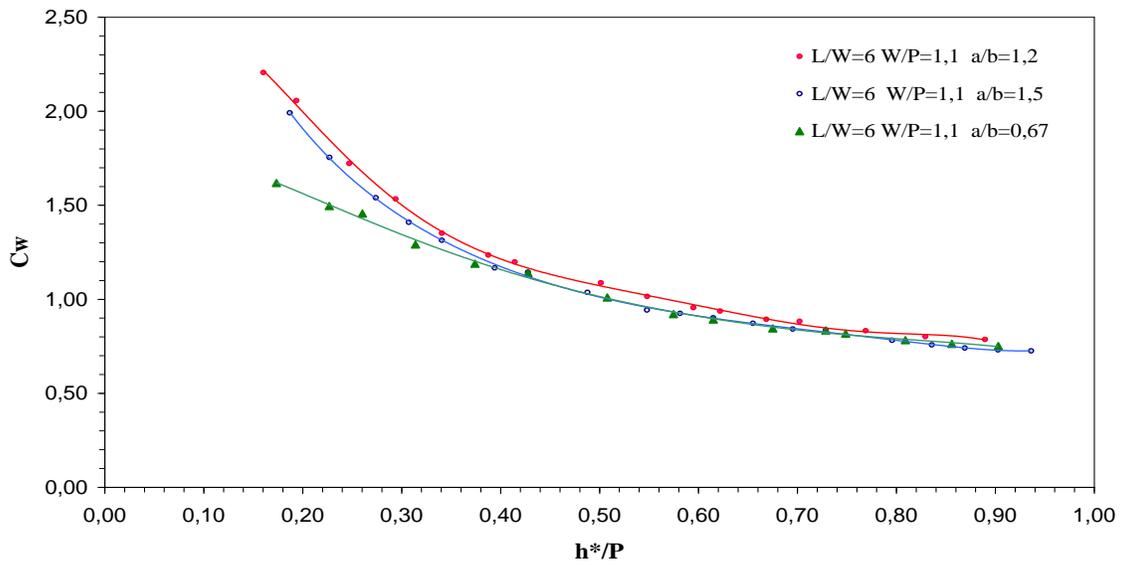


Figure III-14 : Coefficient de débit en fonction des largeurs des alvéoles amont et aval

### III-9-3 Impact du ratio W/P

L'étude expérimentale de trois modèles du déversoir en labyrinthe développé de même dimensions ( $L/W=4$ ,  $a/b=1.5$ ) et de hauteur  $P$  (15, 20 et 25cm) a montré que l'augmentation de la hauteur du déversoir de 25% fait croître le débit d'environ 5% pour les charges moyennes.

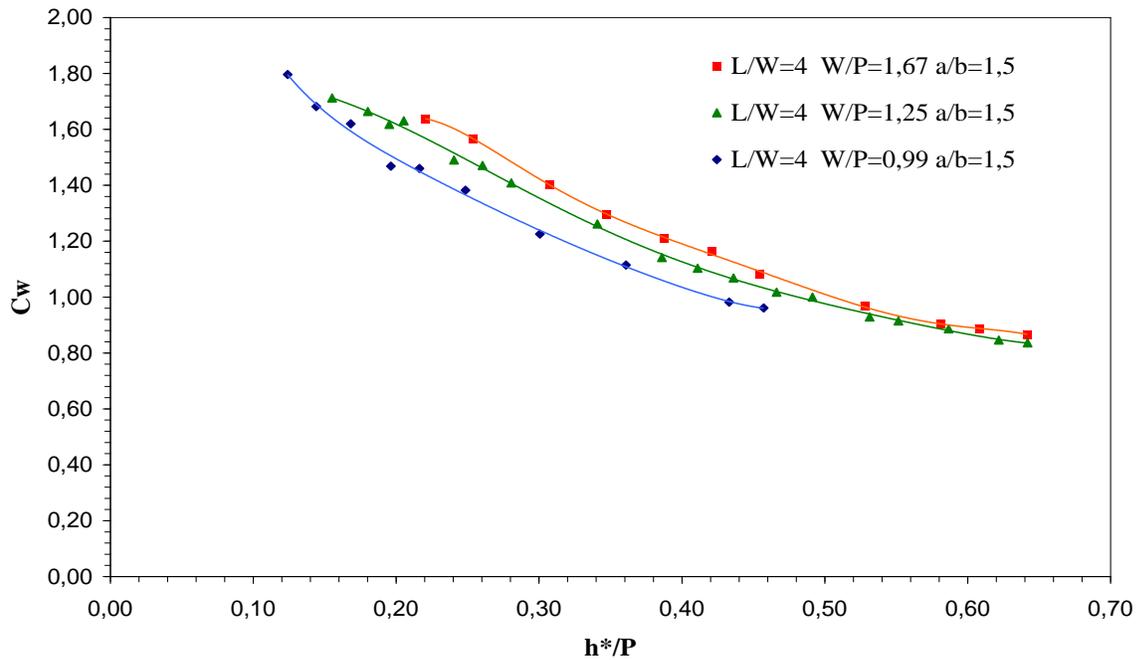


Figure III-15: Coefficient du débit en fonction du rapport de l'aspect vertical W/P

### III-9-4 Impact de la longueur de la paroi latérale B

Cette étude a montré que l'augmentation de la longueur des parois latérales n'a d'influence remarquable que pour les grandes charges, cette différence n'a pas d'intérêt pratique puisque le déversoir en labyrinthe développé est généralement conçu pour fonctionner sous des faibles et moyennes charges.

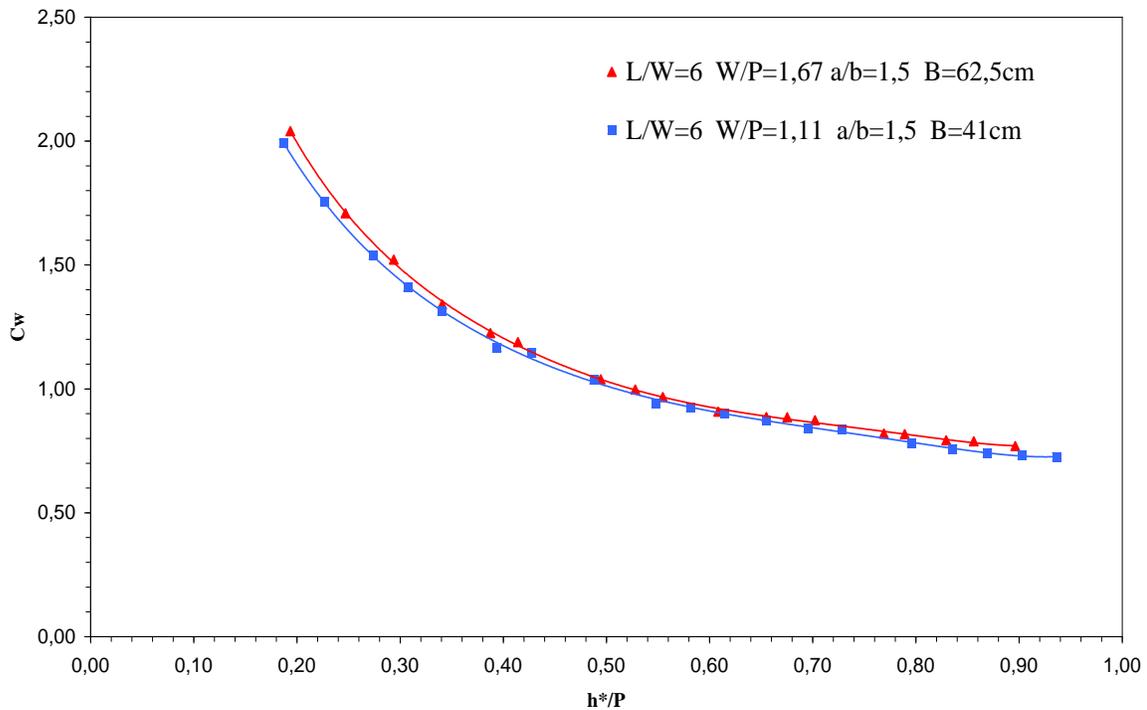


Figure III-16: Coefficient de débit en fonction de la longueur de la paroi latérale

### III-10 INFLUENCE DE DIFFERENTES CONDITIONS SUR LA PERFORMANCE DU DEVERSOIR EN LABYRINTHE DEVELOPPE

D'autres travaux qui concernent l'influence des conditions d'approche sur la performance du déversoir en labyrinthe développé ont fait l'objet des études détaillées au laboratoire Aménagements Hydrauliques et Environnement (Université de Biskra). Ces travaux ont été réalisés par (BELAABED et al., 2011) et (BORDJI et al., 2013).

### III-10-1 Effet du taux de remplissage de la surface du plan d'eau aval

(BELAABED et al., 2011) ont réalisé une étude sur l'influence des conditions aval sur l'amont, cette étude a montré que la limite du taux de remplissage est égale à une hauteur des marches de 50% de la hauteur du déversoir, les marches sont réalisées dans chaque alvéole aval et le niveau d'eau aval n'influe sur les conditions amont que si la surface du plan d'eau aval dépasse le niveau de la crête du déversoir en labyrinthe développé.

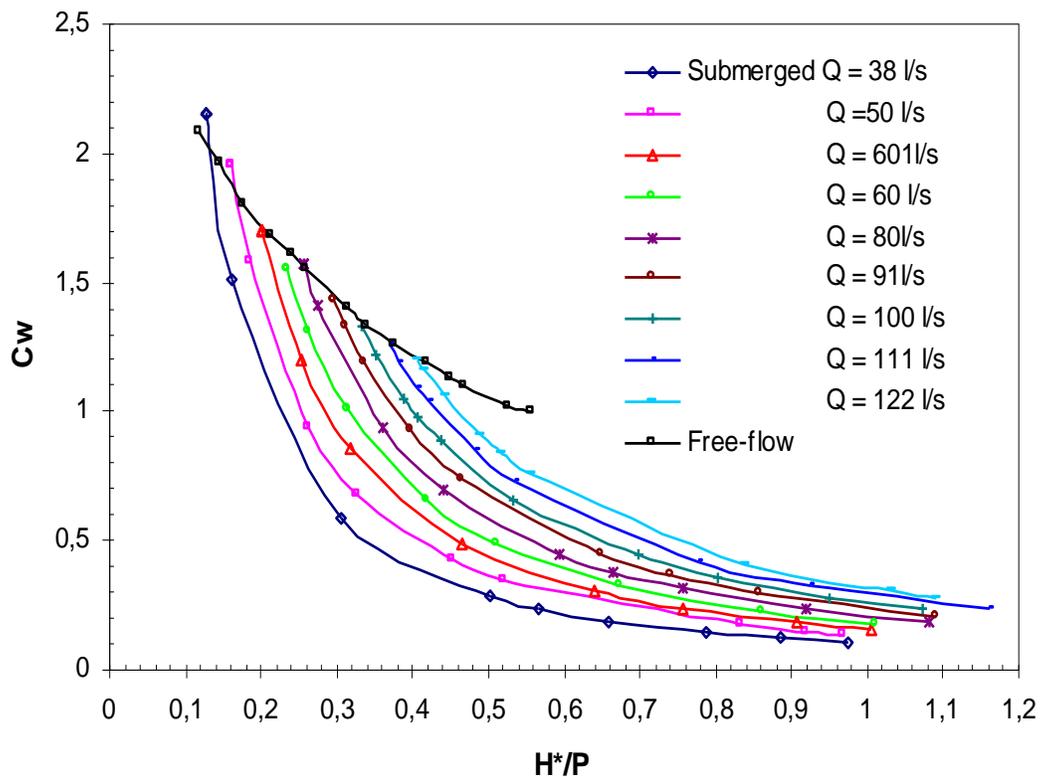


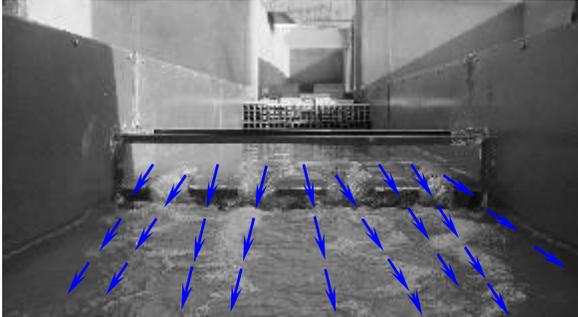
Figure III-17: Influence du niveau aval sur l'écoulement en amont (BELAABED et al., 2011)

### III-10-2 Effet de la contraction latérale sur l'écoulement

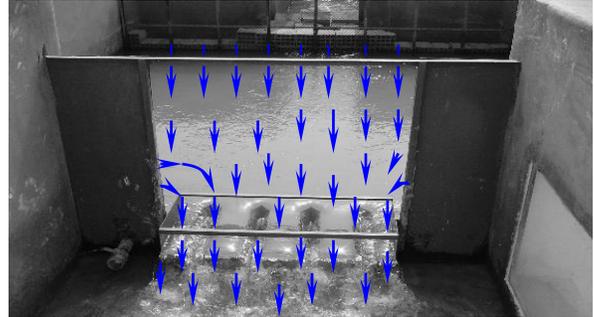
Le déversoir en labyrinthe développé peut être réalisé dans un canal de même largeur que l'emprise du déversoir ou sur le contour d'une retenue ce qui engendre une largeur amplement supérieure à la largeur du déversoir. Ainsi, deux cas ont été étudiés:

Pour le premier cas, le déversoir en labyrinthe développé est inséré dans un canal de même largeur, donc, il est considéré sans contraction latérale ( $W=W_c$ ). les filets liquides sont parallèles et l'alimentation du déversoir se fait frontalement par rapport à l'axe longitudinal du déversoir.

Le second cas correspond à l'insertion du déversoir en labyrinthe développé dans une retenue, avec contraction latérale ( $W < W_c$ ). Dans cette condition, l'écoulement est frontal au centre et radial sur les cotés ce qui engendre un étranglement au niveau de la section d'entrée du déversoir.



a- Modèle du déversoir sans contraction latérale

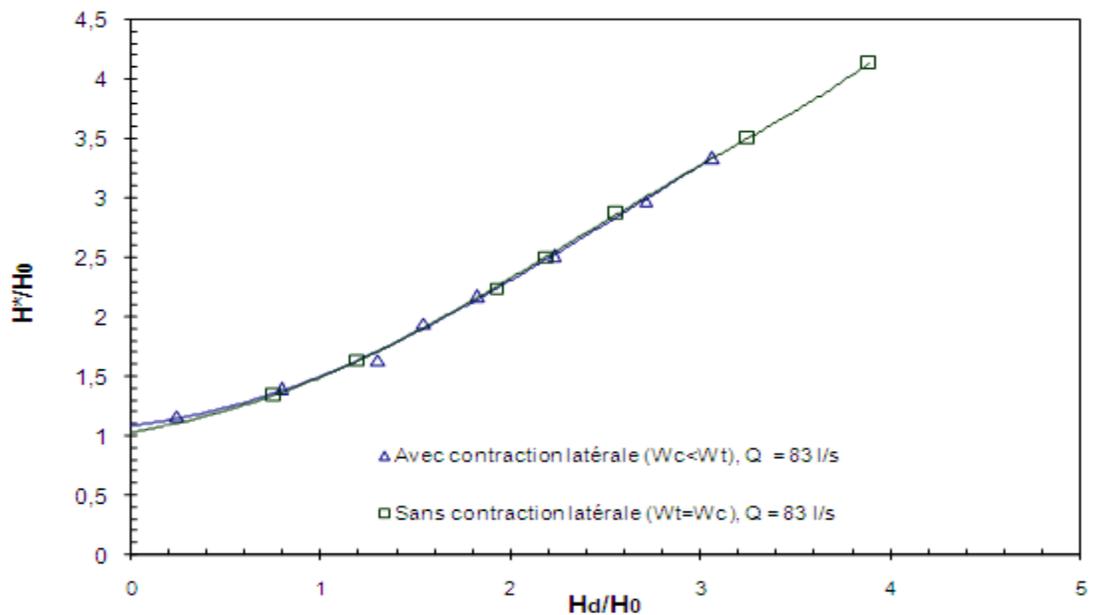


b Modèle du déversoir avec contraction latérale

**Figure III-18 : Modèles de déversoir avec et sans contraction latérale**

(BELAABED et al., 2011)

L'expérimentation a montré que l'évolution du niveau d'eau amont en fonction du niveau aval est indépendante de la contraction latérale du déversoir en labyrinthe développé pour les deux cas étudiés.

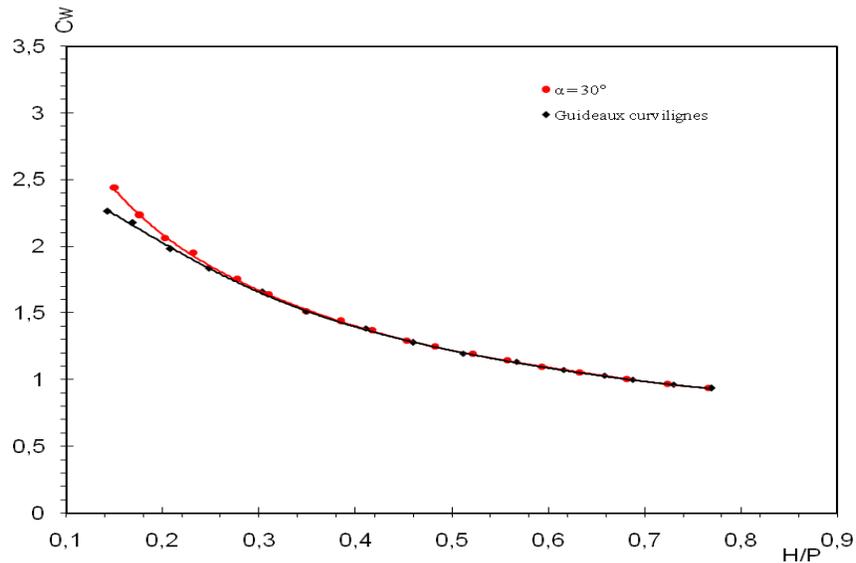


**Figure III-19 : Courbes de la charge relative amont en fonction de la charge relative aval**

(BELAABED et al., 2011)

### III-10-3 Rendement des guideaux curviligne

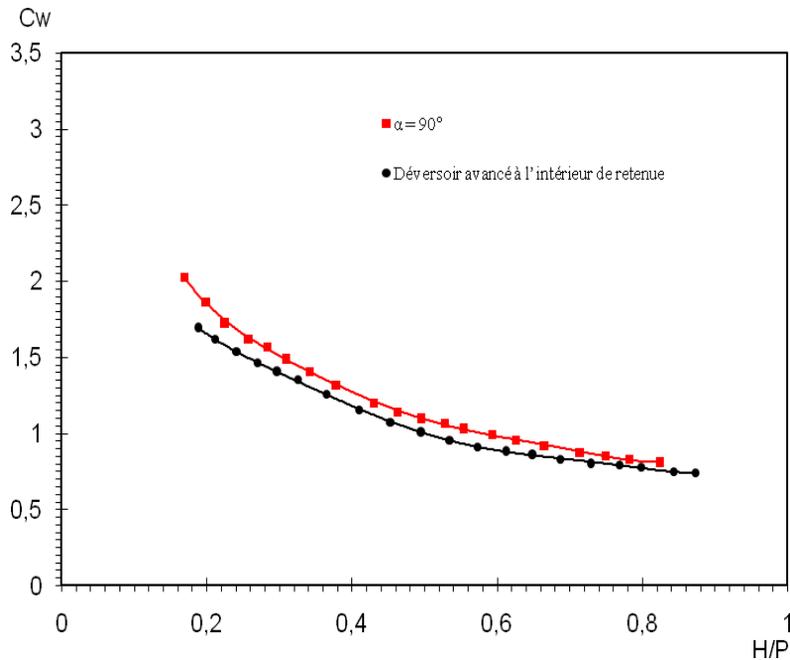
La forme curviligne des guideaux peut avoir un résultat favorable sur le rendement du déversoir en labyrinthe développé. Ainsi, il a été remarqué des résultats obtenus que la conception du déversoir avec des guideaux curviligne donne un rendement élevé, semblable à celui obtenu pour la meilleure disposition des guideaux rectilignes ( $\alpha = 30^\circ$ ). Ceci peut être justifié par le fait que la forme d'entrée curviligne permet de diriger l'écoulement vers l'exutoire sans aucune perturbation de l'écoulement.



**Figure III-20 : Comparaison du coefficient de débit pour un déversoir sans guideaux ( $\alpha = 90^\circ$ ) et celui avec des guideaux curvilignes (BORDJI et al., 2013)**

### III-10-4 Emplacement avancé du déversoir en labyrinthe développé dans la retenue

Cette disposition se caractérise par une alimentation frontale et latérale du déversoir, mais qui est différente de celle avec contraction latérale. Selon les résultats obtenus, il a été constaté que la disposition avancée du déversoir engendre une réduction de sa performance. La performance dans ces conditions est plus faible de 9% que le cas avec contraction latérale.

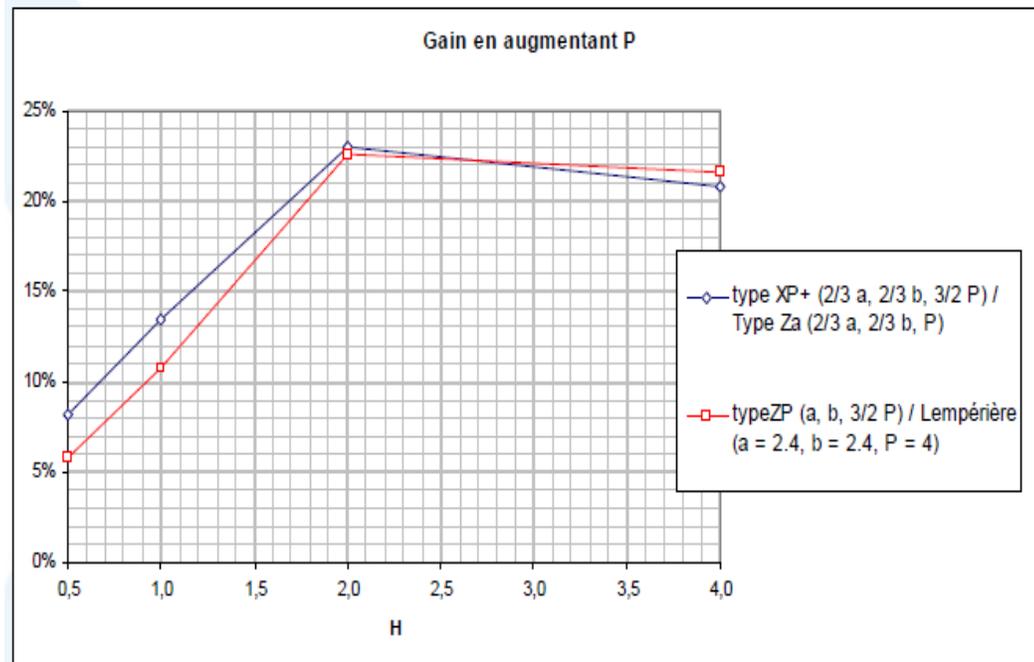


**Figure III-21 : Coefficient de débit de la disposition avancée du déversoir en labyrinthe développé et celle avec contraction latérale (BORDJI et al., 2013)**

### III-11 DIFFERENTS TRAVAUX DE RECHERCHE SUR LA PERFORMANCE DU DEVERSOIR EN LABYRINTHE DEVELOPPE AU NIVEAU INTERNATIONAL :

#### III-11-1 Effet de la hauteur de la pelle sur la performance du déversoir en labyrinthe développé

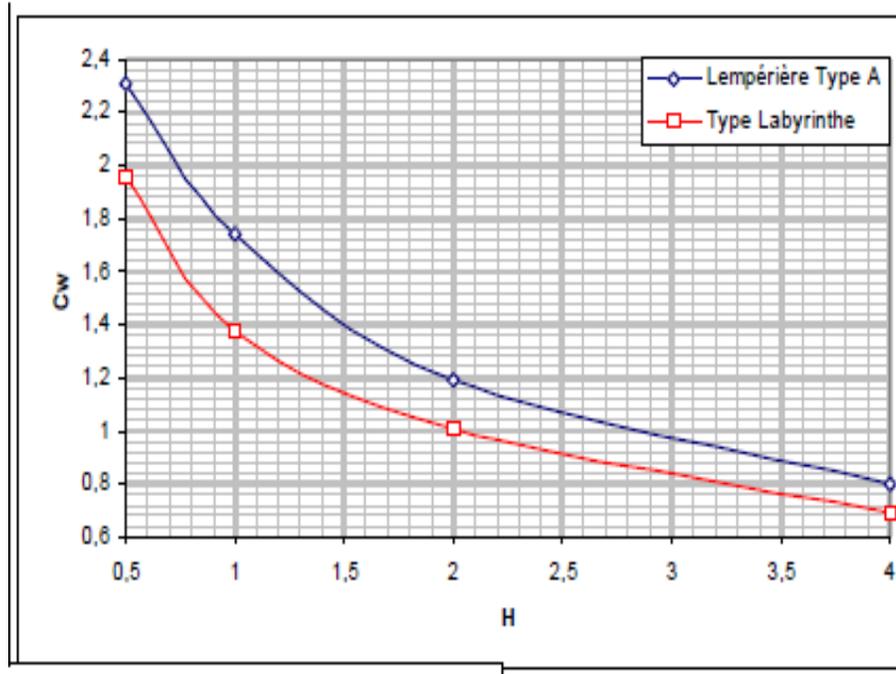
Les travaux de (BLANCHER and al., 2011) concernant l'effet de la pelle sur la performance du déversoir en labyrinthe développé ont montré que l'augmentation de la hauteur de la pelle à l'aval du déversoir en labyrinthe développé (type A) fait augmenter la capacité d'évacuation d'une manière importante.



**Figure III-22 : Influence de la hauteur de la pelle sur la performance  
du déversoir en labyrinthe développé (BLANCHER and al., 2011)**

### III-11-2 Travaux de comparaison entre le déversoir en labyrinthe développé et le déversoir en labyrinthe traditionnel

- Les travaux de (ANDERSON et al, 2011), ont montré que la comparaison entre un déversoir en labyrinthe développé avec un déversoir labyrinthe traditionnel rectangulaire correspondant révèle que le déversoir en labyrinthe développé a une meilleure efficacité de décharge si l'on compare le coefficient de débit global ;
- D'autres travaux de (BLANCHER and al., 2011), ont montré ainsi que la comparaison entre un déversoir en labyrinthe développé avec un déversoir labyrinthe traditionnel trapézoïdale révèle que le déversoir en labyrinthe développé a une meilleure efficacité de décharge.
- Les travaux de (SCHLEISS., 2011), ont montré aussi que la comparaison entre un déversoir en labyrinthe développé avec un déversoir labyrinthe traditionnel ; le gain d'efficacité du déversoir en labyrinthe développé peut atteindre 20% devant un déversoir labyrinthe traditionnel.



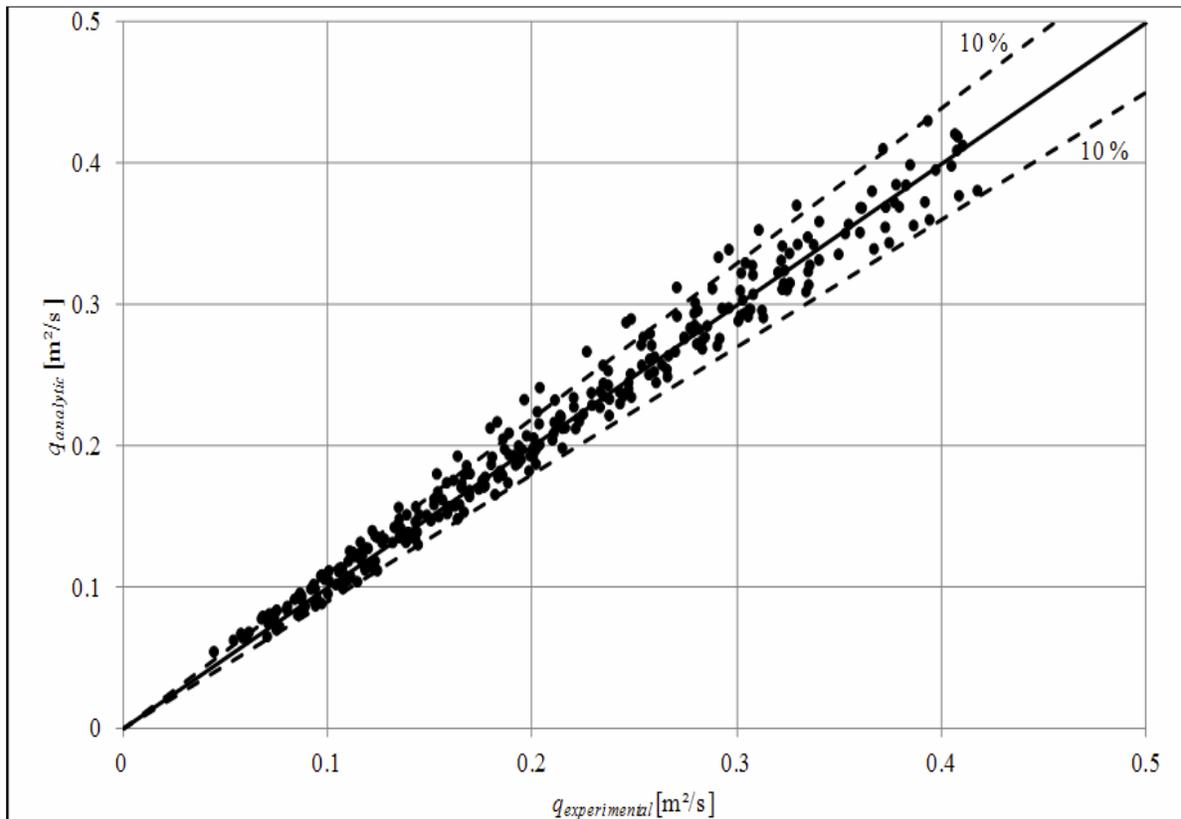
**Figure III-23 : Comparaison entre le déversoir en labyrinthe développé et le déversoir en labyrinthe traditionnel (ANDERSON et al, 2011)**

### III-11-3 Effet de creusement des alvéoles (Parapet) sur la performance du déversoir en labyrinthe développé (type A)

Des travaux de recherche de l'effet de creusement des alvéoles sur la performance du déversoir en labyrinthe développé (type A) ont été effectués au laboratoire ARGENCO à l'université de Liège (Belgique) en 2012.

Trois modèles du déversoir en labyrinthe développé ont été testés avec différentes profondeurs de creusement des alvéoles ( $d'=10\text{cm}$ ,  $d'=5\text{cm}$ ,  $d'=0\text{cm}$ ). Ils sont considérés lors des essais que les porte-à-faux amont (C) et aval (D) ne sont pas symétriques, ont des valeurs variables à chaque expérimentation par rapport à la hauteur maximale du déversoir (P).

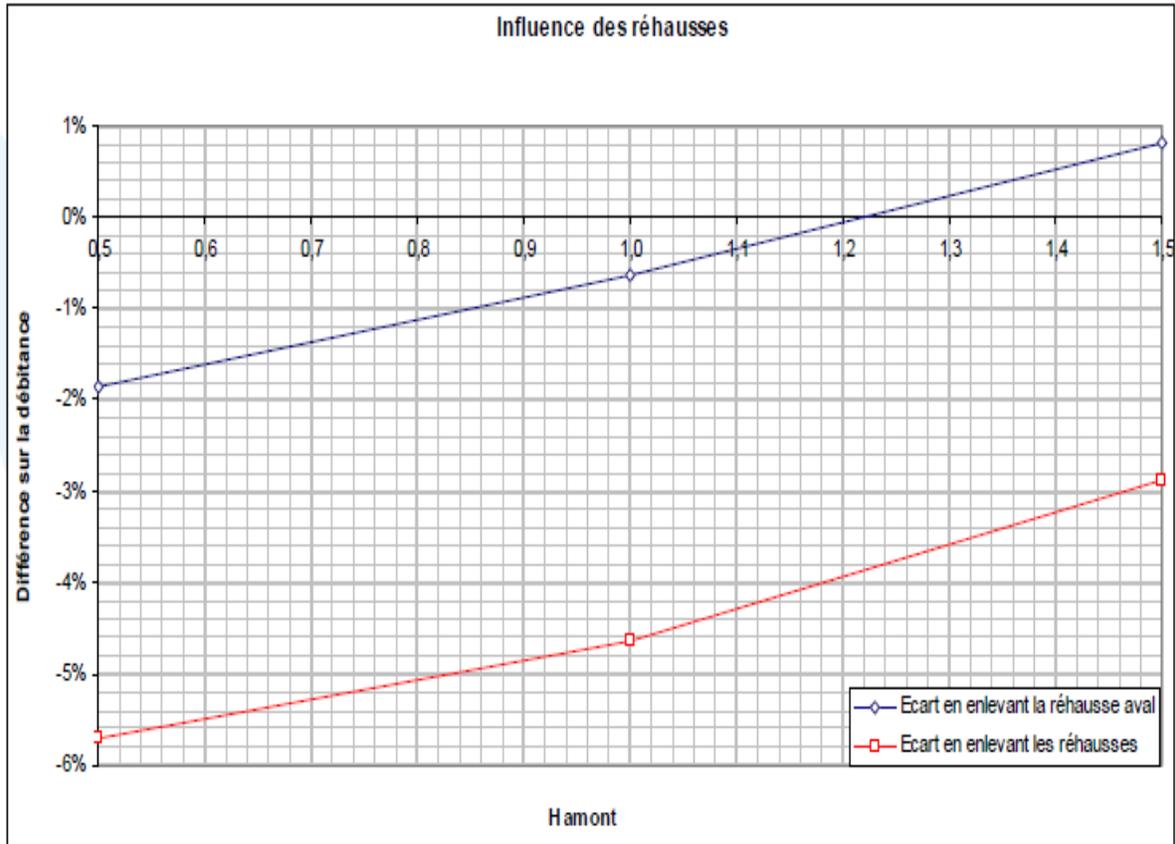
Les résultats montrent que la performance des modèles du déversoir en labyrinthe développé (type A) avec rehausses est modérée en comparaison avec le modèle du déversoir en labyrinthe développé (type A) sans rehausses. (MACHIELS and al., 2012)



**Figure III-24 : Comparaison analytique de l'effet de rehausses sur la performance du déversoir en labyrinthe développé (MACHIELS and al., 2012)**

D'autres travaux de l'effet de creusement des alvéoles sur la performance du déversoir en labyrinthe développé (type A) ont été effectués par (MARCELO et al., 2013). Ces travaux ont montré que :

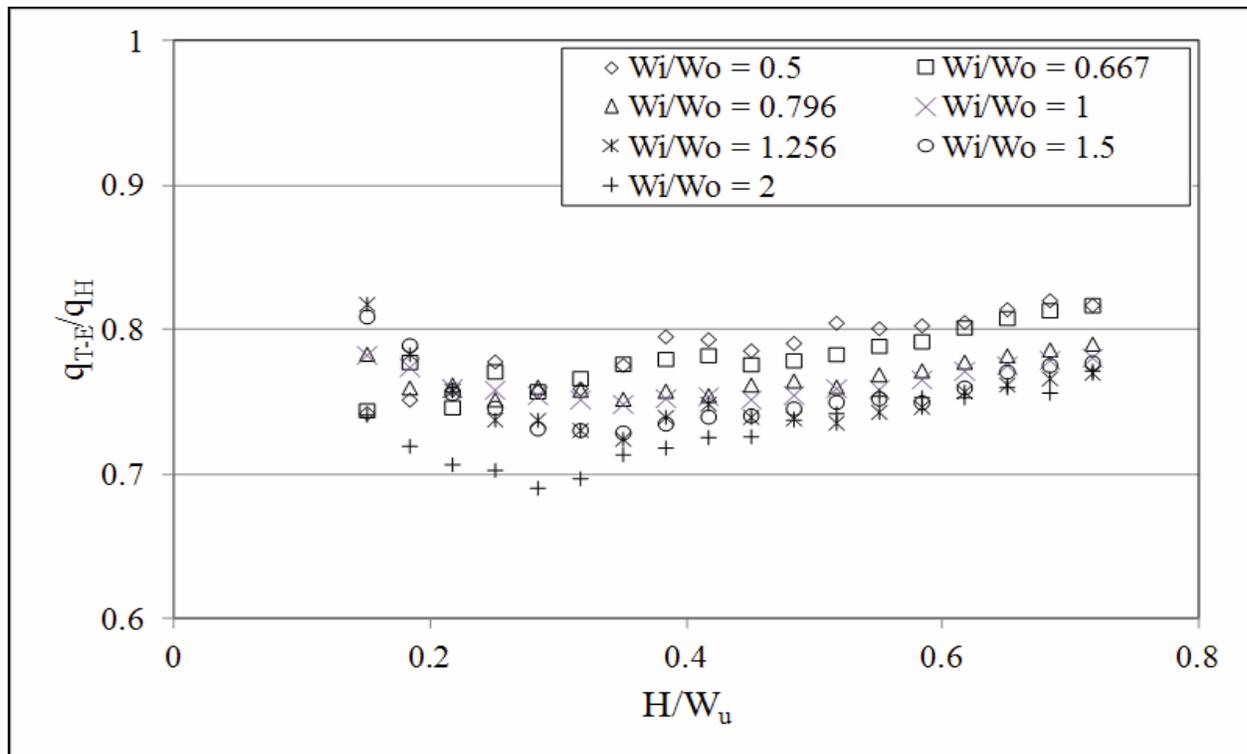
- Le creusement des alvéoles en aval apporte peu à la capacité d'évacuation du déversoir en labyrinthe développé.
- Le creusement des alvéoles en amont a un impact bénéfique sur la capacité d'évacuation du déversoir en labyrinthe développé.



**Figure III-25 : Effet de creusement des alvéoles sur la performance du déversoir en labyrinthe développé (type A) (MARCELO et al., 2013)**

#### **III-11-4 Effet de largeur des alvéoles sur la performance du déversoir en labyrinthe développé (type A) (PIROTTON et al., 2012)**

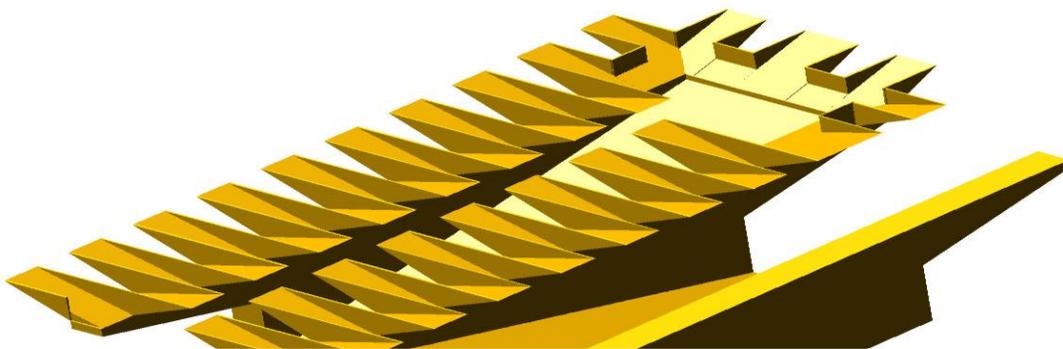
Quatorze modèles du déversoir en labyrinthe développé ont été testés avec différentes largeurs des alvéoles afin d'explorer le ratio optimum entre la largeur de l'alvéole amont sur la largeur de l'alvéole aval ( $a/b$ ). Les résultats montrent que le ratio hydraulique optimum est compris entre (1.25 et 1.5), tandis que le ratio optimum économique correspond à la valeur ( $a/b=1$ ).



**Figure III-26 : Influence du ratio (a/b) sur la performance du déversoir en labyrinthe développé (type A) (PIROTTON et al., 2012)**

### III-11-5 Etude de la performance du déversoir en labyrinthe développé fractal

Des travaux ont été réalisés au laboratoire national d'hydraulique et environnement d'EDF - France sur le déversoir en labyrinthe développé « fractal » ; augmentation considérable du rapport  $N=L/W$ .



**Figure III-27 : Configuration géométrique du déversoir en labyrinthe développé Fractal**

(Source: EDF - 2009)

L'expérimentation sur 9 modèles testés de différentes configurations a montré que :

- Le déversoir fractal peut atteindre un gain fort de 90% pour  $H = 0,5$  m
- Se caractérise par une décroissance rapide du gain : 40% pour  $H = 1$  m

Malgré son efficacité du point de vue hydraulique, mais il se caractérise par :

- sa construction sur les digues est très compliquée
- risque de vibration mécanique sur les murs

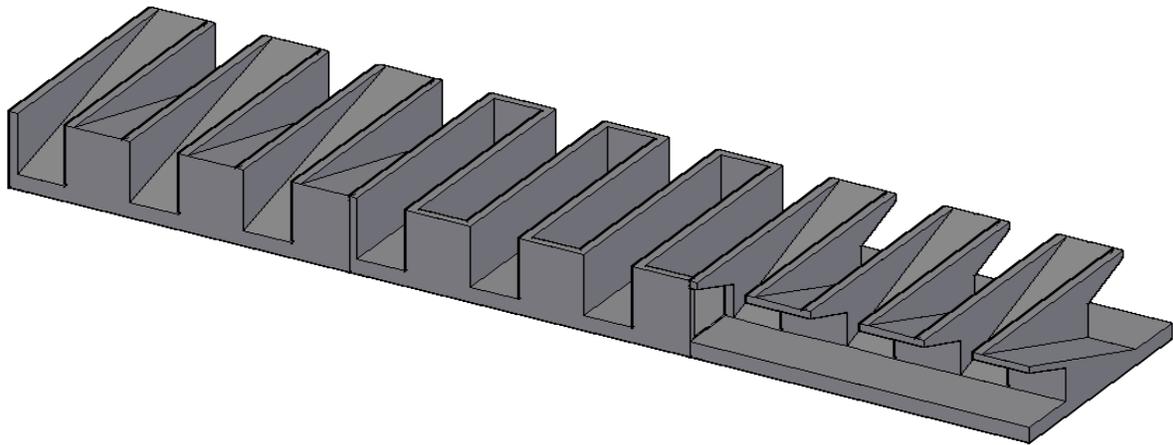
Fractal	H = 0.5 m	Gain / Lemp.	H = 1 m	Gain / Lemp.	H = 1.5 m	Gain / Lemp.
v1	4,7	31%	7,1	-8%		
v2	3,7	1%	7,1	-8%		
v3	4,2	15%	7,3	-5%		
v4	4,7	30%	7,7	0%		
v5	5,4	50%	9,5	24%	12,0	-4%
v6	5,7	58%	9,6	25%	13,2	5%
v7	5,5	52%	9,7	26%	13,5	8%
v8	5,6	54%	9,5	23%	13,2	6%
<b>Lempérière</b>	<b>3,6</b>		<b>7,7</b>		<b>12,5</b>	
<b>Référence</b>	<b>2,6</b>		<b>6,6</b>		<b>10,6</b>	

Tableau III-01 : Résultats expérimentaux du déversoir fractal (Source: EDF - 2009)

### III-11-6 Etude de la performance du déversoir en labyrinthe développé – cas des petits barrages (TA KHANH et al., 2011)

Cette étude a été réalisée en 2011 par trois laboratoires VNCOLD (Vietnam) et HCMUT (Vietnam) et le laboratoire national d'hydraulique et de l'environnement et d'électricité de France (EDF-LNHE Chatou) a pour objectif de vérifier la capacité d'évacuation des déversoirs en labyrinthe développés (type A) et (type B) et les déversoirs en labyrinthes traditionnels rectangulaires dans le cas des petits barrages.

Cette étude a été basée sur deux modèles physiques et numériques par l'utilisation du logiciel Flow-3D.



**Figure III-28 : Vue en 3D (déversoirs en labyrinthe développés (type A) et (type B) et déversoir traditionnel rectangulaire) testés (TA KHANH et al., 2011)**

Les résultats (figure III-29) de la comparaison entre la performance de trois types de déversoirs testés (déversoirs en labyrinthe développés (type A) et (type B) et un déversoir traditionnel rectangulaire) dans le cas des petits barrages ont montré que :

- L'intérêt du déversoir en labyrinthe développé (type B) dans le cadre de faibles barrages ;
- Le déversoir en labyrinthe développé (type B) être moins sensible à l'effet de submersion, sa capacité de décharge correspond presque le déversoir en labyrinthe développé (type A) dans des conditions très submergées ;
- Le déversoir en labyrinthe développé (type B) offre un comportement de stabilité très intéressant surtout pour les barrages fondés sur des roches faibles ou une épaisse couche d'alluvions.
- La quantité de béton nécessaire pour le déversoir en labyrinthe développé (type B) est nettement plus élevée que pour le déversoir en labyrinthe développé (type A) ou le déversoir rectangulaire traditionnel labyrinthe, mais son taux d'armature est beaucoup moins qui peut équilibrer la comparaison des coûts entre les structures en fonction du coût de la matière locale du projet.
- Le déversoir en labyrinthe développé (type B) semble être plus facile à construire, nécessitant coffrages moins complexes et moins de bétons.

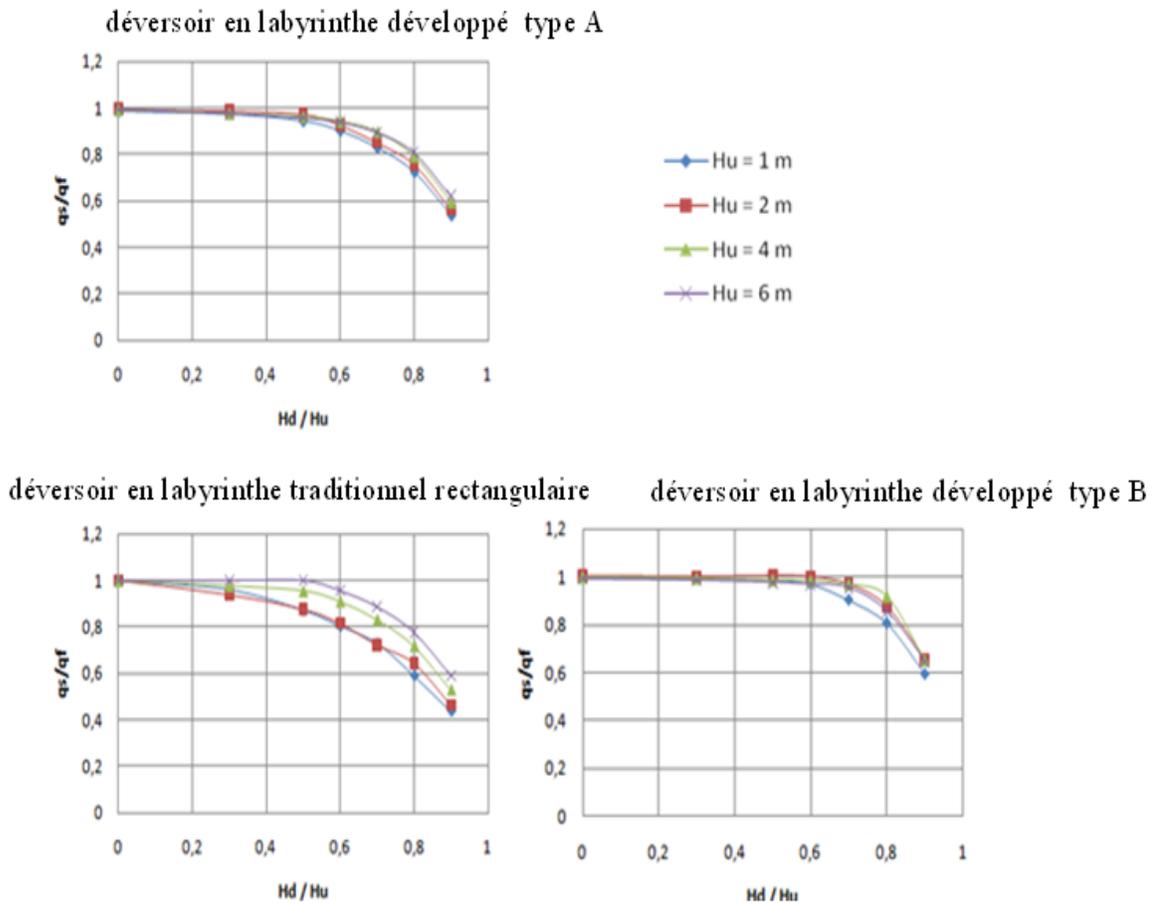


Figure III-29 : Courbes de submersion pour les trois déversoirs testées (TA KHANH et al., 2011)

### III-11-7 Impact des corps flottants sur la performance du déversoir en labyrinthe développé (TULLIS et al, 2011)

L'accumulation de sédiments ou de débris flottant peut être une problématique aux déversoirs, le dépôt de sédiments ou embâcles peuvent nécessiter un nettoyage et l'enlèvement à intervalles réguliers pour éliminer les obstacles d'écoulement et de maintenir les performances des déversoirs. L'accumulation de sédiments pourrait réduire la capacité de débit et une augmentation des inondations en amont des barrages.

Dans ce sens, (TULLIS et al, 2011) ont réalisés des travaux sur l'effet des corps flottants sur la performance des évacuateurs de crues non rectilignes, notamment les déversoirs en labyrinthe traditionnels et les déversoirs en labyrinthe développés.

Ses travaux sur trois géométries du déversoir en labyrinthe développé et déversoir en labyrinthe traditionnel dans un modèle physique réduit, ont montrés que :

- Une augmentation de la hauteur d'eau de 16% en amont du chaque déversoir pour des débits plus élevés ;
- Une augmentation de la hauteur d'eau en amont du chaque déversoir de 67% pour les faibles débits ;
- La conception et l'entretien des déversoirs en labyrinthe développés et les déversoirs en labyrinthes traditionnels doivent certainement considérer les effets des débris pour les situations où une charge de débris lourds est prévu.

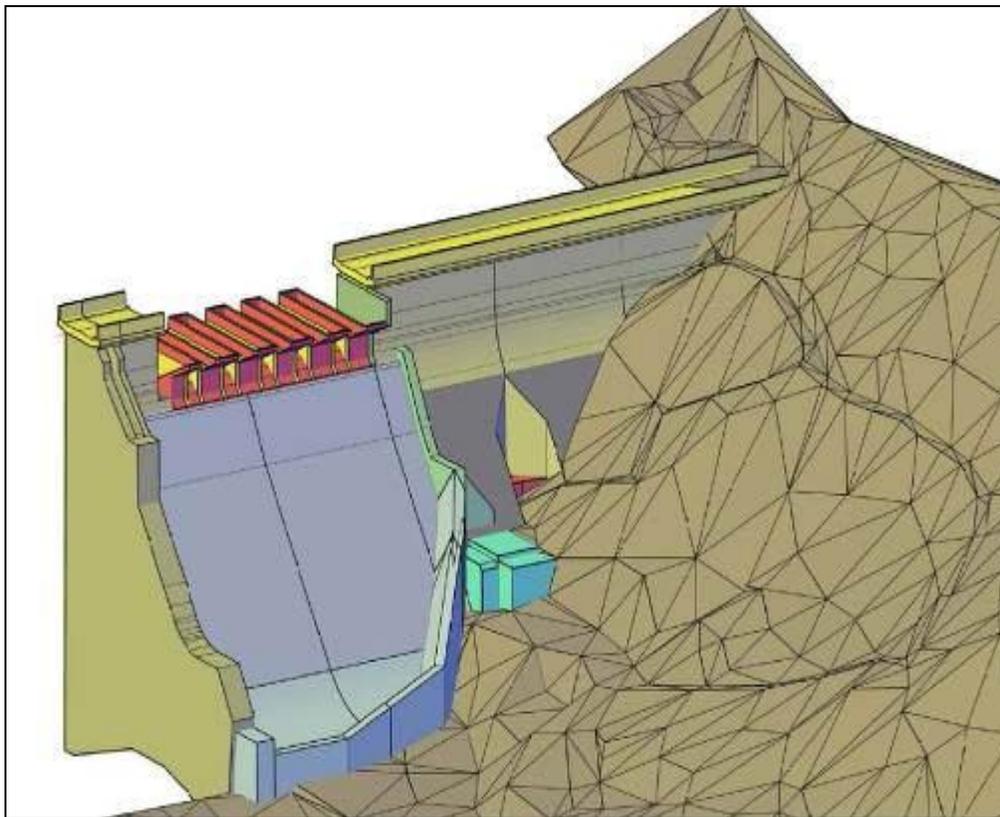


**Figure III-30 : Essai sur l'effet des corps flottants (TULLIS et al, 2011)**

### III-12 APPLICATION DU DEVERSOIR EN LABYRINTHE DEVELOPPE POUR QUELQUES BARRAGES EN FRANCE

En raison de l'efficacité du déversoir en labyrinthe développé, plusieurs projets de réhabilitation de la capacité d'évacuation des barrages existants ont été effectués en France tels que :

- Le barrage de la Ravière en 2012 (figure III-31)
- Le barrage de Gloriette en 2010
- Le barrage de Saint-Marc 2009
- Le barrage de Goulours en 2006



**Figure III-31 : Barrage de la Ravière – installation virtuelle du déversoir en labyrinthe développé (vue en aval) (source : AOF Maquettes 2012- France)**

La réhabilitation de l'évacuateur de crues du barrage de la Ravière en France a montré que la cote de retenue normale reste inchangée. Le fonctionnement de l'ouvrage n'est pas modifié. Seule la cote des plus hautes eaux est augmentée de 50 cm, soit 663,5 NGF.

Le fonctionnement des organes de crues existant ne sera pas modifié. Une nouvelle consigne de crue sera établie. Elle intégrera le fonctionnement du déversoir en labyrinthe développé. Le tableau suivant indique les débits évacués par les différents évacuateurs :

<b>Cote</b>	<b>EVC existants (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Déversoir en labyrinthe développé (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Total (m<sup>3</sup>/s)</b>
RN (662 NGF)	801	0	801
Nouvelle PHE (663.50 NGF)	1120	284	1404

**Tableau III-02 : Débits évacués par les différents évacuateurs de crues (EDF –France)**

### **III-13 APPLICATION DU DEVERSOIR EN LABYRINTHE DEVELOPPE POUR QUELQUES BARRAGES EN VIETNAM**

Les déversoirs en labyrinthe développés ont été sélectionnés en combinaison avec des vannes dans le cadre de la conception du projet barrage de Van Phong (figure III-32), car ils peuvent renverser une décharge importante pour une profondeur de nappe faible, ce qui correspond à la contrainte du site de l'existence de bas niveau d'eau en amont.

Cette solution est plus sûre et moins cher que les autres solutions. Le barrage de Van Phong a été étudié en laboratoire avec trois modèles à différentes échelles, il est maintenant en cours de construction.

- La crue de projet est estimée à 14.400 m<sup>3</sup>/s (vannes et déversoir en labyrinthe développé)
- Débit à évacuer par le déversoir en labyrinthe développé: 8.100 m<sup>3</sup>/s
- Longueur du seuil déversoir en labyrinthe développé : 290 m



**Figure III-32 : Barrage de Van Phong – en cours de construction - Vietnam**

### III-14 CONCLUSION

Le présent travail a eu pour objectif de passer en revue les principaux travaux effectués soit au niveau local, soit au niveau international, sur les nouveaux déversoirs non rectilignes, notamment les déversoirs en labyrinthe développés.

Cette étude nous a permis de définir la géométrie du déversoir en labyrinthe développé, le mode d'écoulement et leur rendement de point de vue hydraulique :

- La nouvelle forme de déversoir développé par (**LEMPERIERE et al., 2003**) représente une alternative économique et efficace pour l'évacuation des crues et l'accroissement de la capacité des retenues des barrages.
- Il réduit considérablement le coût de la construction de la plupart des nouveaux barrages ;
- Pas d'organes mobiles, donc une fiabilité accrue ;
- Très peu d'entretien ;
- Peut assurer la sécurité des barrages à faible coût ;
- Peut assurer le stockage ou l'efficacité de prévention des crues de plusieurs barrages existants ;
- Peut être placé sur des sections réduites de barrages poids existants ou nouveaux ;
- Permet l'évacuation des débits spécifiques jusqu'à  $100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ .
- Il est structurellement simple et facile à construire avec les ressources locales de chaque pays.

- Ce nouveau type de déversoir multiplie le débit spécifique d'un déversoir Creager par trois ou plus pour la même largeur du déversoir et sous la même charge.
- Deux types du déversoir en labyrinthe développé ont été sélectionnés, le premier avec des porte-à-faux en amont et en aval (type A) et le second avec des porte-à-faux en amont (type B) (**LEMPERIERE et al., 2006**)
- L'écoulement sur le déversoir en labyrinthe développé se caractérise par deux nappes déversantes, la première sous forme d'un jet du fond qui s'écoule le long du radier incliné de l'alvéole aval et la deuxième sous forme d'un écran plus au moins mince. La deuxième nappe qui est superficielle favorise l'aération du déversoir à cause de la présence des porte-à-faux. (**LEMPERIERE et al., 2006**).
- Le coefficient du débit du déversoir en labyrinthe développé est en fonction des paramètres adimensionnels suivants  $C_w = f\left(\frac{D}{P}, \frac{W}{P}, \frac{L}{W}, \frac{b}{a}, \frac{c}{d}, \frac{h^*}{P}, \frac{t}{P}, \frac{R}{P}\right)$
- Le déversoir en labyrinthe développé de (type A) a fait l'objet d'une étude expérimentale détaillée, qui a permis de déterminer l'impact de la plupart des paramètres géométriques et l'impact des paramètres adimensionnels qui régissent sur le rendement de ce type de déversoir.
- Le déversoir en labyrinthe développé de (type B) a fait l'objet de quelques essais expérimentaux, qu'il montre son efficacité hydraulique par ses paramètres géométriques (**NOUI et al., 2007**).
- Les conditions d'approche sur le rendement du déversoir en labyrinthe développé montrent que :
  - Le niveau d'eau aval n'influe pas sur les conditions en amont, sauf si la surface du plan d'eau aval dépasse le niveau de la crête du déversoir (**BELAABED et al., 2011**).
  - La forme curviligne des guideaux peut avoir un résultat favorable sur le rendement du déversoir (**BORDJI et al., 2013**).
- Les travaux de recherche sur le déversoir en labyrinthe développé à l'international sont vastes en raison que le déversoir en labyrinthe développé se caractérise par de nombreux paramètres géométriques régissant son écoulement. On peut citer :

- L'augmentation de la hauteur de la pelle à l'aval du déversoir en labyrinthe développé (type A) fait augmenter sa capacité d'évacuation d'une manière importante ;
  - Les travaux de comparaison entre un déversoir en labyrinthe développé avec un déversoir en labyrinthe traditionnel ont montré que le déversoir en labyrinthe développé a une meilleure efficacité de décharge si l'on compare le coefficient de débit global ;
  - Les travaux de l'effet de creusement des alvéoles sur la performance du déversoir en labyrinthe développé (type A) (**MARCELO et al., 2013**) ont montré que le creusement des alvéoles en aval apporte peu à la capacité d'évacuation du déversoir en labyrinthe développé, ainsi que le creusement des alvéoles en amont a un impact bénéfique sur la capacité d'évacuation du déversoir en labyrinthe développé ;
  - La performance du déversoir en labyrinthe développé (type A) avec rehausses est modérée en comparaison avec le déversoir en labyrinthe développé (type A) sans rehausses (**MACHIELS and al., 2012**).
  - Le ratio hydraulique optimum des largeurs des alvéoles est compris entre (1.25 et 1.5), tandis que le ratio optimum économique est correspond à la valeur ( $a/b=1$ ).
  - Le déversoir en labyrinthe développé fractal montre son efficacité hydraulique malgré sa complexité de construction, mais il reste de vérifier son comportement mécanique ;
  - Les travaux de la comparaison entre la performance de trois types de déversoirs testés (déversoirs en labyrinthe développés (type A) et (type B) et un déversoir traditionnel rectangulaire) dans le cas des petits barrages, ont montré que le déversoir en labyrinthe développé (type B) reste une solution très efficace devant le déversoir en labyrinthe développé (type A) et les déversoirs traditionnels rectangulaires, notamment pour les petits barrages (**TA KHANH et al, 2011**).
  - Les travaux de (**TULLIS et al, 2011**), sur l'effet des corps flottants sur la performance des déversoirs en labyrinthe développés et les déversoirs en labyrinthe traditionnels, ont montré qu'il faut prendre en considération l'effet du blocage des déversoirs par des énormes sédiments l'or de la conception et l'entretien des déversoirs.
- La réhabilitation des barrages existants impose fréquemment une augmentation de leur capacité d'évacuation (France, Vietnam). Dans de nombreuses situations, le déversoir en labyrinthe développé offre une solution compacte et efficace.

**Partie II**

**Etude Analytique,**

**Expérimentale**

**& Numérique**

# Chapitre IV :

Analyse Dimensionnelle

Appliquée aux Déversoirs

rectilignes &

Déversoirs non

rectilignes

**CHAPITRE IV**  
**ANALYSE DIMENSIONNELLE APPLIQUEE AUX DEVERSOIRS**  
**RECTILIGNES ET DEVERSOIRS NON RECTILIGNES**

**IV-1 INTRODUCTION**

Les équations fondamentales de la mécanique des fluides et de la thermique sont le plus souvent difficiles à résoudre. Les solutions analytiques sont même rares et les solutions numériques sont parfois lourdes de mise en œuvre et coûteuses en temps de calcul. On peut alors avoir recours à l'étude expérimentale soit en vraie grandeur, soit par l'intermédiaire de maquettes. On peut aussi remplacer la résolution des équations de base, qui donne des informations locales, par des modélisations plus globales du problème. Ces modèles font appel à des corrélations semi-empiriques déduites d'expérimentations réalisées dans des conditions particulières, mais dont le résultat doit être extrapolable à d'autres conditions qui seront dites semblables (**LALLEMAND., 2000**).

L'objectif de ce travail était l'étude comparative des déversoirs rectilignes et les déversoirs non rectilignes, afin de mieux comprendre l'influence de ses paramètres géométriques sur ses rendements hydrauliques, et de proposer des méthodes de pré-dimensionnement de ces ouvrages. Ceci ne peut être réalisable que par une combinaison d'analyse dimensionnelle et expérimentale. Dans ce contexte, une analyse dimensionnelle est nécessaire pour déterminer les paramètres adimensionnels qui régissent l'écoulement sur ces types des déversoirs.

À cet effet, dans ce présent travail, nous tenterons d'examiner par voie analytique les paramètres adimensionnels régissant l'écoulement sur les déversoirs rectilignes en mince paroi et les déversoirs non rectilignes creusés.

## IV-2 DEFINITION DE LA MODELISATION

La modélisation est la représentation d'un système par un autre, plus facile à appréhender. Il peut s'agir d'un système mathématique ou physique. Le modèle sera alors numérique ou analogique. (LALLEMAND., 2000).

### IV-2-1 La modélisation numérique

La modélisation numérique consiste à construire un ensemble de fonctions mathématiques décrivant le phénomène. En modifiant les variables de départ, on peut ainsi prédire les modifications du système physique (LALLEMAND., 2000).

### IV-2-2 La modélisation analogique

La modélisation analogique (physique) consiste à construire un système physique qui reproduit plus ou moins un phénomène que l'on souhaite étudier. L'observation du comportement du modèle permet de tirer des enseignements sur le phénomène d'intérêt, elle se caractérise par deux principaux outils: l'analyse dimensionnelle et la similitude physique (LALLEMAND., 2000).

### IV-2-3 Modèle physique

Un modèle physique est une représentation matérielle simplifiée et, en général, à une échelle réduite d'une situation problématique.



**Figure IV-01: Modèle physique employé pour simuler les conditions environnementales d'un terminal méthanier (source : Conseil national de recherches du Canada)**

### IV-3 ANALYSE DIMENSIONNELLE

D'après (LALLEMAND., 2000), l'analyse dimensionnelle est “ une méthode générale à la fois très simple, très profonde et très puissante, qui repose sur la compréhension de la nature des grandeurs physiques en amont de leurs valeurs numériques. ”. Cette méthode est fondée sur l'étude de la forme générale des équations physiques et permet d'obtenir des informations sur un phénomène physique en tenant seulement compte du fait qu'il doit être décrit par une équation dimensionnellement correcte. En effet, les équations utilisées en sciences physiques représentent des relations entre différentes grandeurs physiques via un formalisme mathématique plus ou moins sophistiqué ; et, si le système d'unités utilisé est cohérent, ces équations, pour posséder une certaine forme d' « universalité » doivent être indépendantes du système d'unités ; elles sont alors dites « homogènes ».

#### IV-3-1 Théorème $\pi$ de Buckingham (1890-1914)

Théorème  $\Pi$  (Pi) de Vaschy-Buckingham est le théorème fondamentaux de l'analyse dimensionnelle. Ce théorème fournit un procédé de construction de paramètres sans dimension, même lorsque la forme de l'équation est inconnue. Cependant, le choix des paramètres sans dimension n'est pas unique et le théorème ne choisissent pas ceux qui ont une signification physique.

Ce théorème annonce que : toute grandeur physique (G), fonction d'un nombre (p) de paramètres indépendants (xi) mesurés par (q) unités fondamentales (masse, longueur, temps, température, pour les problèmes de thermomécanique) et traduisant la variation de (p) causes indépendantes (avec  $p > q$ ), s'exprime à partir d'une relation de la forme :

$$\frac{G}{X_1^{G_1} X_2^{G_2} \dots X_q^{G_q}} = F(\pi_{q+1}, \pi_{q+2}, \dots, \pi_p) \quad (IV-01)$$

Cette relation s'écrit encore sous forme condensée :

$$\frac{G}{\prod_{i=1}^q X_i^{g_i}} = F(\pi_{q+1}, \pi_{q+2}, \dots, \pi_p) \quad (IV-02)$$

Pour réduire un problème de dimension à une autre dimension avec moins de paramètres, en suivant les étapes générales sont les suivantes:

1. Comptez le nombre de variables  $n$  dimensions ;
2. Comptez le nombre d'unités de base (longueur, temps, masse, température, etc.)  $k$  ;
3. Déterminer le nombre de groupes sans dimension. Nombre de  $r = n - k$  ;
4. Faire de chaque numéro  $\Pi_i$  dépend de  $n - k$  des variables fixes et en ce que chaque addition du restant dépendant des variables  $k$  ;
5. Le numéro  $\Pi$  contenant la variable qui doit être déterminée est réglée en fonction des autres nombres sans dimension ;
6. Le modèle doit avoir sa même que le prototype pour assurer numéros similitude dimension.
7. Écrire la combinaison des produits ( $\pi$ ) afin de déterminer une forme de fonction :

$$\pi_k = f(\pi_1, \pi_2, \dots \pi_i) \quad (\text{IV- 03})$$

#### IV-3-2 Exemple d'application de Théorème $\pi$ de Buckingham

L'intensité de la force de traînée est exprimée en fonction de la vitesse, de la forme et de la taille du mobile, du fluide dans lequel il interagit. Le coefficient de traînée usuellement désigné  $C_x$  est un nombre sans dimension qui est caractéristique, principalement, de la forme du mobile.

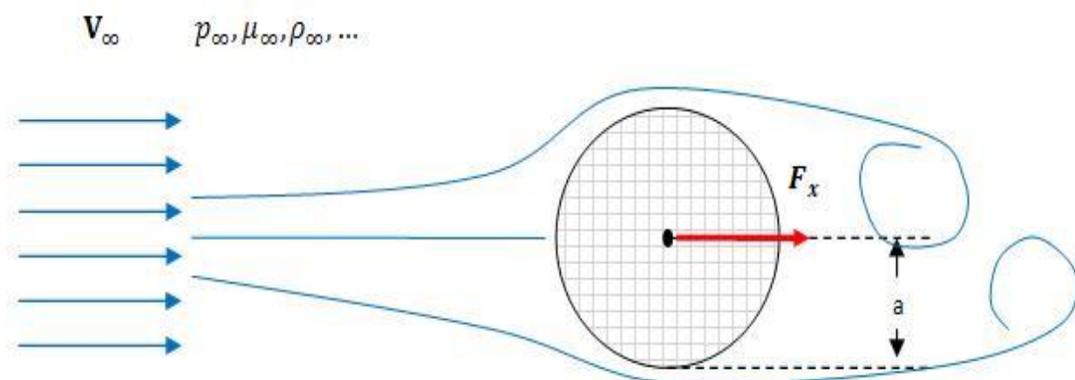


Figure IV-02 : Coefficient de traînée de cylindre 2D dans un écoulement permanent

## IV-3-3 Les grandeurs physiques et leurs unités en système international

Grandeur physique		Unité S.I.	
Nom	Représentation	Nom	Symbole
<b>Les unités géométriques</b>			
distance, longueur	d ou $\ell$	mètre	m
aire (surface)	S	mètre carré	m <sup>2</sup>
volume	V	mètre cube	m <sup>3</sup>
angle plan	a	radian	rad
<b>Les unités mécaniques</b>			
durée, temps	t	seconde	s
vitesse	v	mètre par seconde	m·s <sup>-1</sup> (ou m/s)
fréquence	f	hertz	Hz
masse	m	<b>kilogramme</b>	kg
masse volumique	$\rho$	kilogramme par (mètre) <sup>3</sup>	kg·m <sup>-3</sup> (ou kg/m <sup>3</sup> )
force	F	newton	N
<i>travail, énergie</i>	<i>W</i>	<i>joule</i>	<i>J</i>
<i>puissance</i>	<i>P</i>	<i>watt</i>	<i>W</i>
pression	p	pascal	Pa
<b>Les unités électriques et magnétiques</b>			
intensité électrique	I	ampère	A
charge électrique	q	coulomb	C
tension électrique	U	volt	V
résistance électrique	R	ohm	$\Omega$
<i>champ électrique</i>	<i>E</i>	<i>volt par mètre</i>	<i>V·m<sup>-1</sup> (V/m)</i>
<i>champ magnétique</i>	<i>B</i>	<i>tesla</i>	<i>T</i>
<b>Les unités thermiques</b>			
température	T	kelvin	K
<b>Les unités optiques</b>			
indice d'un milieu	n	sans unité	
vergence (lentille)	C	dioptrie	$\text{D}$
<b>Les unités radioactives</b>			
<i>activité</i>	<i>A</i>	<i>becquerel</i>	<i>Bq</i>
<i>dose absorbée</i>	<i>D</i>	<i>gray</i>	<i>Gy</i>
<b>Les unités chimiques</b>			
quantité de matière	n	mole	mol
concentration molaire	c	mole par (mètre) <sup>3</sup>	mol·m <sup>-3</sup> (mol/m <sup>3</sup> )

Tableau IV-01 : Les grandeurs physiques et leurs unités (FLEURY., 1948)

#### IV-4 LA SIMILITUDE EN MECANIQUE DES FLUIDES

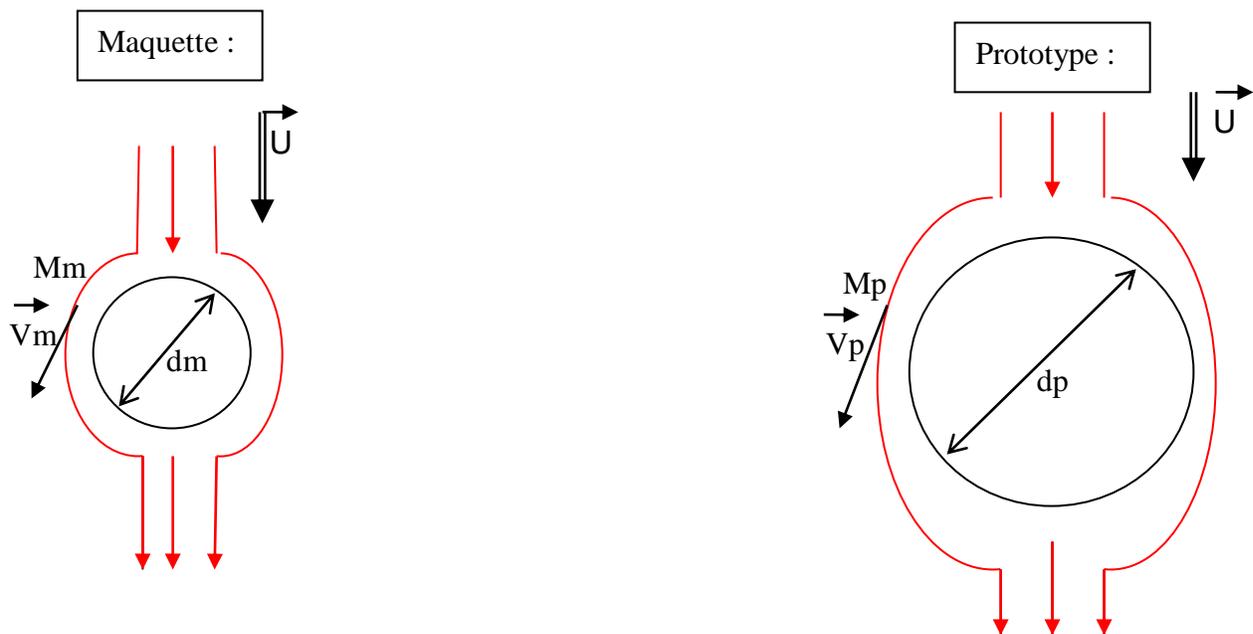
L'exigence est d'avoir une similitude entre le modèle et ses conditions expérimentales et le prototype et ses conditions d'opération. Dans ce contexte la similitude est définie comme « tous les nombres sans dimension ont les mêmes valeurs pour le modèle et le prototype ».

En ingénierie on utilise souvent des modèles réduits présentant la même forme que le modèle en grandeur réelle (similitude géométrique) et on recherche des matériaux et des conditions d'écoulement en laboratoire pour créer des écoulements en similitude (dynamique).

La similitude en mécanique des fluides est classifiée en trois : **(PADET., 1990)**

##### IV-4-1 Similitude géométrique

A tout point de la maquette correspond un et un seul point du prototype (point analogue). La distance entre deux points de la maquette est donc en correspondance avec la distance entre les deux points homologues du prototype. La grandeur sans dimension qui relie ces deux distances est appelée le coefficient de similitude géométrique.



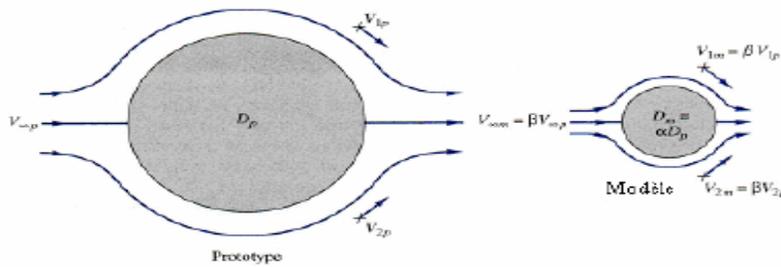
**Figure IV-03: Similitude géométrique**

**IV-4-2 Similitude cinématique**

La similitude cinématique exige que les vitesses et les accélérations soient dans un rapport défini et constant en tous les points correspondants des écoulements dans le modèle et dans le prototype.

Soient :

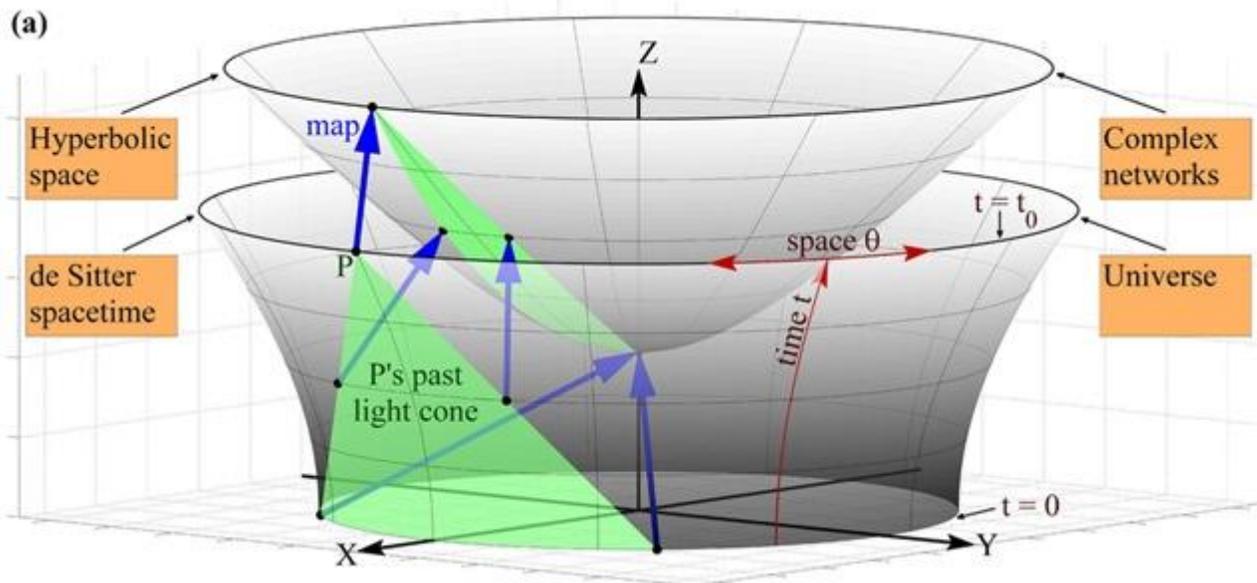
$$\mu_1/\mu_1^* = \mu_2/\mu_2^* \tag{IV- 04}$$



**Figure IV-04: Similitude cinématique**

**IV-4-3 Similitude dynamique**

Une relation existante entre deux écoulements fluides quand ils ont des types identiques des forces parallèles points à tous les correspondants, avec des magnitudes liées par un facteur d'échelle constant. Similitude dynamique permet à l'échelle des résultats des essais sur modèle pour prédire les résultats correspondants pour le prototype grandeur nature.



**Figure IV-05: Similitude dynamique**

#### IV-5 LOIS DE SIMILITUDE EN MECANIQUE DES FLUIDES

Les équations fondamentales de la mécanique des fluides et de la thermique sont le plus souvent difficiles à résoudre. Les solutions analytiques sont même rares et les solutions numériques sont parfois lourdes de mise en œuvre et coûteuses en temps de calcul. On peut alors avoir recours à l'étude expérimentale, soit en vraie grandeur, soit par l'intermédiaire de maquettes. On peut aussi remplacer la résolution des équations de base, qui donne des informations locales, par des modélisations plus globales du problème. Ces modèles font appel à des corrélations semi-empiriques déduites d'expérimentations réalisées dans des conditions particulières, mais dont le résultat doit être extrapolable à d'autres conditions qui seront dites semblables. Que les études expérimentales soient faites dans un but de connaissance d'une situation particulière ou pour établir des corrélations valables de manière plus générale, le nombre d'expériences à réaliser doit toujours être réduit au maximum. Pour cela, il est important de savoir quels paramètres caractérisent le phénomène étudié et comment ils interviennent. L'expérimentateur est aidé dans cette démarche par l'analyse dimensionnelle, qui permet d'accéder plus facilement à la mise en forme de relations semi-empiriques permettant de modéliser le phénomène étudié (PADET., 1990).

Si la pesanteur est en fait significative, le nombre approprié sans dimensions est le nombre bien connu de Froude

$$Fr = \frac{v^2}{gL} \quad (IV- 05)$$

Si la viscosité  $\mu$  joue une partie efficace, ce fait présente le nombre de Reynolds.

$$Re = \frac{\nu L \varphi}{\mu} \quad (IV- 06)$$

Si plus qu'une dimension caractéristique de longueur est impliqué, donc plus de nombres sans dimensions peuvent être formés de leurs rapports.

L'analyse dimensionnelle est généralement considérée comme le moyen de projeter des programmes expérimentaux et des études sur modèles pour traiter les problèmes qui sont trop complexes ou difficiles pour la solution théorique. Cependant, c'est aussi utile en prenant des dispositions rangées et commodes de n'importe quel genre d'équation, y compris ceux dérivées des considérations de théorie pure. (PADET., 1990)

Son utilité peut être étendue en ayant une vue plus large du concept de similitude hydraulique; il ne peut pas être trop fortement souligné que l'utilisation du concept de similitude n'a pas besoin d'être limitée au fonctionnement et à l'interprétation de modèles hydrauliques

La théorie de similitude énonce que pour obtenir la similitude dynamique entre le modèle et le prototype, le nombre de Froude doit être le même dans chaque cas. Il s'ensuit que, si l'indice (r) indique un rapport de quantité du prototype à la quantité du modèle, alors

$$v_r = L_r^{1/2} \quad (IV- 07)$$

C'est-à-dire :

$$Q_r = L_r^{5/2} \quad (IV- 08)$$

Où :

$$q_r = L_r^{3/2} \quad (IV- 09)$$

Où (q) est le débit par unité de largeur du canal. On constatera que les expressions suggestives de ces rapports auront lieu constamment dans les équations d'écoulement des canaux ouverts; même si le nombre de Froude n'a pas lieu explicitement nous trouverons les termes de la forme  $(Q^2/gL^5)$  et  $(q^2/gL^3)$ , qui ont essentiellement la même fonction.

#### IV-5-1 Similitude de REECH-FROUDE (1832)

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

Les forces de viscosité sont négligeables par rapport aux forces d'inertie, de turbulence et de pesanteur, donc ces trois dernières forces sont pratiquement seules à intervenir et la condition de similitude des forces impose que les trois rapports  $(\lambda_{fi}, \lambda_{ft}, \lambda_{fp})$  soient les mêmes :

Compte tenu de ce que  $(\lambda_{fi} = \lambda_{ft})$ , la condition se résume à :  $(\lambda_{fi} = \lambda_{fp})$  ou bien :  $(\lambda_p \lambda^4 \lambda_t^{-2} = \lambda_p \lambda^3 \lambda_g)$ . Il est pratiquement impossible de faire varier g entre le prototype et le modèle, donc  $(\lambda_g = 1)$  et la condition s'écrit :

$$\lambda_p \lambda^4 \lambda_t^{-2} = \lambda_p \lambda^3 \quad (IV- 10)$$

$$\frac{\lambda^2}{\lambda_t^2} = \lambda \quad (IV- 11)$$

$$\lambda_v = \sqrt{\lambda} \quad (\text{IV- 12})$$

Le rapport des vitesses est donc égal à la racine carrée du rapport des longueurs. Cette relation très importante est connue sous le nom de « loi de similitude de *Reech-Froude* ».

#### IV-5-2 Similitude de REYNOLDS (1883)

Le nombre de Reynolds représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. Ce nombre sans dimension apparaît naturellement en dimensionnant les équations de Navier-Stokes.

On le définit de la manière suivante :

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (\text{IV- 13})$$

Avec :

- $V$ , vitesse caractéristique du fluide [m/s]
- $L$ , dimension caractéristique [m]
- $\nu$ , viscosité cinématique du fluide [m<sup>2</sup>/s]

Les forces de pesanteur sont négligeables par rapport aux forces d'inertie de turbulence et de viscosité, donc ces trois derniers forces sont pratiquement seules à intervenir et la condition de similitude des forces impose que les trois rapports ( $\lambda_{fi}$ ,  $\lambda_{ft}$ ,  $\lambda_{fv}$ ) soient les mêmes :

Compte tenu de ce que ( $\lambda_{fi} = \lambda_{fv}$ ), la condition se résume à : ( $\lambda_{fi} = \lambda_{fv}$ )

$$\lambda_p \lambda^4 \lambda_t^{-2} = \lambda_\mu \lambda^2 \lambda_t^{-1} \quad (\text{IV- 14})$$

$$\frac{\lambda_\mu}{\lambda_p} = \lambda^2 \lambda_t^{-1} = \lambda \lambda_v \quad (\text{IV- 15})$$

Mais ( $\lambda_\mu / \lambda_p = \lambda_v$ ) rapport des coefficients de viscosité cinématique

$$\frac{\lambda \lambda_v}{\lambda_v} = 1 \quad (\text{IV- 16})$$

$$\frac{L_2 V_2}{\nu_2} = \frac{L_1 V_1}{\nu_1} = \Re = C^{te} \quad (\text{IV- 17})$$

### 1V-5-3 Etapes de conception des modèles réduits

Avant d'aborder la réalisation d'un modèle réduit, la bonne conception exige de répondre aux questions considérées de base. Ces réponses au problème de modélisation physique se résument en les étapes suivantes (**CHANSON., 1999**) :

**Étape 1 :** Choisir convenablement l'échelle géométrique  $\lambda$  (échelle du modèle) aussi réduite, tenant compte des contraintes de laboratoire. Le seuil de Reynolds interdit l'utilisation d'échelle trop petite.

**Étape 2 :** Pour l'échelle  $\lambda$  choisie et le type de similitude adoptée (Reech-Froude ou Reynolds), vérifier si le débit imposé au prototype correspond parfaitement et sans inconvénient au débit maximum autorisé et mesuré dans le modèle.

**Étape 3 :** Vérifier si le coefficient de résistance de l'écoulement  $f^*$  est le même dans le modèle et le prototype.

**Étape 4 :** Vérifier que les conditions d'écoulement dans le modèle et le prototype soient identiques (si l'écoulement dans le prototype est turbulent, il doit l'être dans le modèle).

#### Remarques :

1- Pour se permettre l'application de la similitude de Reech-Froude, il faut se placer dans les conditions telles que les forces de viscosité soient négligeables sur le modèle et le prototype.

2- Avoir une même rugosité relative dans le modèle et le prototype est parfois impossible à réaliser. En fait l'erreur qui en résulte est négligeable en raison de l'incidence relativement faible du facteur  $\varepsilon/L$  sur la valeur de  $f^*$ . Cette incidence est également faible sur la valeur de la vitesse et le débit.

3- Conformément à la théorie de modélisation physique en hydraulique, l'échelle géométrique  $\lambda$  recommandée (**LCH, 1994**) pour le modèle réduit des ouvrages d'évacuation, doit être plus grande que l'échelle minimale permettant la création d'un régime hydraulique adéquat pour le modèle et le prototype. Cette condition exige la formation d'une zone hydraulique auto-modèle des résistances de frottement hydrauliques pour les différents ouvrages lors du passage des débits caractéristiques de dimensionnement.

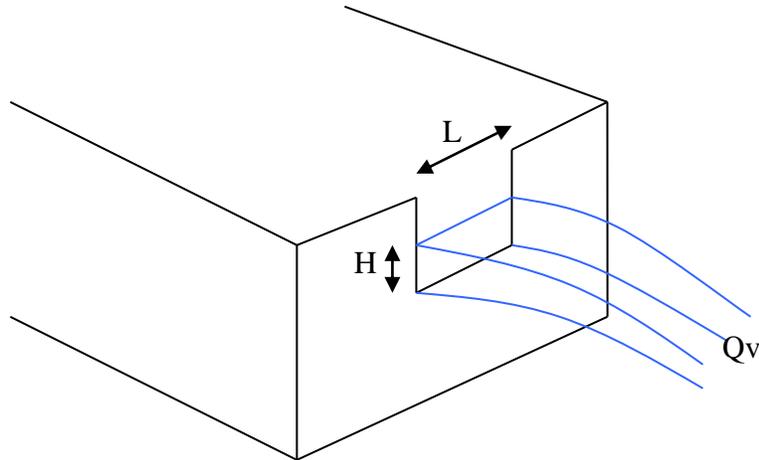
**IV-5-4 Les nombres adimensionnels rencontrés dans le domaine de mécanique des fluides**

Le tableau (IV-02) présente quelques nombres adimensionnels rencontrés dans le domaine de mécanique des fluides :

Paramètre	Définition	Explication	Importance dans mécanique de fluide
Nombre de Reynolds	$Re = \rho V D / \mu$	Force d'inertie / Force visqueuse	Toujours
Nombre de Mach	$Ma = V/a$	Vitesse d'écoulement / vitesse sonique	Écoulement compressible
Nombre de Froude	$Fr = V^2/gL$	Force d'inertie / Force gravitation	Écoulement Surface libre
Nombre de Weber	$We = \rho V^2 L / Y$	Force d'inertie / Tension surfacique	Écoulement Surface libre
Rapport de capacité thermique	$\gamma = C_p / C_v$	Enthalpie / Energie Interne	Transfert thermique
Rugosité adimensionnelle	$\epsilon / L$	Rugosité / longueur caractéristique	Écoulement turbulent / surface rugueuse
Coefficient De pression	$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho V^2}$	Pression statique / pression dynamique	Aérodynamique Hydrodynamique
Coefficient De portance	$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$	Portance / force dynamique	Aérodynamique Hydrodynamique
Coefficient De frottement	$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$	Portance / force dynamique	Aérodynamique Hydrodynamique

**Tableau IV-02 : Quelques nombres adimensionnels rencontrés en mécanique des fluides (PADET., 1990)**

**IV-6 Analyse dimensionnelle appliquée au déversoir rectiligne en mince paroi – avec contraction latérale**



**Figure IV-06: Déversoir rectiligne en mince paroi avec contraction latérale - (CARLIER., 1986)**

$$q_v = \frac{Q_v}{L} = f(H, g, \rho) \quad (\text{IV- 18})$$

$$q_v = u = f(\omega_1, \omega_2, \omega_3), \text{ soit } n=3 \quad (\text{IV- 19})$$

$$\{L_1, L_2, L_3\}_{m=3} = (L, M, T)_{m=3} \quad (\text{IV- 20})$$

	$\omega_1$ <b>H</b>	$\omega_2$ <b>f</b>	$\omega_3$ <b><math>\rho</math></b>	<b>U</b> <b><math>q_v</math></b>
<b>L</b>	( 1 0 0 )	1 0 -2	-3 1 0	( 2 0 -1 )
<b>M</b>				
<b>T</b>				
		(B)		(a)

**Tableau : IV-03 : Liste des paramètres et leurs dimensions (déversoir en mince paroi)**

$$\pi = g (\pi_1, \pi_i, \pi_k) \quad (\text{IV- 21})$$

\* Rang (B) = 3

Théorème de Vaschy-Buchinbham

k = n-rang (B)      k : nombre de  $\pi_i$

k = 3-3 = 0      => aucun ( $\pi_i$ )

\* (B).(x) = 0

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & -3 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -2 & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = (0) \quad \Leftrightarrow \quad (x) = (0) \quad (\text{IV- 22})$$

\* (B).(y) = (-a)

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & -3 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -2 & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \Leftrightarrow \quad (y) = \begin{pmatrix} -3/2 \\ -1/2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{IV- 23})$$

\*  $\pi = u. \omega_1^{y_1} . \omega_2^{y_2} . \omega_3^{y_3}$

$$\pi = q_v . H^{(-3/2)} . g^{(-1/2)} . \rho^0 \quad (\text{IV- 24})$$

$$q_v = Q_v / L = \pi (\pi_1=1) . H^{(3/2)} . g^{(1/2)} \quad (\text{IV- 25})$$

On obtient la formule générale du débit qui détermine les paramètres adimensionnels qui régissent l'écoulement sur le déversoir rectangulaire en mince paroi – avec contraction latérale:

$$\boxed{Q_v = k . L . H^{3/2} . g^{1/2}} \quad (\text{IV-26})$$

## IV-7 ANALYSE DIMENSIONNELLE APPLIQUEE AU DEVERSOIR NON RECTILIGNE CREUSE

### IV-7-1 Configuration géométrique du déversoir non rectiligne creusé

Sur la base des essais préliminaires sur des modèles réduits physiques effectués depuis l'an 2003 par le laboratoire Aménagements Hydrauliques et Environnement (Université de Biskra) en collaboration avec Hydrocoop France, la forme géométrique du déversoir en labyrinthe développé a été définie par : (LEMPERIERE et al., 2003)

- Une disposition rectangulaire des alvéoles ;
- Un radier incliné des alvéoles amont et aval, ce qui favorise l'utilisation des porte-à-faux ;
- Une longueur réduite de la base grâce à l'utilisation des porte-à-faux (la longueur de la crête est égale à trois fois la longueur de la base) ;
- Une largeur réduite des éléments grâce à la forme rectangulaire ;
- Une surface réduite des murs latéraux résultant de l'utilisation d'un radier incliné.
- *La possibilité de creusement verticale des alvéoles ; un nouveau paramètre géométrique qui s'appel profondeur de creusement des alvéoles ; « Rehausse ». Donc un nouveau déversoir qu'il s'appel : « déversoir non rectiligne creusé ».*

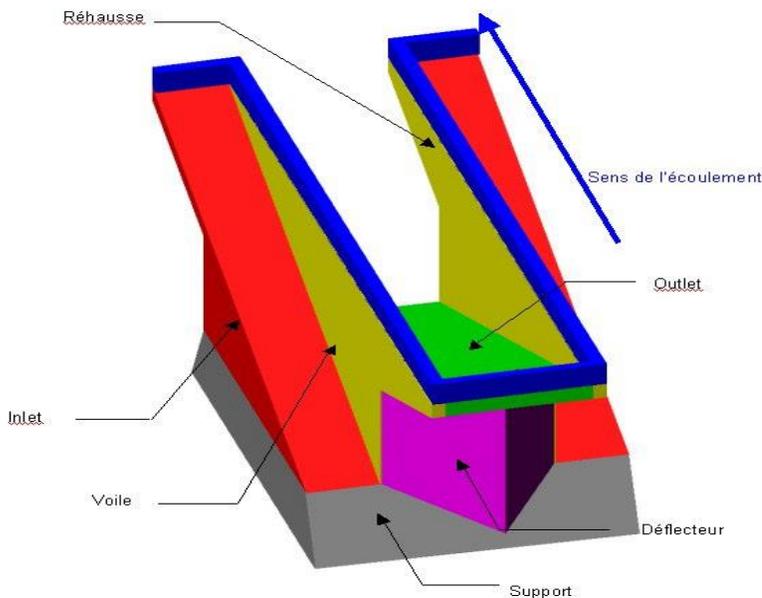


Figure IV-07 : déversoir non rectiligne creusé

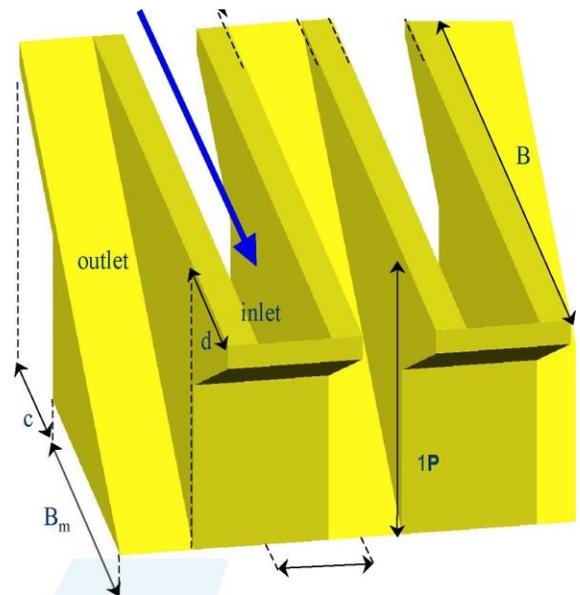


Figure IV-08 : déversoir en labyrinthe développé

La variation de la forme en plan du déversoir est possible, cependant, la forme la plus avantageuse correspond à la forme rectangulaire symétrique (figures IV-08 et IV-09). La configuration d'une telle forme en plan est définie par la hauteur du déversoir (P), la largeur des alvéoles amont et aval (a et b), la longueur des porte-à-faux amont et aval (c et d), la hauteur maximale des parois latérales (H), la longueur de la paroi latérale (B), la largeur d'un élément (W), et la longueur de la crête d'un élément (L), la largeur de la base du déversoir (B') .

P: hauteur maximale du déversoir (m)

B : longueur d'une paroi latérale (m)

B' : largeur de la base du déversoir (m)

a : largeur de l'alvéole amont (m)

b : largeur de l'alvéole aval (m)

c : longueur du porte-à-faux amont (m)

d : longueur du porte-à-faux aval (m)

d' : profondeur de creusement des alvéoles (rehausse) (m)

w : largeur du déversoir ( $w=a+b$ ) (m)

L : longueur du déversoir ( $L=a+b+2B$ ) (m)

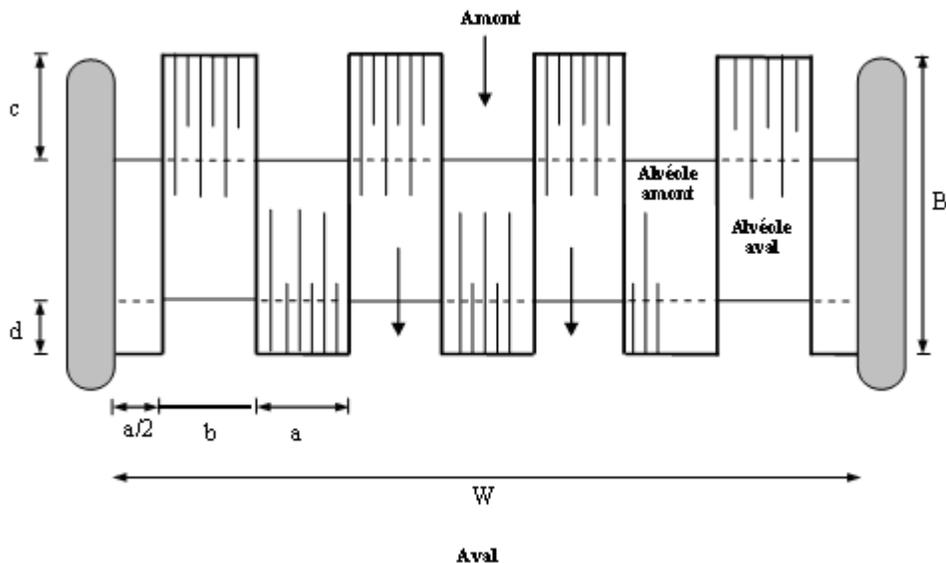


Figure IV- 09: Vue en plan du déversoir non rectiligne creusé

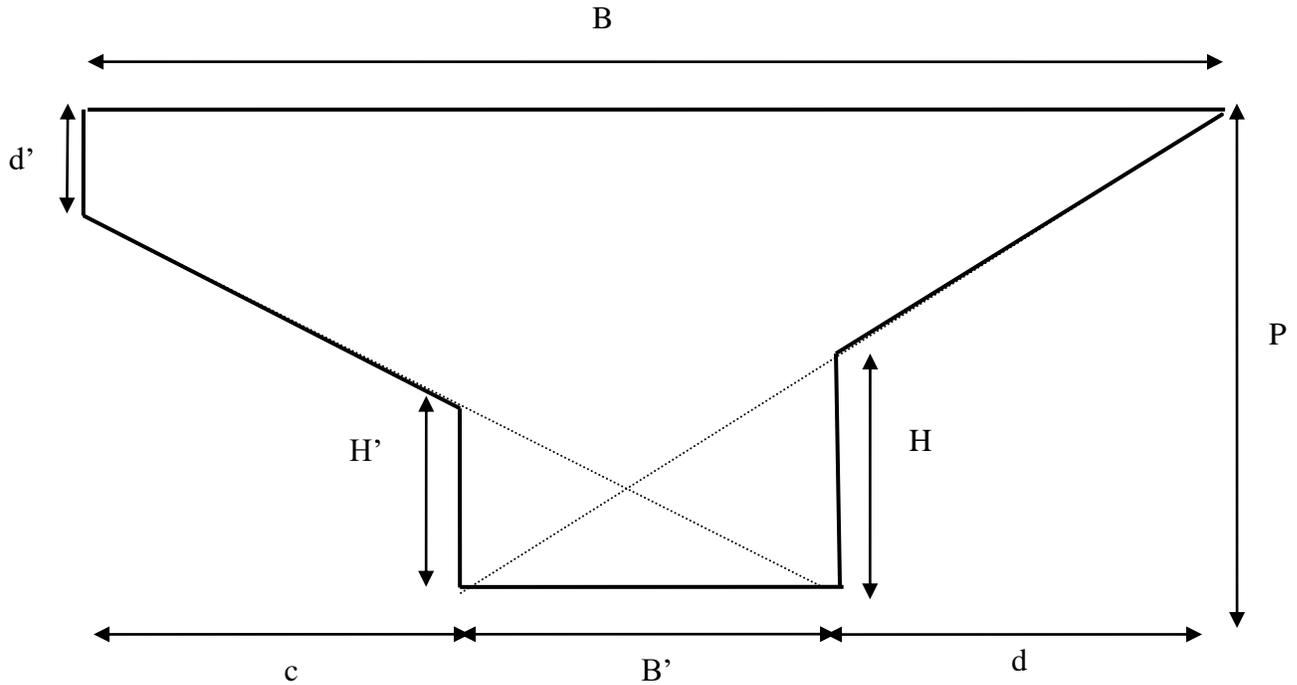


Figure IV- 10: Vue en profil du déversoir non rectiligne creusé

#### IV-7-2 Application du Théorème $\pi$ de Buckingham au déversoir non rectiligne creusé

Comme l'écoulement sur le déversoir non rectiligne creusé est tridimensionnel et ne se prête pas aisément à une description mathématique, la solution la plus directe pour exprimer la fonction du débit implique une combinaison d'analyse dimensionnelle et expérimentale. Pour simplifier cette analyse, la viscosité et les effets de la tension superficielle pourraient être négligés. Avec cette supposition, le seul paramètre important du fluide qui reste est l'accélération de la pesanteur ( $g$ ). Ainsi, le débit qui transite par le déversoir non rectiligne creusé est dépendant des paramètres géométriques et de l'accélération de la pesanteur. Le débit peut être exprimé par une relation de la forme :

$$Q = f(P, D, B, B', a, b, c, d, L, H, t) W \sqrt{2gh}^{*3/2} \quad (\text{IV- 27})$$

Où:

$h^*$ : charge totale sur le seuil du déversoir (mce)

$P$  : hauteur maximale amont du déversoir (m)

$D$  : hauteur maximale aval du déversoir (m)

B : longueur des parois latérales (m)

B' : largeur de la base du déversoir,  $B' = B - (c + d)$  (m)

a : largeur de l'alvéole amont (m)

b : largeur de l'alvéole aval (m)

c : longueur du porte à faux amont (m)

d : longueur du porte à faux aval (m)

W: largeur du déversoir (m)

L : longueur développée du déversoir (m)

H : hauteur maximale des parois ( $H=2P/3$ ) (m)

t : épaisseur des parois (m)

Pour un déversoir non rectiligne creusé, le débit peut être exprimé par une relation de la forme :

$$Q = f(P, D, B, B', a, b, c, d, d', L, H, H', t) W \sqrt{2gh}^{*3/2} \quad (\text{IV- 28})$$

Où:

d' : profondeur de creusement des alvéoles (rehausse) (m)

H' : hauteur maximale des parois,  $H' = [2(P - d')/3]$  (m)

Pour un élément de déversoir non rectiligne creusé:

$$W = a + b \quad (\text{IV- 29})$$

$$L = a + b + 2B = W + 2B \quad (\text{IV- 30})$$

Il est à remarquer que la fonction qui exprime le débit du déversoir non rectiligne creusé est dépendante de quinze paramètres géométriques ce qui rend son analyse difficile, Pour réduire le nombre des paramètres, l'épaisseur des parois a été gardée constante et la hauteur amont du déversoir (P) égale à la hauteur aval (D). Le paramètre géométrique (B) qui exprime la longueur de la paroi latérale peut être éliminé puisque il est inclus dans le paramètre qui exprime la longueur développée (L), ainsi, les paramètres (B') et (c) et (d) seront éliminés, puisque ils sont inclus dans le paramètre qui exprime la longueur des parois latérales (B). Les paramètres géométriques (H) et (H') peuvent être aussi éliminés de l'équation (I- 28) puisque ils sont inclus dans le paramètre qui exprime la hauteur maximale amont du déversoir (P). Par conséquent, le nombre de paramètre sera réduit à huit.

Finalement, l'équation de débit peut être exprimée par la relation suivante :

$$Q = f(P, a, b, d', L)W\sqrt{2gh}^{*3/2} \quad (\text{IV-31})$$

Le coefficient de débit peut être déterminé en fonction du couple des valeurs (Q) et (h\*), les autres paramètres qui forment l'équation (IV-31) sont des constantes pour chaque modèle de déversoir.

$$C_w = f(P, a, b, L, W, d', h^*) \quad (\text{IV-32})$$

La charge totale (h\*) correspond à la hauteur piézométrique ajoutée à la charge cinétique :

$$h^* = h + V^2 / 2g \quad (\text{IV-33})$$

### IV-7-3 Application numérique et mathématique

On peut dire que l'analyse dimensionnelle du coefficient de débit dépend de :

- Le débit Q ;
- La charge totale sur le seuil du déversoir h\* ;
- L'accélération de la pesanteur g;
- Les paramètres géométriques (P, a, b, L, d', W).

Donc on a :

1. Le nombre de paramètres indépendants : n = 9
2. La liste des paramètres et leurs dimensions en utilisant (M, L, t, θ) :

Paramètre	Q	g	h*	L	W	P	a	b	d'
Dimension	L <sup>3</sup> t <sup>-1</sup>	Lt <sup>-2</sup>	L	L	L	L	L	L	L

**Tableau IV-04 : Liste des paramètres et leurs dimensions (déversoir creusé)**

Nous avons le nombre de dimensions de base (L, t), j' = 2

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

4. Cette étape est la même que l'étape 3 ; les paramètres répétés sont g, h\* et j = 2.

Donc, k = n – j = 9 – 2 = 7. Nous allons trouver 7 Π indépendants.

5. Obtenir les Π

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

Pour que la dimension de  $\Pi_1$  soit sans dimension il faut que la puissance de chaque dimension de base soit zéro. Donc, en prenant la somme des puissances de chaque dimension de base, nous pouvons écrire :

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

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

Nous avons donc,

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

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

$$\Pi_1 = Q / \sqrt{g} h^{5/2} \quad \approx \quad C_w = Q/w \sqrt{2g} h^{3/2}$$

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

Nous pouvons répéter la même opération pour le paramètre L

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

Nous aurons :

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

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

Donc :

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

Maintenant, nous faisons pour W :

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

Nous aurons :

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

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

Donc :

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

Ensuite, nous faisons pour P :

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

Nous aurons :

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

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

Donc :

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

=  $h^*/P$  (le rapport de la charge totale à L' hauteur du déversoir)

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

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

Nous aurons :

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

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

Donc :

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

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

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

Nous aurons :

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

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

Donc :

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

Ensuite, nous faisons pour le paramètre de profondeur du rehausse d' :

$$\Pi_7 = g^a h^{*b} d'^1 = (Lt^{-2})^a (L)^b (L)^1$$

Nous aurons :

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

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

Donc :

$$\Pi_7 = d'/h^* \text{ (le rapport de la profondeur du rehausse à la charge totale)}$$

6. On obtient pour la combinaison de ces paramètres :

$$C_w = f(L/h^*, W/h^*, h^*/P, a/h^*, b/h^*, d'/h^*) \quad \text{(IV-34)}$$

On élimine les ratios  $(L/h^*, W/h^*, a/h^*, b/h^*, d'/h^*)$  à cause que chacune de ces ratio ne signifie pas aucune signification physique. A cet effet la relation (IV-34) devient :

$$C_w = f(h^*/P) \quad \text{(IV-35)}$$

Pour que les paramètres répètent  $g$ ,  $h^*$ , nous voyons que le coefficient de débit pour un écoulement sur le déversoir non rectiligne creusé est une fonction du rapport de la charge totale à la hauteur du déversoir.

- On pose  $g$ ,  $L$  comme étant des paramètres répètent, on obtient :

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

$$\Pi_2 = h^*/L$$

$$\Pi_3 = W/L$$

=  $L/W$  (rapport de la longueur développée sur la largeur)

$$\Pi_4 = P/L$$

$$\Pi_5 = a/L$$

$$\Pi_6 = b/L$$

$$\Pi_7 = d' /L$$

On obtient pour la combinaison de ces paramètres :

$$C_w = f(h^*/L, L/W, P/L, a/L, b/L, d' /L) \quad (\text{IV-36})$$

On élimine les ratios ( $h^*/L$ ,  $P/L$ ,  $a/L$ ,  $b/L$ ,  $d' /L$ ) à cause que chacune de ces ratios ne signifie pas aucune signification physique. A cet effet la relation (IV-36) devient :

$$C_w = f(L/W) \quad (\text{IV-37})$$

Pour que les paramètres répètent  $g$ ,  $L$ , nous voyons que le coefficient de débit pour un écoulement sur le déversoir non rectiligne creusé est une fonction du rapport de la longueur développée à la largeur du déversoir.

- On pose  $g$ ,  $W$  comme étant des paramètres répètent, on obtient :

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

$$\Pi_2 = h^*/W$$

$$\Pi_3 = L/W$$

$$\Pi_4 = P/W$$

=  $W/P$  (rapport de la largeur à la hauteur du déversoir)

$$\Pi_5 = a/W$$

$$\Pi_6 = b/W$$

$$\Pi_7 = d' /W$$

On obtient pour la combinaison de ces paramètres :

$$C_w = f(H^*/W, L/W, W/P, a/W, b/W, d'/W) \quad (IV-38)$$

On élimine les ratios ( $H^*/W$ ,  $a/W$ ,  $b/W$ ,  $d'/W$ ) à cause que chacune de ces ratios ne signifie pas aucune signification physique. A cet effet la relation (IV-38) devient :

$$C_w = f(L/W, W/P) \quad (IV-39)$$

Pour que les paramètres répètent  $g$ ,  $W$ , nous voyons que le coefficient de débit pour un écoulement sur le déversoir non rectiligne creusé est une fonction du rapport de la longueur développé à la largeur du déversoir et le rapport de la largeur à la hauteur du déversoir.

- On pose  $g$ ,  $P$  comme étant des paramètres répètent, on obtient :

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

$$\Pi_2 = h^*/P$$

$$\Pi_3 = L/P$$

$$\Pi_4 = W/P$$

$$\Pi_5 = a/P$$

$$\Pi_6 = b/P$$

$$\Pi_7 = d'/P$$

On obtient pour la combinaison de ces paramètres :

$$C_w = f(h^*/P, L/P, W/P, a/P, b/P, d'/P) \quad (IV-40)$$

On élimine les ratios ( $L/P$ ,  $a/P$ ,  $b/P$ ,) à cause que chacune de ces ratios ne signifie pas aucune signification physique. A cet effet la relation (IV-40) devient :

$$C_w = f(h^*/P, W/P, d'/P) \quad (IV-41)$$

Pour que les paramètres répètent  $g$ ,  $P$ , nous voyons que le coefficient de débit pour un écoulement sur le déversoir non rectiligne creusé est une fonction du rapport de la charge totale à la hauteur du déversoir et le rapport de la largeur à la hauteur du déversoir, ainsi que le rapport de la profondeur du rehausse à la charge totale.

- On pose  $g$ ,  $a$  comme étant des paramètres répètent, on obtient :

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

$$\Pi_2 = h^*/a$$

$$\Pi_3 = L/a$$

$$\Pi_4 = W/a$$

$$\Pi_5 = P/a$$

$$\Pi_6 = b/a$$

= a/b (rapport de la largeur d'alvéole amont à la largeur d'alvéole avale)

$$\Pi_7 = d'/a$$

On obtient pour la combinaison de ces paramètres :

$$C_w = f(H^*/a, L/a, W/a, P/a, b/a, d'/a) \quad (IV-42)$$

On élimine les ratios ( $H^*/a$ ,  $L/a$ ,  $W/a$ ,  $P/a$ ,  $d'/a$ ) à cause que chacune de ces ratios ne signifie pas aucune signification physique. A cet effet la relation (IV-42) devient :

$$C_w = f(a/b) \quad (IV-43)$$

Pour que les paramètres répètent  $g$ ,  $a$ , nous voyons que le coefficient de débit pour un écoulement sur le déversoir non rectiligne creusé est une fonction du rapport de la largeur d'alvéole amont à la largeur d'alvéole avale.

- On pose  $g$ ,  $b$  comme étant des paramètres répètent, on obtient :

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

$$\Pi_2 = h^*/b$$

$$\Pi_3 = L/b$$

$$\Pi_4 = W/b$$

$$\Pi_5 = P/b$$

$$\Pi_6 = a/b$$

$$\Pi_7 = d'/b$$

On obtient pour la combinaison de ces paramètres :

$$C_w = f(h^*/a, L/a, W/a, P/a, a/b, d'/b) \quad (IV-44)$$

On élimine les ratios ( $H^*/a$ ,  $L/a$ ,  $W/a$ ,  $P/a$ ,  $d'/b$ ) à cause que chacune de ces ratios ne signifie pas aucune signification physique. A cet effet la relation (IV-44) devient :

$$C_w = f(a/b) \quad (IV-45)$$

- On pose  $g$ ,  $d'$  comme étant des paramètres répètent, on obtient :

$$\Pi_1 = Q / \sqrt{g} d'^{5/2}$$

$$\Pi_2 = h^*/d'$$

$$\Pi_3 = L/d'$$

$$\Pi_4 = W/d'$$

$$\Pi_5 = P / d'$$

$$\Pi_6 = a / d'$$

$$\Pi_7 = b / d'$$

On obtient pour la combinaison de ces paramètres :

$$C_w = f(h^*/d', L/d', W/d', P/d', a/d', b/d') \quad (IV-46)$$

On élimine les ratios ( $h^*/d'$ ,  $L/d'$ ,  $W/d'$ ,  $a/d'$ ,  $b/d'$ ) à cause que chacune de ces ratios ne signifie pas aucune signification physique. A cet effet la relation (IV- 46) devient :

$$C_w = f(P/d') \quad (IV-47)$$

Pour que les paramètres répètent  $g$ ,  $d'$ , nous voyons que le coefficient de débit pour un écoulement sur le déversoir non rectiligne creusé est une fonction du rapport de la hauteur maximal du déversoir à la profondeur du rehausse.

Par la combinaison des relations : (IV-37) (IV-39) (IV-41) (IV-43) (IV-45) (IV-47), on obtient la formule générale du coefficient du débit qui détermine les paramètres adimensionnels qui régissent l'écoulement sur le déversoir non rectiligne creusé.

$$C_w = f(h^*/P, L/W, W/P, a/b, d'/P) \quad (IV-48)$$

## IV-8 CONCLUSION

Le recours à l'analyse dimensionnelle est recommandé et indispensable pour simplifier les problèmes physiques compliqués surtout dans le domaine de l'écoulement à surface libre qui est une science basée sur les essais empiriques, ainsi il est régi par différents paramètres physiques.

L'analyse dimensionnelle appliquée sur un déversoir rectangulaire en mince paroi, a montré que le coefficient de débit est en fonction du :

- largeur d'écoulement du déversoir (L)
- la charge totale sur le déversoir (H)

L'analyse dimensionnelle appliquée sur un déversoir non rectiligne creusé a montré que : le coefficient de débit pour un écoulement sur le déversoir non rectiligne creusé est :

$$C_w = f(h^*/P, L/W, W/P, a/b, d'/P) \quad (IV-49)$$

Il est en fonction de :

- rapport de la charge totale à la hauteur ( $h^*/P$ ) ;
- rapport de la longueur développée à la largeur ( $L/W$ ) ;
- rapport de la largeur à la hauteur ( $W/P$ );
- rapport de la largeur d'alvéole amont à la largeur d'alvéole avale ( $a/b$ );
- rapport de la profondeur du rehausse à la hauteur ( $d'/P$ ).

# **Chapitre V :**

Etude Comparative et

Expérimentale Sur

Modèles Réduits

## CHAPITRE V

### ETUDE COMPARATIVE ET EXPERIMENTALE SUR MODELES REDUITS

#### V-1 INTRODUCTION

Parmi les principaux ouvrages annexes des barrages, on distingue ; le déversoir (évacuateur de crues), l'évacuateur de crues joue un rôle primordial dans la sécurité des barrages, il permet le passage des crues exceptionnelles sans incident et sans que le barrage soit submergé (**LAVALLEE and al., 2000**).

La classification générale des déversoirs montre deux types de déversoirs ; les déversoirs rectilignes et les déversoirs non rectilignes (**BARCOUDA et al., 2006**).

Dizaines des travaux de recherche sont effectués sur les déversoirs rectilignes notamment les déversoirs en mince paroi. Par contre les déversoirs non rectilignes restent en stade de développement expérimental et numérique tel que les déversoirs non rectilignes creusés et les déversoirs en labyrinthe développés.

#### V-2 OBJECTIF DE L'ETUDE

Les déversoirs non rectilignes creusés sont à l'origine des déversoirs en labyrinthe développés, mais ils sont caractérisés par un creusement vertical de ses alvéoles. Dans ce sens, trois modèles de conception du déversoir non rectilignes creusés ont été sélectionnés. Le premier se caractérise par un creusement symétrique de ses alvéoles, le second modèle se caractérise par un creusement unique en aval de ses alvéoles. Tandis que la troisième configuration se caractérise par un creusement unique d'alvéoles amont (**MACHIELS and al., 2012**).

Les déversoirs en labyrinthe développés peuvent prendre plusieurs formes en plan tel que la forme rectangulaire, la forme triangulaire et la forme trapézoïdale.

Des études comparatives expérimentales sur modèles réduits entre les déversoirs rectilignes en mince paroi, les déversoirs non rectilignes creusés et les déversoirs en labyrinthe développés sont indispensables pour objectif global de vérifier les capacités d'évacuation des déversoirs rectilignes et les déversoirs non rectilignes.

À cet effet, nous expliquons dans ce travail, les résultats expérimentaux obtenus sur :

- la comparaison entre les déversoirs non rectilignes creusés et les déversoirs en mince paroi de même largeur;
- la comparaison entre les déversoirs non rectilignes en labyrinthe développés et les déversoirs en mince paroi de même largeur;
- étude expérimentale sur modèles réduits des déversoirs creusés.

À cet égard, le présent travail est scindé en trois parties :

- La première partie s'est intéressée à la comparaison expérimentale entre les déversoirs rectilignes en mince paroi et les déversoirs non rectilignes creusés afin de vérifier l'écart de rendement hydraulique entre eux.
- La deuxième partie s'est intéressée à la comparaison expérimentale entre les déversoirs rectilignes en mince paroi et les déversoirs en labyrinthe développé (de différentes formes en plan) afin de vérifier l'écart de rendement hydraulique entre eux.
- Tandis que la troisième partie s'est intéressée à l'étude expérimentale des déversoirs non rectilignes creusés afin de mieux comprendre l'effet de ses paramètres adimensionnels sur ses performances, sur ses rendements du point de vue hydraulique.

Dans ce sens une série des modèles (14 modèles) des déversoirs en mince paroi, déversoirs en labyrinthe développés et des déversoirs non rectilignes creusés (Tableau V-01) ont fait l'objet d'essais expérimentaux. Ces essais ont concerné :

### **Partie I : Etude comparative entre les déversoirs creusés et les déversoirs en mince paroi**

1. Capacité d'évacuation du déversoir creusé symétriquement ( $d'/P=0.13$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur
2. Capacité d'évacuation du déversoir creusé en aval ( $d'/P=0.13$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur
3. Capacité d'évacuation du déversoir creusé en amont ( $d'/P=0.13$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur
4. Capacité d'évacuation du déversoir creusé symétriquement ( $d'/P=0.067$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur
5. Capacité d'évacuation du déversoir creusé symétriquement ( $d'/P=0.2$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur
6. Capacité d'évacuation du déversoir creusé symétriquement ( $d'/P=0.27$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur
7. Capacité d'évacuation du déversoir creusé symétriquement ( $d'/P=0.033$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur
8. Capacité d'évacuation du déversoir creusé symétriquement ( $d'/P=0.4$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur
9. Capacité d'évacuation du déversoir en labyrinthe développé ( $d'/P=0$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur

## Partie II : Etude comparative entre les déversoirs en labyrinthe développé (différentes formes en plan) et les déversoirs en mince paroi

1. Capacité d'évacuation du déversoir en labyrinthe développé rectangulaire par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur
2. Capacité d'évacuation du déversoir en labyrinthe développé triangulaire par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur
3. Capacité d'évacuation du déversoir en labyrinthe développé trapézoïdale par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur

## Partie III : Etude expérimentale sur modèles réduits des déversoirs creusés

4. Impact de l'endroit d'emplacement du déversoir non rectiligne creusé
5. Effet des corps flottants sur la performance du déversoir non rectiligne creusé
6. Effet de la forme d'entrée sur le déversoir non rectiligne creusé
7. Comparaison expérimentale entre les déversoirs non rectilignes creusés

### Rappelons que :

Le débit qui transite par le déversoir rectiligne à paroi mince est déterminé par la relation de (POLENI., 1736):

$$Q_{cr} = \mu L \sqrt{2gh}^{*3/2} \quad (V-01)$$

Où :

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

$\mu$  : Coefficient de débit d'un déversoir standard de type Creager ( $\mu=0.49$ )

$L=W$  : Largeur du déversoir (m)

$h^*$  : Charge totale sur le déversoir (m)

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

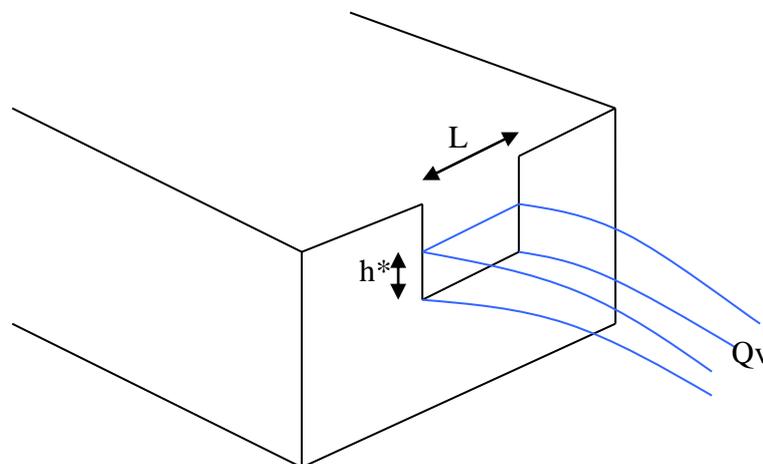


Figure V-01: Déversoir rectiligne en mince paroi avec contraction latérale (CARLIER., 1986)

**Rappelons que :**

Le déversoir non rectiligne creusé se caractérise par les paramètres géométriques suivants :

a : largeur de l'alvéole amont (m)

b : largeur de l'alvéole aval (m)

B: longueur de la paroi latérale (m)

B' : largeur de la base du déversoir (m)

c: longueur du porte-à-faux amont (m)

d : longueur du porte-à-faux aval (m)

d'<sub>a</sub> : profondeur de creusement des alvéoles amont (m)

d'<sub>v</sub> : profondeur de creusement des alvéoles aval (m)

H' : ( $H=2P/3$ ) : Hauteur maximale des parois latérales (m)

L : ( $L=a+b+2B$ ) longueur du déversoir (m)

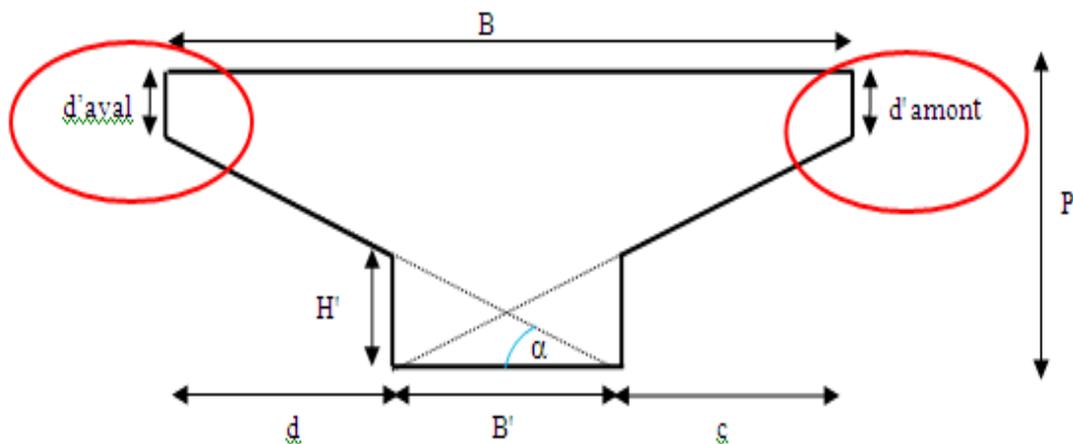
P: hauteur maximale du déversoir (m)

W : ( $w=a+b$ ) largeur du déversoir (m)

$\alpha$  : Angle du mur (degré)

t : épaisseur des parois (m)

n : le nombre de cycle



**Figure V-02: Vue en profil d'un déversoir non rectiligne creusé**

Modèle	Caractéristiques Géométriques des modèles expérimentés (cm)																			
	L	Wt	Wi	P=D	n	a	b	c	d	B	H'	H	L/Wt	Wi/P	a/b	B/P	d'a	d'v	d'/P	Spécifications
<b>D01</b>	102	102	/	15	/	/	/	/	/	3	/	/	1	/	/	0.2	/	/	/	Déversoir rectiligne en mince paroi
<b>D02</b>	600	102	17,5	15	6	9,5	7,5	10,25	10,25	41	9.33	9,33	5,88	1,129	1,187	2.73	1	1	0.067	rehausses symétriques
<b>D03</b>	597	102	17,5	15	6	9,5	7,5	10,25	10,25	41	9	9	5,85	1,129	1,187	2.73	2	2	0.13	rehausses symétriques
<b>D04</b>	597	103	17,16	15	6	9	7.5	10.25	10.25	41	8.66	10	5,79	1,14	1,187	2.73	2	0	0.13	rehausse uniquement en amont
<b>D05</b>	597	103	17,16	15	6	9	7.5	10.25	10.25	41	8.66	10	5,79	1,14	1,187	2.73	0	2	0.13	rehausse uniquement en aval
<b>D06</b>	593	103	17,16	15	6	9	7.5	10.25	10.25	41	8	8	5,76	1,14	1,187	2,73	3	3	0.2	rehausses symétriques
<b>D07</b>	597	103	17,16	15	6	9	7.5	10.25	10.25	41	7.33	7,33	5,79	1,14	1,187	2,73	4	4	0.27	rehausses symétriques
<b>D08</b>	601	100	16.66	15	6	9	7.5	10.25	10.25	41	6.67	6,67	6.01	1,11	1,187	2.73	5	5	0.33	rehausses symétriques
<b>D09</b>	597	103	17,16	15	6	9	7.5	10.25	10.25	41	6	6	5,79	1,14	1,187	2.73	6	6	0.4	rehausses symétriques
<b>D10</b>	597	102	17,5	15	6	9	7.5	10.25	10.25	41	9	9	5,85	1,129	1,187	2.73	2	2	0.13	Forme d'entrée en arc
<b>D11</b>	597	102	17,5	15	6	9,5	7,5	10,25	10,25	41	10	10	5,85	1,129	1,187	2.73	0	0	0	Déversoir en labyrinthe développé

<b>D12</b>	597	102	17,5	15	6	9,5	7,5	10,25	10,25	44	10	10	5,85	1,129	1,187	2.93	0	0	0	Déversoir en labyrinthe développé avec paroi latérale B long
<b>D13</b>	574	104	17,38	15	6	8.66	8.66	14	14	50	10	10	5,2	1,16	1	3.33	0	0	0	Déversoir en labyrinthe développé Triangulaire
<b>D14</b>	607.4	103	17,16	15	6	10	3.5	10	10	42.37	10	10	5,89	1,14	2,85	2.82	0	0	0	Déversoir en labyrinthe développé Trapézoïdale

**Tableau V-01: Caractéristiques géométriques des modèles expérimentés**

### V-3 APERÇU SUR LA STATION D'EXPERIMENTATION DES MODELES REDUITS

Cette station a été dimensionnée de manière à permettre la réalisation des essais sur des modèles réduits des évacuateurs de crues et autres ouvrages hydrauliques à une échelle suffisamment acceptable (NOUI et al., 2007).

Les essais qui peuvent faire l'objet d'expérimentation sur modèles réduits sont :

- l'étude de la protection des agglomérations contre les crues ;
- l'étude des techniques d'accroissement de la capacité des barrages envasés ;
- l'étude des évacuateurs de crues des barrages ;
- l'étude de l'amortissement des crues par la retenue d'un barrage ;
- l'étude de l'amélioration de la capacité d'évacuation des déversoirs ;
- l'étude des différents types d'écoulement sur les déversoirs rectilignes et non rectilignes.



**Figure V-03: La station d'expérimentation des modèles réduits**

Ce modèle de simulation est constitué d'une bêche de puisage, d'un canal d'amenée qui permet de simuler une partie du cours d'eau à l'amont, d'un bassin de dimensions limitées qui joue le rôle d'une retenue de barrage, et d'un canal de réception des eaux qui simule le canal de restitution à l'aval du modèle du barrage.

La station d'expérimentation contient une station de pompage équipée de deux pompes qui débitent 160 l/s, raccordées par l'intermédiaire de deux conduites de diamètre 200 mm à un

bassin de tranquillisation de l'écoulement, le réglage de débit se fait par le biais de deux vannes.

Le bassin de tranquillisation est raccordé à son tour à un canal d'amenée de longueur 5m, de hauteur 1.2m et de largeur 1m. L'une des parois de ce canal est conçue en verre afin de permettre la visualisation de l'écoulement.

L'eau qui transite par le canal d'amenée passe dans un bassin de simulation de retenue de longueur 5m, de largeur 5m et de hauteur 1.5m, des vitres en verre sont insérées dans l'une des parois latérale du bassin permettant ainsi la visualisation de l'écoulement.

Ce bassin de simulation de retenue est équipé par un réseau de prise de pression permettant de déterminer la profondeur d'eau au différent endroit du bassin de simulation.

Les prises de pression sont raccordées à un tableau manométrique qui permet la lecture directe de la profondeur d'eau en chaque point du bassin (NOUI et al., 2007).



**Figure V-04 : Vue de l'aval de la station d'expérimentation des modèles réduits**

Le bassin de simulation dispose d'une ouverture de largeur 2m qui joue le rôle d'exutoire. Cette ouverture permet l'emplacement des modèles réduits à expérimenter sous différentes dispositions selon l'essai désiré.

Le débit qui transite par ouverture d'emplacement des modèles réduits se déverse dans un canal de restitution de largeur 2m, qui joue le rôle de coursier selon l'objectif des expérimentations. Le canal de restitution est équipé d'un réseau de prise de pression et d'une vanne de réglage du niveau d'eau dans le canal de restitution (NOUI et al., 2007).



Figure V-05 : Vue en plan de la station d'expérimentation des modèles réduits (NOUI et al., 2007).

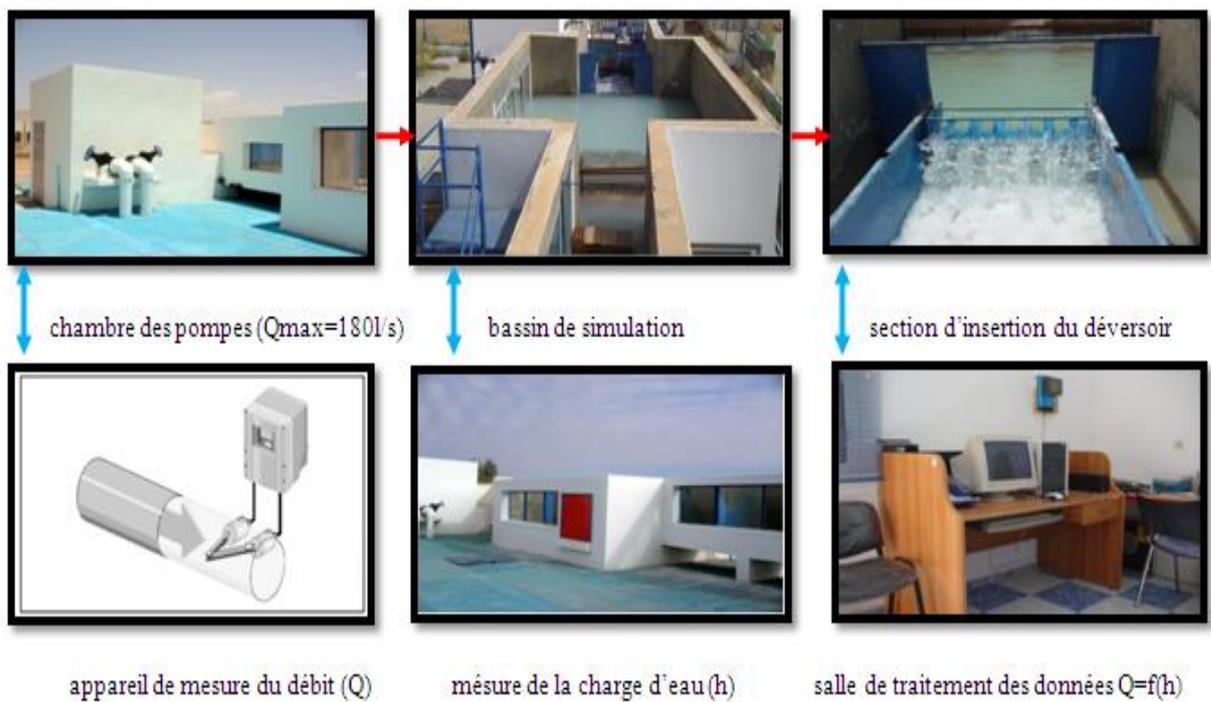


Figure V-06 : Modèle d'expérimentation (Vue global)

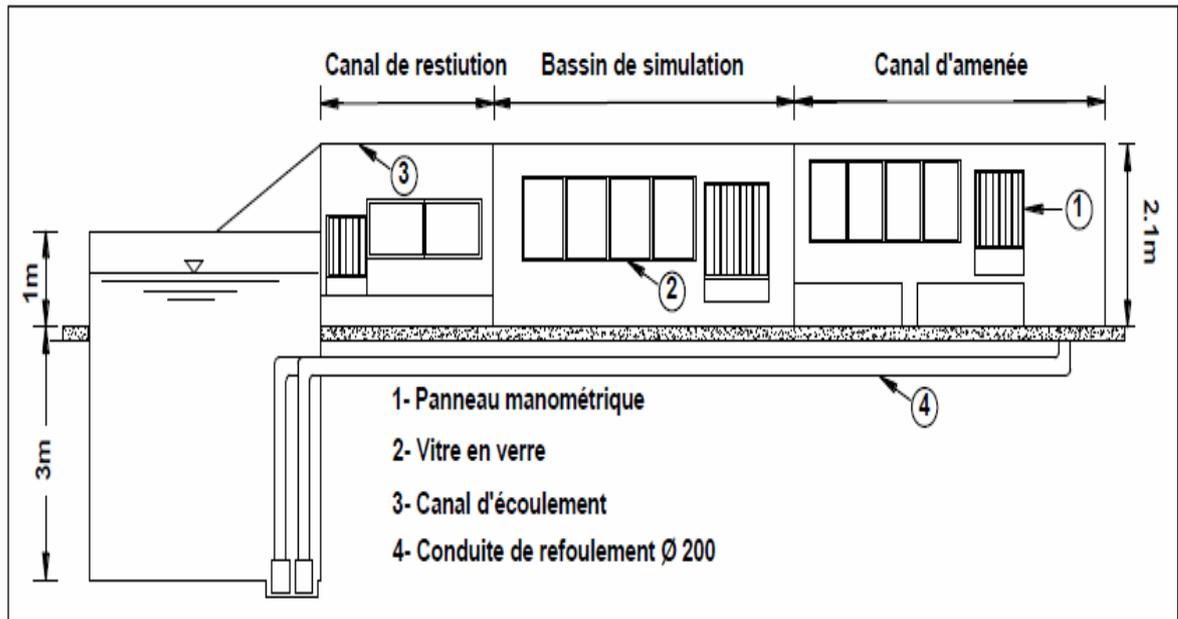


Figure V-07 : Modèle d'expérimentation (Vue en profil) (BELAABED et al., 2011)



Figure V-08 : Vue de profil en 3D du dispositif expérimental (BORDJI et al., 2013)

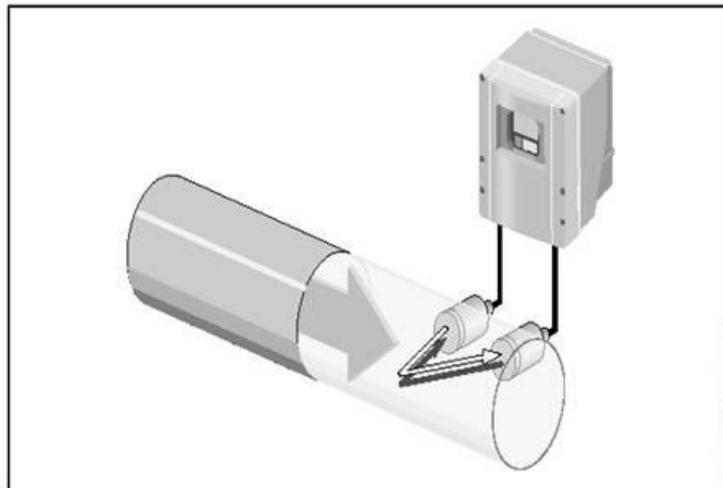
## V-4 APPAREILLAGE DE MESURE

### V-4-1 Mesure des débits

Le débit qui transite par le canal de restitution se déverse dans une bêche à eau de capacité 48m<sup>3</sup>, qui sert comme bassin de puisage pour les pompes. Le système fonctionne en circuit fermé.

Les débits sont mesurés par deux moyens différents, un déversoir à échancrure triangulaire et un débitmètre à ultrason.

Le débitmètre (Prosonic Flow) fonctionne selon le principe de la différence de temps de parcours d'un signal acoustique (ultrason) envoyé dans les deux sens d'un capteur à l'autre. Etant donné que la vitesse de propagation de l'onde sonore est inférieure si le signal est émis contre le sens d'écoulement, on est en présence d'une différence de temps de parcours. Cette différence est directement proportionnelle à la vitesse d'écoulement (NOUI et al., 2007).



**Figure V-09 : Principe de mesure du débit par le débitmètre à ultrason**

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

$$v \sim .t$$

$$Q = v \cdot A \quad (V-02)$$

$v$  = vitesse d'écoulement (m<sup>2</sup>/s)

$t$  = différence de temps de parcours (s)

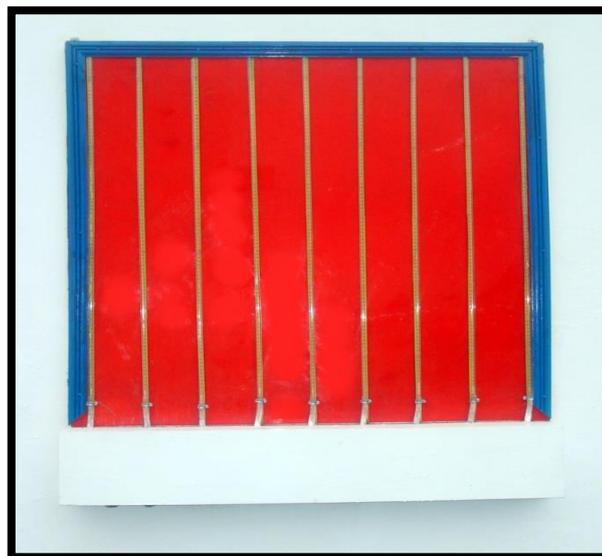
$A$  = section de conduite (m<sup>2</sup>)



**Figure V-10 : Débitmètre ultrason (Prosonic Flow)**

#### **V-4-2 Mesure de la profondeur d'eau**

Les profondeurs d'eau qui expriment les charges piézométriques aux différents endroits du système sont mesurées par l'intermédiaire d'un réseau de prises de pression inséré au fond du des canaux et liés à des tableaux manométriques équipés de tubes transparents indiquant les profondeurs d'eau dans les différents endroits du système expérimental (NOUI et al., 2007).



**Figure V-11 : Tableau manométrique**

### V-5 Méthode expérimentale

Le modèle du déversoir testé est installé à la sortie du bassin de simulation tout en respectant le même niveau le long de la crête du déversoir. Une vérification de la bonne installation du modèle, du débitmètre et des tableaux manométriques est nécessaire.

Une fois que tous le système d'expérimentation est vérifié, on fait amorcer la pompe pour remplir le bassin de simulation de retenue jusqu'au déversement le long de la crête du déversoir à expérimenter. Après désamorçage de la pompe, et l'arrêt de l'écoulement sur la crête du déversoir on opère à la détermination du niveau du seuil.

On fait fonctionner la première pompe à un débit d'environ 30 l/s par manipulation de la première vanne de réglage de débit, après que l'écoulement est complètement stabilisé, on procède aux mesures de la profondeur d'eau à l'amont du déversoir testé, par le biais des lectures sur le tableau manométrique (indicateurs de niveau), le débit étant enregistré directement sur PC Par l'intermédiaire du logiciel COMMUWIN II.

Cette opération se répète chaque fois qu'on fait varier le débit jusqu'au débit maximum de l'ordre de 170 l/s. On obtient ainsi, une série de couple des valeurs (Q et h). Pour le même déversoir testé, un échantillon de valeurs des profondeurs mesurées à l'amont du déversoir ainsi que les valeurs des débits qui leurs correspondent.

Pour chaque modèle testé, deux séries d'essai sont réalisées pour confirmer les résultats obtenus (NOUI et al., 2007).

### V-6 METHODE D'INTERPRETATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les couples des valeurs (Q et h) obtenus pour chaque modèle testé sont traités pour déterminer les différents paramètres de l'écoulement tels que, la charge totale sur le déversoir et le coefficient de débit et la performance du déversoir.

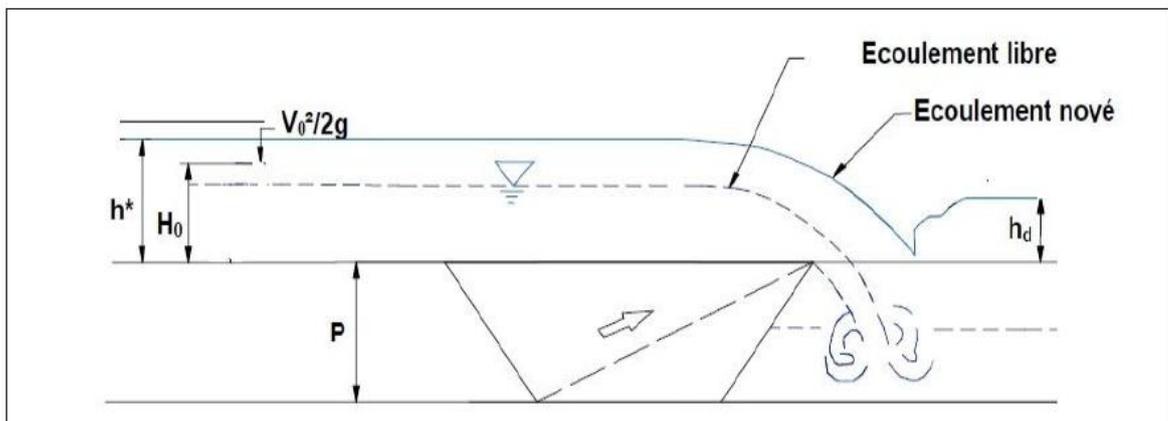


Figure V-12 : Les paramètres du déversoir à écoulement libre et noyé (BELAABED et al., 2011)

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

$$H^* = h + h_c \quad (\text{V-03})$$

Où :

$H^*$  : Charge totale sur le seuil du déversoir (mce)

$h$  : Charge piézométrique mesurée (mce)

$h_c$  : Charge cinétique (mce)

$$h_c = \frac{Q^2}{2gA^2} = \frac{Q^2}{2g(l(P+h))^2} \quad (\text{V-04})$$

Où :

$Q$  : Débit mesuré ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$A$  : Section de l'écoulement dans le bassin de simulation ( $\text{m}^2$ )

$l$  : Largeur du bassin de simulation (m)

$P$  : Hauteur du déversoir (m)

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

Le coefficient de débit peut être déterminé à partir de la relation de **(POLENI., 1736)** :

$$C_w = \frac{Q}{W\sqrt{2gh}^{*3/2}} \quad (\text{V-05})$$

Où :

$C_w$  : Coefficient de débit du déversoir testé

$W$  : Largeur totale du déversoir (m)

$H^*$  : Charge totale sur le seuil du déversoir (mce)

La performance représente le rendement du déversoir non rectiligne creusé par rapport au déversoir rectiligne à mince paroi. Elle est exprimée par le rapport entre le débit qui transite par le déversoir non rectiligne creusé et celui d'un déversoir rectiligne à mince paroi de même largeur et sous la même charge.

$$q = \frac{Q_{\text{Déversoir Nr}}}{Q_{cr}} \quad (\text{V-06})$$

Où :

$q$  : Performance du déversoir expérimenté (déversoir non rectiligne creusé)

$Q_{\text{Déversoir Nr}}$  : Débit mesuré (déversoir non rectiligne creusé) ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

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

Le débit qui transite par le déversoir rectiligne à paroi mince est déterminé par la relation de (POLENI., 1736) :

$$Q_{cr} = \mu L \sqrt{2gh}^{*3/2} \quad (\text{V-07})$$

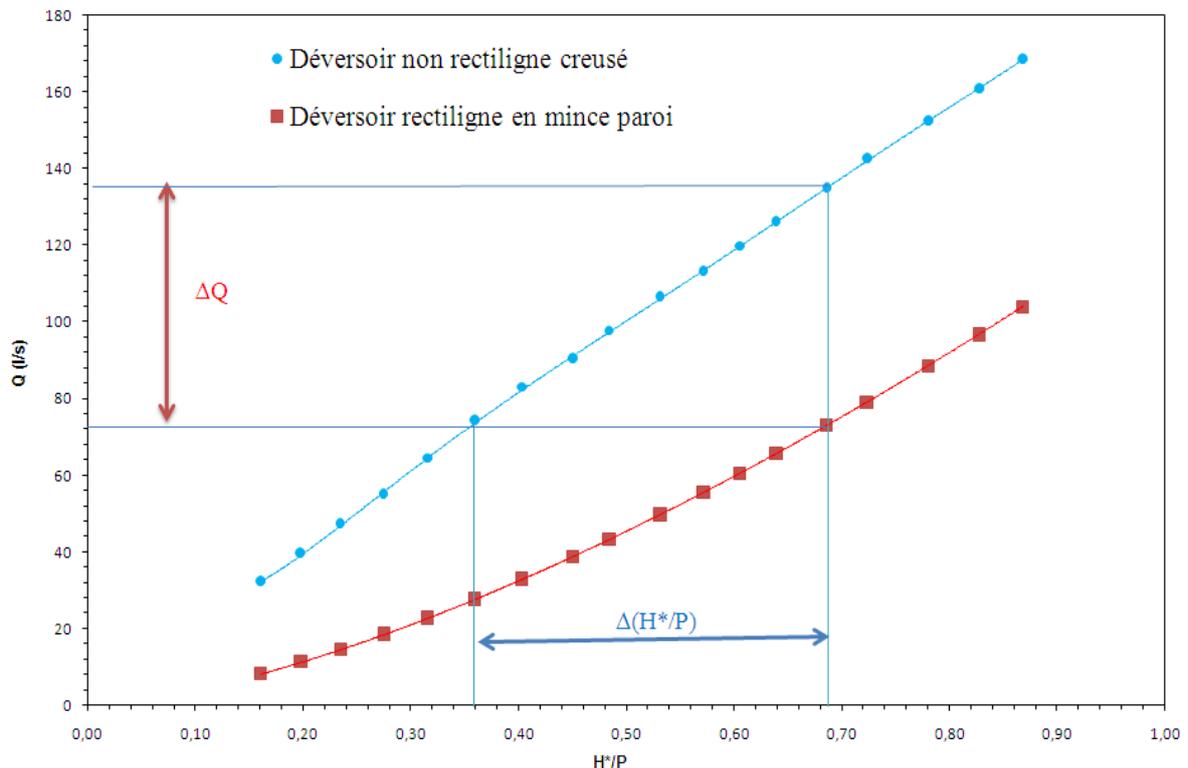
Où :

$\mu$  : Coefficient de débit d'un déversoir standard de type Creager ( $\mu=0.49$ )

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

$H^*$  : Charge totale sur le déversoir (mce)

$H^*/P$  : Charge relative



**Figure V-13 : Méthode de comparaison graphique entre les courbes des débits du déversoir creusé et les courbes des débits du déversoir en mince paroi**

## PARTIE I

### V-7 ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES DEVERSOIRS CREUSES ET LES DEVERSOIRS EN MINCE PAROI

#### V-7-1 Capacité d'évacuation du déversoir creusé symétriquement ( $d'/P=0.13$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur

Afin de comparer la capacité d'évacuation du déversoir non rectiligne creusé symétriquement (modèle D03) ( $d'amont=2cm$ ,  $d'aval=2cm$ ) avec la capacité d'évacuation d'un déversoir en mince paroi de même largeur (modèle D01), des essais ont été réalisés sur le dispositif expérimental.



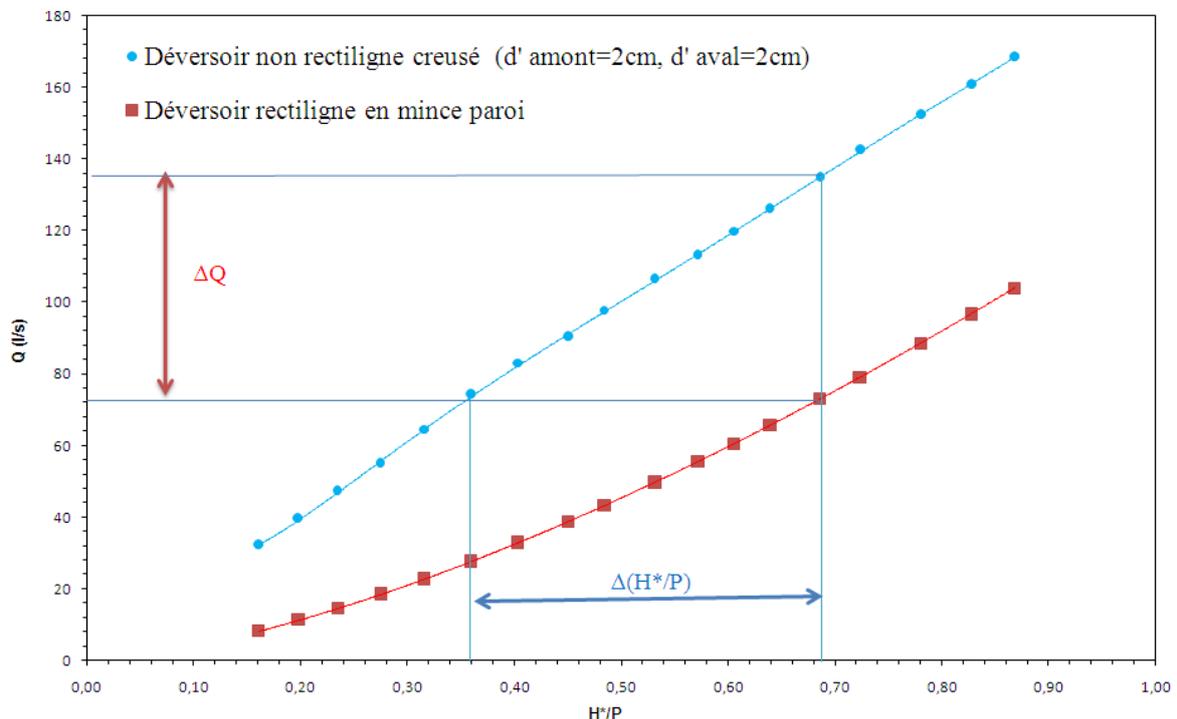
Figure V-14 : Déversoir en mince paroi (modèle D01)



Figure V-15 : Déversoir avec creusement symétrique (modèle D03)

La représentation graphique des courbes de débit en fonction de la charge relative  $Q = f(H^*/P)$  (Figure V-16) montre que :

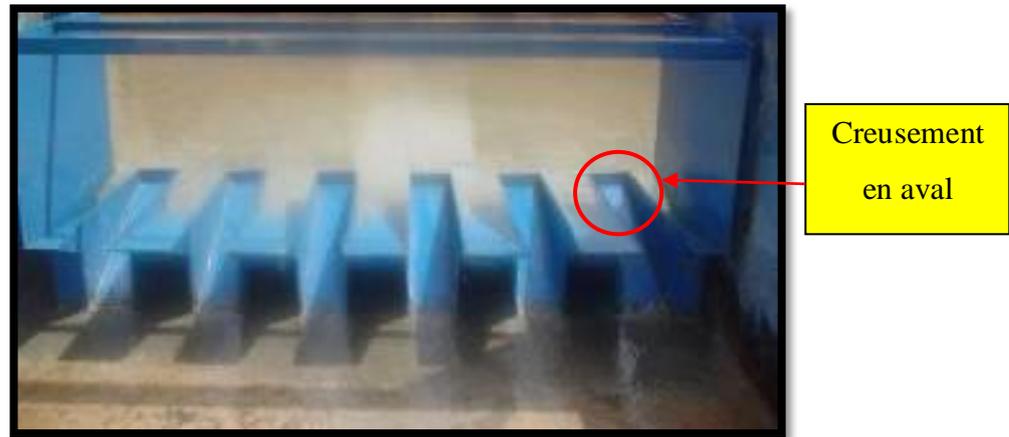
- Pour les faibles charges relatives ( $H^*/P < 0.3$ ), l'écart d'évacuation du déversoir non rectiligne avec creusement symétrique (modèle D03) ( $d'_{\text{amont}} = d'_{\text{aval}} = 2\text{cm}$ ) par rapport un déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur (modèle D01) est de l'ordre de 32%.
- Pour les moyennes et fortes charges relatives ( $H^*/P > 0.5$ ), l'accroissement de la capacité d'évacuation varie de 48% à 59%.



**Figure V-16: Courbes des débits du déversoir non rectiligne avec creusement symétrique ( $d'/P=0.13$ ) comparée à celles du déversoir rectiligne en mince paroi**

### V-7-2 Capacité d'évacuation du déversoir creusé en aval ( $d'/P=0.13$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur

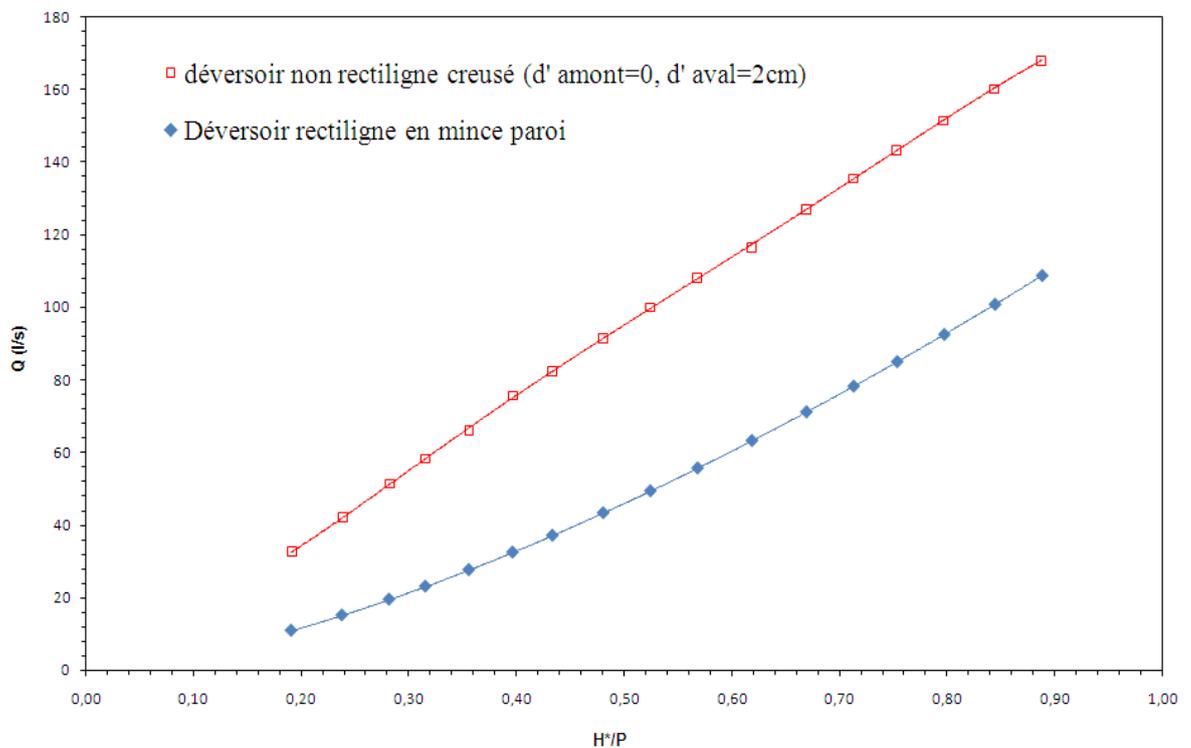
La comparaison de la capacité d'évacuation du déversoir non rectiligne avec creusement symétrique (modèle D03) ( $d'_{\text{amont}} = 2\text{cm}$ ,  $d'_{\text{aval}} = 2\text{cm}$ ) avec la capacité d'évacuation du déversoir rectiligne en mince paroi (modèle D01) de même largeur a montré un écart très remarquable entre les deux déversoirs dans toutes les gammes de la charge relatives. À cet effet, il serait intéressant de vérifier la capacité d'évacuation du déversoir non rectiligne creusé en aval (modèle D05) ( $d'_{\text{amont}} = 0\text{cm}$ ,  $d'_{\text{aval}} = 2\text{cm}$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur (modèle D01).



**Figure V-17 : Déversoir creusé uniquement en aval (modèle D05)**

La (figure V-18) qui représente une comparaison entre la capacité d'évacuation du déversoir non rectiligne creusé uniquement en aval (modèle D05) ( $d'_{\text{amont}}=0$ ,  $d'_{\text{aval}}=2\text{cm}$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur (modèle D01), indique que l'écart entre les deux courbes de débit est de l'ordre de 35% pour les faibles charges relatives ( $H^*/P < 0.3$ ).

La (figure V-18) montre aussi que l'écart d'évacuation varié de 50% à 61% pour les moyennes et fortes charges relatives ( $H^*/P > 0.5$ ).



**Figure V-18 : Courbes des débits du déversoir non rectiligne avec creusement uniquement en aval ( $d'_{\text{P}}=0.13$ ) comparée à celles du déversoir rectiligne en mince paroi**

### V-7-3 Capacité d'évacuation du déversoir creusé en amont ( $d'/P=0.13$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur

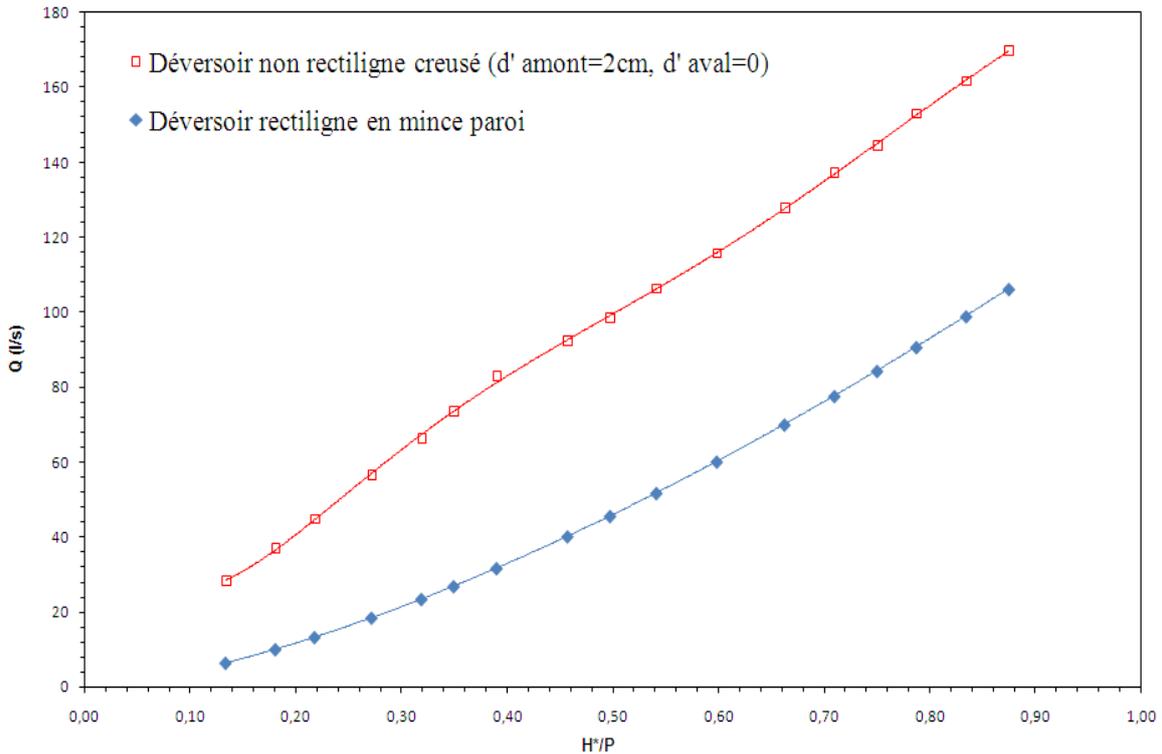
La comparaison de la capacité d'évacuation du déversoir non rectiligne creusé uniquement en aval (modèle D05) ( $d'_{\text{amont}}=0\text{cm}$ ,  $d'_{\text{aval}}=2\text{cm}$ ) avec la capacité d'évacuation du déversoir en mince paroi de même largeur (modèle D01) a montré un écart très remarquable entre les deux déversoirs dans la plupart des gammes de la charge relatives. À cet égard, il est souhaitable de vérifier la capacité d'évacuation du déversoir non rectiligne creusé uniquement en amont (modèle D04) ( $d'_{\text{amont}}=2$ ,  $d'_{\text{aval}}=0\text{cm}$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur (modèle D01).



**Figure V-19 : Déversoir creusé uniquement en amont (modèle D04)**

La représentation graphique des courbes de débit en fonction de la charge relative  $Q=f(H^*/P)$  (Figure V-20) montre que :

- Pour les faibles charges relatives ( $H^*/P < 0.3$ ), l'écart d'évacuation du déversoir non rectiligne creusé uniquement en amont (modèle D04) ( $d'_{\text{amont}}=2\text{cm}$ ,  $d'_{\text{aval}}=0\text{cm}$ ) par rapport un déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur (modèle D01) est de l'ordre de 32%.
- Pour les moyennes et fortes charges relatives ( $H^*/P > 0.5$ ), l'accroissement de la capacité d'évacuation varie de 48% à 60%.



**Figure V-20 : Courbes des débits du déversoir non rectiligne avec creusement uniquement en amont ( $d'/P=0.13$ ) comparée à celles du déversoir rectiligne en mince paroi**

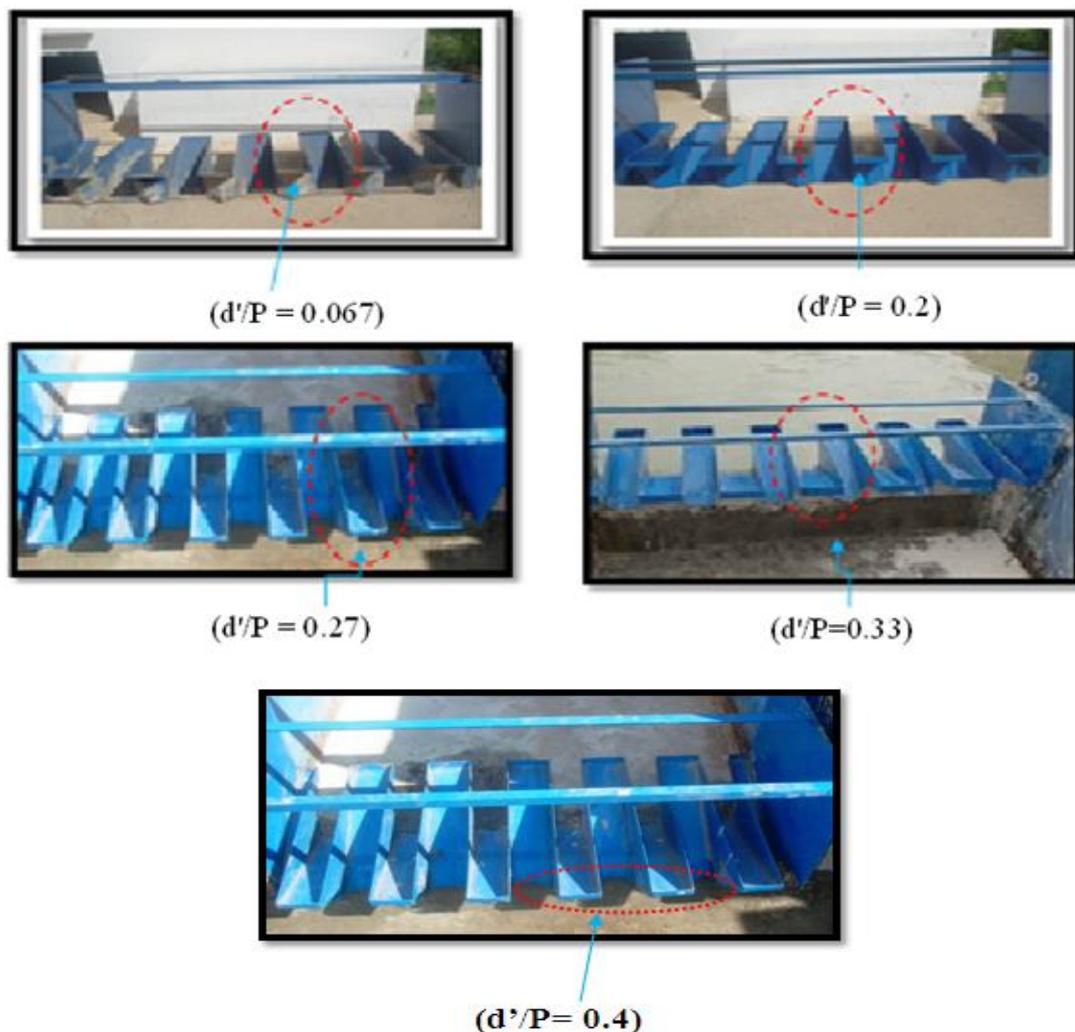
## INTERPRETATION DES RESULTATS

L'interprétation des résultats des essais expérimentaux sur trois modèles des déversoirs non rectilignes avec différents endroits de creusement des alvéoles (D03, D04, D05) et un autre modèle du déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur (modèle D01) est traduit comme suit :

- L'écart très remarquable de la capacité d'évacuation est justifié par l'influence de :
  - la pente engendrée par le creusement des alvéoles amont et aval des déversoirs creusés.
  - La longueur développée « L » des déversoirs creusés favorise l'évacuation des forts débits par rapport le déversoir rectiligne en mince paroi sous la même charge hydraulique.
- Du point de vue hydraulique, le meilleur creusement des alvéoles est celui qui correspond d'un creusement symétrique des alvéoles (modèle D03) ou creusement unique en amont (modèle 04). Tandis que le creusement unique en aval (modèle D05) peu apporte à la capacité d'évacuation du déversoir non rectiligne creusé.

- Du point de vue stabilité de l'ouvrage, le creusement symétrique des alvéoles est bénéfique, il assure mieux la stabilité du déversoir creusé en comparaison avec les autres types de creusement (uniquement en amont ou uniquement en aval).
- La performance moyenne des déversoirs non rectilignes avec différents endroits de creusement des alvéoles (modèle D03, modèle D04, modèle D05) avec ratio ( $d'/P=0.13$ ) par rapport au déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur (modèle D01) est de l'ordre de 2.15 fois.

D'après ces résultats, il serait intéressant de comparer la capacité d'évacuation des déversoirs creusés symétriquement (par l'augmentation ou diminution de la profondeur de creusement des alvéoles) (Figure V-21) avec la capacité d'évacuation du déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur.



**Figure V-21 : Différents modèles testés des déversoirs creusés symétriquement (augmentation / diminution de la profondeur de creusement des alvéoles)**

Sachant que :

Modèle D02 : [d'amont = d'aval = 1cm], (d'/P = 0.067)

Modèle D06 : [d'amont = d'aval = 3cm], (d'/P = 0.2)

Modèle D07 : [d'amont = d'aval = 4cm], (d'/P = 0.27)

Modèle D08 : [d'amont = d'aval = 5cm], (d'/P = 0.33)

Modèle D09 : [d'amont = d'aval = 6cm], (d'/P = 0.4)

Modèle D11 : [d'amont = d'aval = 0], (d'/P = 0)

#### **V-7-4 Capacité d'évacuation du déversoir creusé symétriquement (d'/P=0.067) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur**

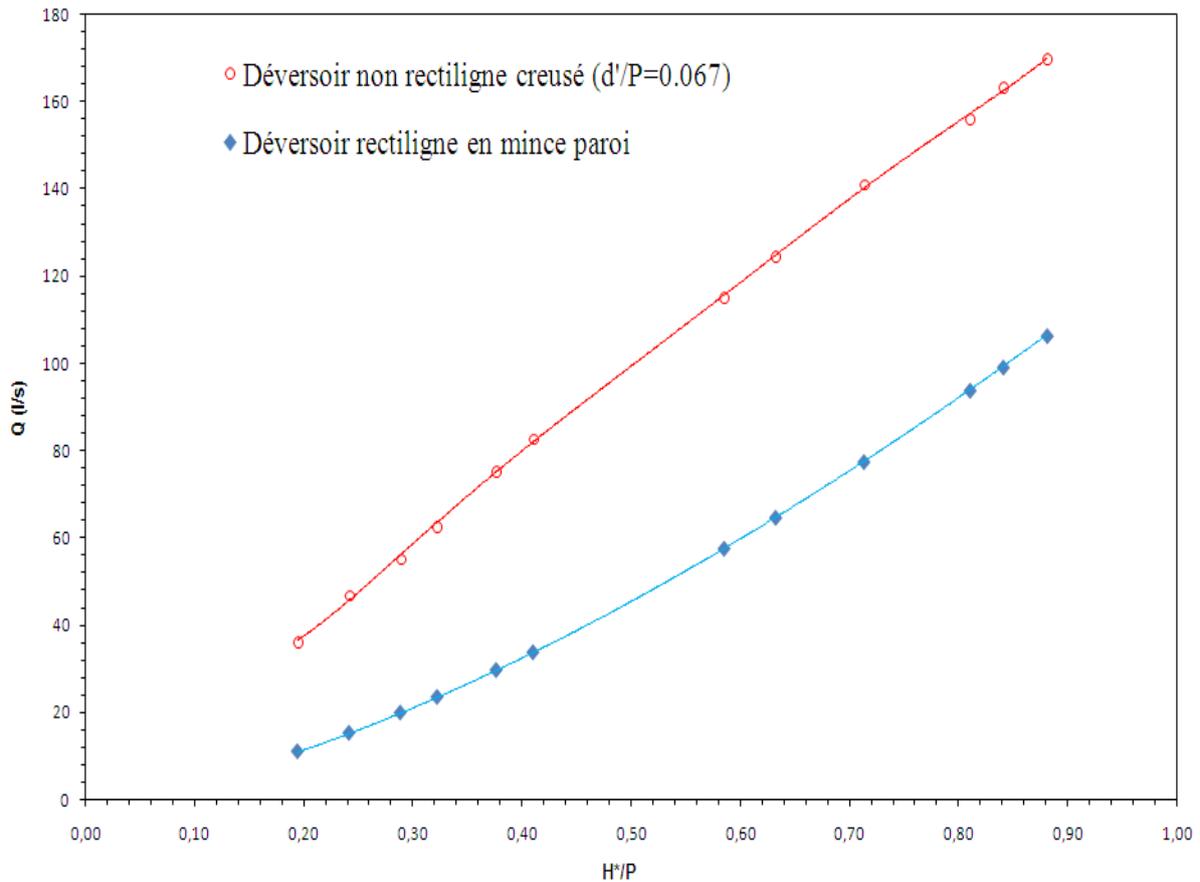
La comparaison de la capacité d'évacuation du déversoir non rectiligne creusé symétriquement (modèle D03) (d'/P=0.13) avec la capacité d'évacuation du déversoir en mince paroi de même largeur (modèle D01) a montré un écart très remarquable entre les deux déversoirs dans la plupart des gammes de la charge hydraulique.

Le (modèle D02) (d'/P=0.067) se caractérise par la diminution de son profondeur de creusement des alvéoles de (1cm) en comparaison avec le (modèle D03) (d'/P=0.13).

Donc, il est souhaitable d'effectuer des essais expérimentaux dont l'objectif de comparer la capacité d'évacuation de ce déversoir ; (modèle D02) (d'/P=0.067) avec un déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur (modèle D01).

La représentation graphique des courbes de débit en fonction de la charge relative  $Q=f(H^*/P)$  (Figure V-22) montre que :

- Pour les faibles charges ( $H^*/P < 0.3$ ), l'écart d'évacuation du déversoir non rectiligne avec creusement symétrique (modèle D02) (d'/P=0.067) par rapport au déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur (modèle D01) est de l'ordre de 33%.
- Pour les moyennes et fortes charges relatives ( $H^*/P > 0.5$ ), la capacité d'évacuation varie de 47% à 59%.
- La performance moyenne du déversoir non rectiligne avec creusement symétrique (modèle D02) (d'/P=0.067) par rapport au déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur (modèle D01) est de l'ordre de 2.15 fois.
- La performance du (modèle D02) (d'/P=0.067) devant le (modèle D01) est similaire à la performance du (modèle D03) (d'/P=0.13) devant le (modèle D01).



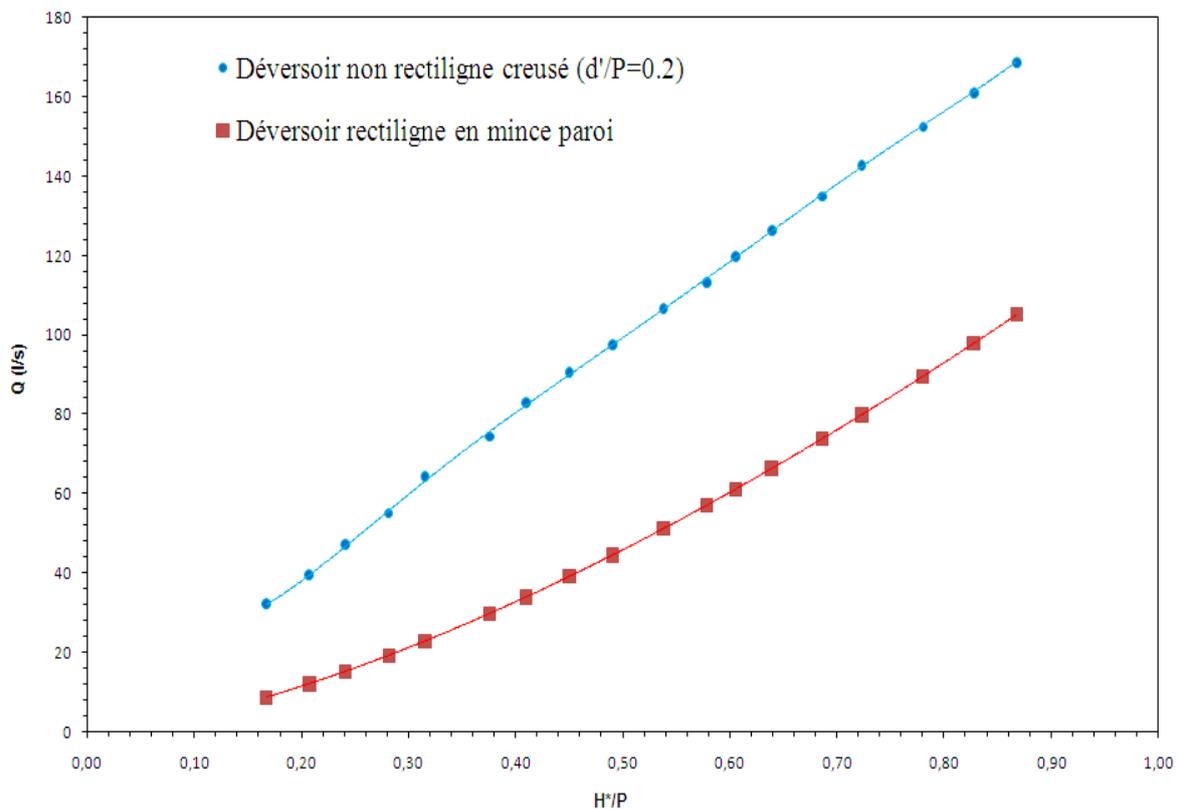
**Figure V-22 : Courbes des débits du déversoir non rectiligne avec creusement symétrique ( $d'/P=0.067$ ) comparée à celles du déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur**

#### **V-7-5 Capacité d'évacuation du déversoir creusé symétriquement ( $d'/P=0.2$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur**

Le (modèle D06) ( $d'/P=0.2$ ) se caractérise par l'augmentation de son profondeur de creusement des alvéoles de (1 cm) en comparaison avec le (modèle D03) ( $d'/P=0.13$ ). La comparaison de la capacité d'évacuation du déversoir non rectiligne creusé symétriquement (modèle D03) ( $d'/P=0.13$ ) avec la capacité d'évacuation du déversoir en mince paroi de même largeur (modèle D01) a montré un écart très remarquable entre les deux déversoirs dans la plupart des gammes de la charge hydraulique. À cet égard, il est souhaitable de vérifier la capacité d'évacuation du déversoir non rectiligne creusé symétriquement (modèle D06) ( $d'/P=0.2$ ) par rapport la capacité d'évacuation du déversoir en mince paroi de même largeur (modèle D01).

La représentation graphique des courbes de débit en fonction de la charge relative  $Q = f(H^*/P)$  (Figure V-23) montre que :

- Pour les faibles charges relatives ( $H^*/P < 0.3$ ), l'écart d'évacuation du déversoir non rectiligne avec creusement symétrique (modèle D06) ( $d'/P = 0.2$ ) par rapport au déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur (modèle D01) est de l'ordre de 34%, tandis que pour les moyennes et fortes charges relatives ( $H^*/P > 0.5$ ), l'accroissement de la capacité d'évacuation débit varie de 47% à 60%.
- La performance moyenne du déversoir non rectiligne avec creusement symétrique (modèle D06) ( $d'/P = 0.2$ ) par rapport au déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur (modèle D01) est de l'ordre de 2.12 fois.
- La performance du (modèle D06) ( $d'/P = 0.2$ ) devant le (modèle D01) est inférieur à la performance du (modèle D03) ( $d'/P = 0.13$ ) devant le (modèle D01).

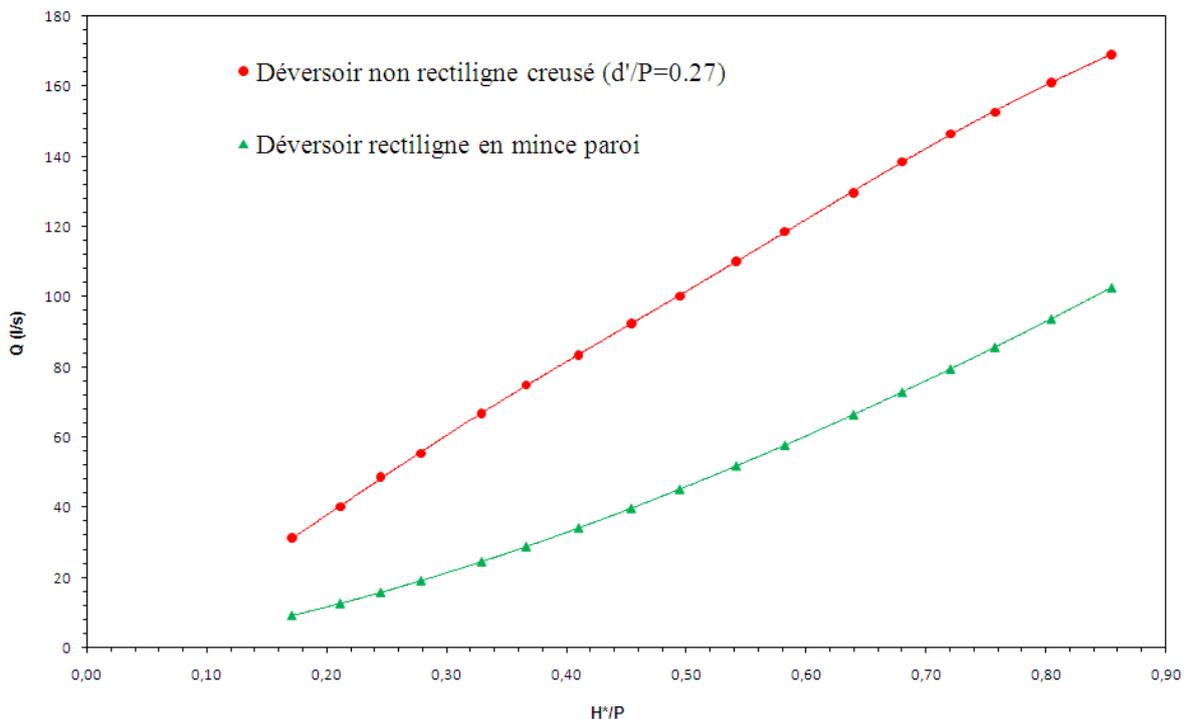


**Figure V-23 : Courbes des débits du déversoir non rectiligne avec creusement symétrique ( $d'/P=0.2$ ) comparée à celles du déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur**

### V-7-6 Capacité d'évacuation du déversoir creusé symétriquement ( $d'/P=0.27$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur

Le (modèle D07) ( $d'/P=0.27$ ) se caractérise par l'augmentation de son profondeur de creusement des alvéoles de (2cm) en comparaison avec le (modèle D03) ( $d'/P=0.13$ ).

Des essais expérimentaux sont recommandés pour comparer la capacité d'évacuation de ce modèle (modèle D07) ( $d'/P= 0.27$ ) avec la capacité d'évacuation du déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur (modèle D01).



**Figure V-24 : Courbes des débits du déversoir non rectiligne avec creusement symétrique ( $d'/P=0.27$ ) comparée à celles du déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur**

La (figure V-24) qui représente une comparaison entre la capacité d'évacuation du déversoir non rectiligne creusé symétriquement (modèle D07) ( $d'/P=0.27$ ) à celle du déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur (modèle D01) indique que :

- L'écart entre les deux courbes de débit est de l'ordre de 37% pour les faibles charges relatives ( $H^*/P < 0.3$ ).
- L'écart d'évacuation varié de 46% à 58% pour les moyennes et fortes charges relatives ( $H^*/P > 0.5$ ).
- La performance moyenne du déversoir non rectiligne avec creusement symétrique (modèle D07) ( $d'/P=0.27$ ) par rapport la performance du déversoir rectiligne en mince

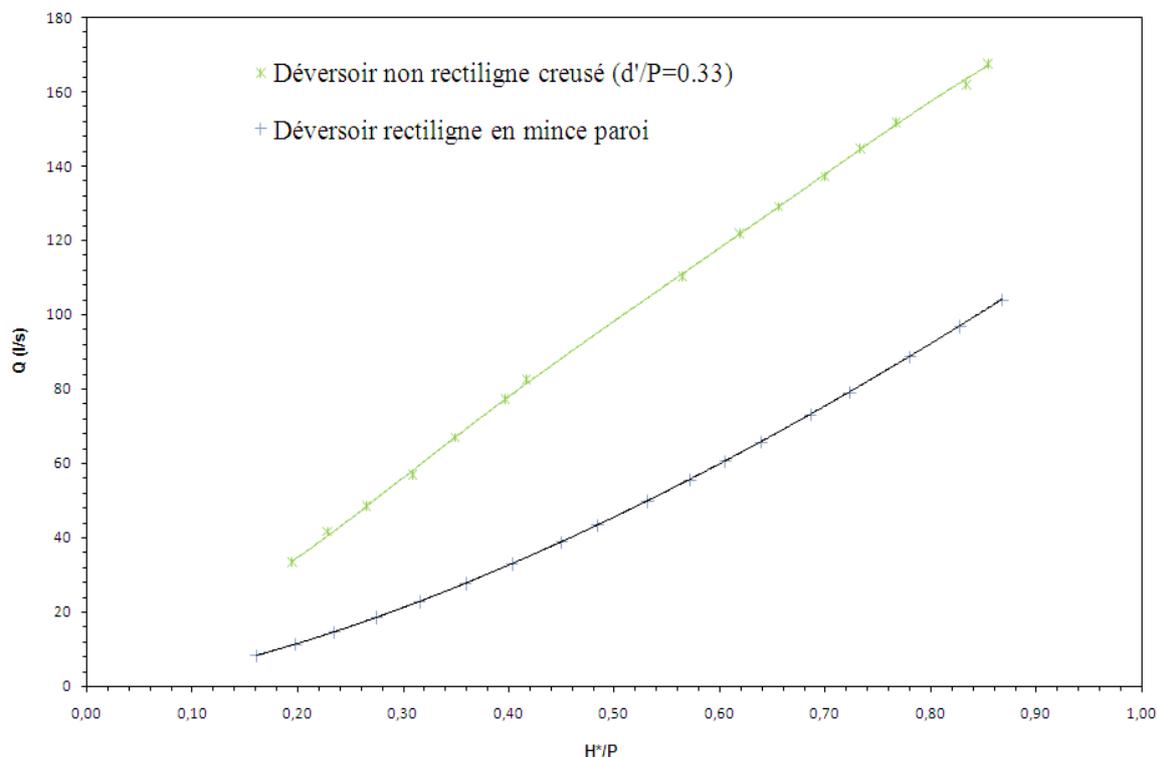
paroi de même largeur (modèle D01) est de l'ordre de 2.12 fois.

- La performance du (modèle D07) ( $d'/P=0.27$ ) devant le (modèle D01) est similaire à la performance du (modèle D06) ( $d'/P=0.2$ ) devant le (modèle D01).
- La performance du (modèle D07) ( $d'/P=0.27$ ) devant le (modèle D01) est inférieur à la performance du (modèle D03) ( $d'/P=0.13$ ) devant le (modèle D01).

### V-7-7 Capacité d'évacuation du déversoir creusé symétriquement ( $d'/P=0.33$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur

Les performances moyennes des déversoirs non rectilignes avec creusement symétrique (modèle D06) ( $d'/P=0.2$ ) et (modèle D07) ( $d'/P=0.27$ ) par rapport au déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur (modèle D01) restent stables et similaires, ils sont de l'ordre de 2.12 fois. Il serait intéressant de vérifier la performance du déversoir non rectiligne avec creusement symétrique (modèle D08) ( $d'/P=0.33$ ) par rapport un déversoir standard de même largeur (modèle D01).

Le (modèle D08) ( $d'/P=0.33$ ) se caractérise par l'augmentation de son profondeur de creusement des alvéoles de (3cm) en comparaison avec le (modèle D03) ( $d'/P=0.13$ ).



**Figure V-25 : Courbes des débits du déversoir non rectiligne avec creusement symétrique ( $d'/P=0.33$ ) comparée à celles du déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur**

La représentation graphique des courbes de débit en fonction de la charge relative  $Q = f(H^*/P)$  (Figure V-25) montre que :

- Pour les faibles charges relatives ( $H^*/P < 0.3$ ), l'écart d'évacuation du déversoir non rectiligne avec creusement symétrique (modèle D08) ( $d'/P = 0.33$ ) par rapport au déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur (modèle D01) est de l'ordre de 37%, tandis que pour les moyennes et fortes charges relatives ( $H^*/P > 0.5$ ), l'accroissement de débit varie de 49% à 59%.
- La performance moyenne du déversoir non rectiligne avec creusement symétrique (modèle D08) ( $d'/P = 0.33$ ) par rapport au déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur (modèle D01) est de l'ordre de 2.06 fois.
- La performance du (modèle D08) ( $d'/P = 0.33$ ) devant le (modèle D01) est inférieur à la performance des : (modèle D06) ( $d'/P = 0.2$ ) et (modèle D07) ( $d'/P = 0.27$ ) devant le (modèle D01).
- La performance du (modèle D08) ( $d'/P = 0.33$ ) devant le (modèle D01) est inférieur à la performance du (modèle D03) ( $d'/P = 0.13$ ) devant le (modèle D01).

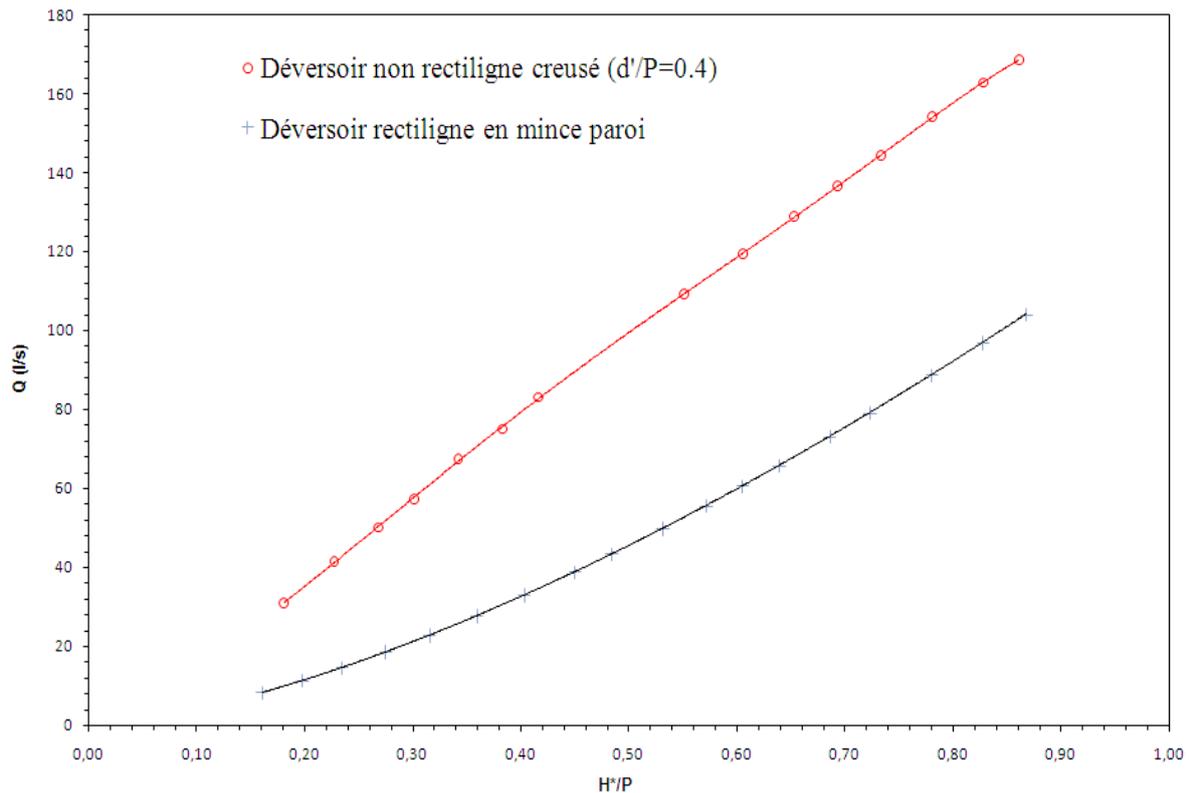
#### **V-7-8 Capacité d'évacuation du déversoir creusé symétriquement ( $d'/P = 0.4$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur**

Le (modèle D09) ( $d'/P = 0.4$ ) se caractérise par l'augmentation de son profondeur de creusement des alvéoles de (4cm) en comparaison avec le (modèle D03) ( $d'/P = 0.13$ ).

On a constaté que la performance du (modèle D08) ( $d'/P = 0.33$ ) devant le (modèle D01) est inférieur à la performance du (modèle D03) ( $d'/P = 0.13$ ) devant le (modèle D01).

On a constaté ainsi, que la performance du (modèle D08) ( $d'/P = 0.33$ ) devant le (modèle D01) est inférieur à la performance des modèles D06 ( $d'/P = 0.2$ ) et D07 ( $d'/P = 0.27$ ) devant le (modèle D01).

À cet égard, il est souhaitable de vérifier la capacité d'évacuation du déversoir non rectiligne creusé symétriquement (modèle D09) ( $d'/P = 0.4$ ) par rapport la capacité d'évacuation du déversoir en mince paroi de même largeur (modèle D01).



**Figure V-26 : Courbes des débits du déversoir non rectiligne avec creusement symétrique ( $d'/P=0.4$ ) comparée à celles du déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur**

La représentation graphique des courbes de débit en fonction de la charge relative  $Q=f(H^*/P)$  (Figure V-26) montre que :

- Pour les faibles charges relatives ( $H^*/P < 0.3$ ), l'écart d'évacuation du déversoir non rectiligne avec creusement symétrique (modèle D09) ( $d'/P=0.4$ ) par rapport au déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur (modèle D01) est de l'ordre de 34%, tandis que pour les moyennes et fortes charges relatives ( $H^*/P > 0.5$ ), l'accroissement de la capacité d'évacuation varie de 52% à 59%.
- La performance moyenne du déversoir non rectiligne avec creusement symétrique (modèle D09) ( $d'/P=0.4$ ) par rapport au déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur (modèle D01) est de l'ordre de 2 fois.
- La performance du (modèle D09) ( $d'/P=0.4$ ) devant le (modèle D01) est inférieure à la performance du (modèle D08) ( $d'/P=0.33$ ) devant le (modèle D01).
- La performance du (modèle D09) ( $d'/P=0.4$ ) devant le (modèle D01) est inférieure à la performance du (modèle D03) ( $d'/P=0.13$ ) devant le (modèle D01).

### V-7-9 Capacité d'évacuation du déversoir en labyrinthe développé ( $d'/P=0$ ) par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur

La comparaison de la capacité d'évacuation du déversoir non rectiligne creusé symétriquement (modèle D02) ( $d'/P=0.067$ ) avec la capacité d'évacuation du déversoir en mince paroi de même largeur (modèle D01) a montré un écart très remarquable entre les deux déversoirs dans la plupart des gammes de la charge hydraulique.

La performance du (modèle D02) ( $d'/P=0.067$ ) devant le (modèle D01) est similaire à la performance du (modèle D03) ( $d'/P=0.13$ ) devant le (modèle D01).

Le (modèle D11) ( $d'/P=0$ ) se caractérise par l'absence de sa profondeur de creusement de ses alvéoles en comparaison avec le (modèle D02) ( $d'/P=0.067$ ).

Donc, il est souhaitable de réaliser des essais expérimentaux dont l'objectif de comparer la capacité d'évacuation du ce déversoir ; (modèle D11) ( $d'/P=0$ ) avec le déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur (modèle D01).



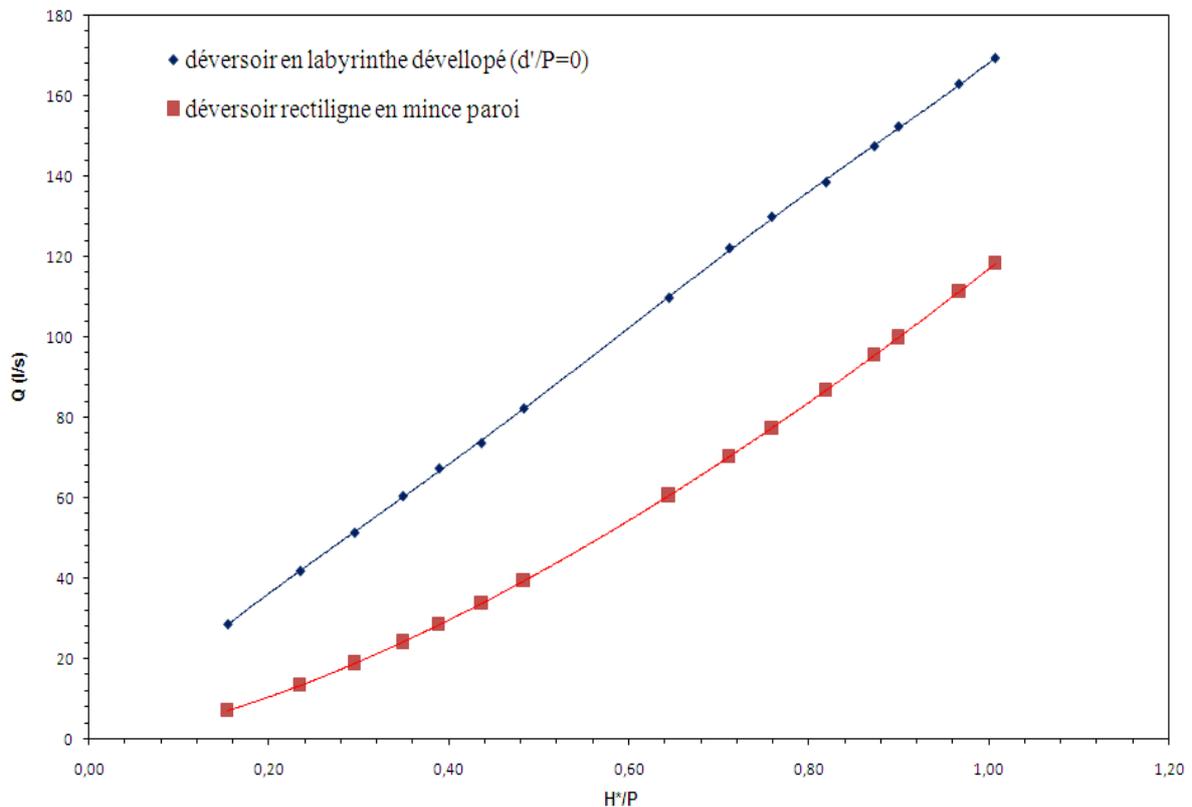
**Figure V-27 : Déversoir en labyrinthe développé (modèle D11)**

La représentation graphique des courbes de débit en fonction de la charge relative  $Q = f(H^*/P)$  (Figure V-28) montre que :

- Pour les faibles charges relatives ( $H^*/P < 0.3$ ), l'écart d'évacuation du déversoir en labyrinthe développé (modèle D11) ( $d'/P=0$ ) par rapport au déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur (modèle D01) est de l'ordre de 30%.
- Pour les moyennes et fortes charges hydrauliques ( $H^*/P > 0.5$ ), la capacité d'évacuation varie de 44% à 55%.
- La performance moyenne du déversoir en labyrinthe développé (modèle D11) ( $d'/P=0$ ) par rapport au déversoir en mince paroi de même largeur (modèle D01) est de

l'ordre de 2 fois.

- La performance du déversoir en labyrinthe développé (modèle D11) ( $d'/P=0$ ) devant le déversoir rectiligne en mince paroi (modèle D01) est inférieure à la performance du (modèle D02) ( $d'/P=0.067$ ) devant le (modèle D01).



**Figure V-28 : Courbes des débits du déversoir en labyrinthe développé ( $d'/P=0$ ) comparée à celles du déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur**

## INTERPRETATION DES RESULTATS

On rappelle qu'on a effectué des essais expérimentaux sur les huit modèles suivants :

- Cinq modèles des déversoirs non rectilignes creusés symétriquement D02 ( $d'/P=0.067$ ), D06 ( $d'/P=0.2$ ), D07 ( $d'/P=0.27$ ), D08 ( $d'/P=0.33$ ), D09 ( $d'/P=0.4$ )
- Un déversoir en mince paroi de même largeur (modèle D01)
- Un déversoir en labyrinthe développé (modèle D11) ( $d'/P=0$ )

Les résultats des essais sont traduits comme suit :

- L'augmentation de la pente de creusement des alvéoles fait augmenter la performance du déversoir non rectiligne creusé symétriquement jusqu'à le ratio ( $d'/P=0.27$ ), mais à

partir du ratio ( $d'/P= 0.33$ ) la performance se diminue d'une manière significative. Ce résultat signifie que la pente de creusement des alvéoles ne doit pas dépasser le (1/3).

- La diminution de la pente de creusement des alvéoles fait diminuer la performance du déversoir non rectiligne creusé symétriquement jusqu'à le ratio ( $d'/P= 0$ ).
- La performance des déversoirs non rectilignes creusés devant les déversoirs rectilignes en mince paroi de même largeur est variée de (2.15 à 2) fois.

Les résultats des essais sont mentionnés dans le (Tableau V-2), ce tableau résume les résultats obtenus.

Déversoir non rectiligne creusé			Déversoir rectiligne en mince paroi	Performance moyenne
Modèle	$d'/P$	Creusement	Modèle	$q=Q_{Nr} / Q_{cr}$
D02	0.067	symétrique	D01	2.15
D03	0.13	symétrique	D01	2.15
D04	0.13	amont	D01	2.15
D05	0.13	aval	D01	2.06
D06	0.2	symétrique	D01	2.12
D07	0.27	symétrique	D01	2.12
D08	0.33	symétrique	D01	2.06
D09	0.4	symétrique	D01	2
D11	0	sans creusement	D01	2

**Tableau V-02 : Tableau récapitulatif des résultats obtenus**

Ces résultats montrent que le déversoir non rectiligne creusé peut être une solution efficace pour faire évacuer des grands débits sous des faibles charges hydrauliques.

Il serait intéressant d'entamer une étude expérimentale approfondie sur les déversoirs non rectilignes creusés afin de :

- Mieux comprendre leurs fonctionnements hydrauliques.
- Comprendre l'effet de ses paramètres adimensionnels sur ses performances, sur ses rendements du point de vue hydraulique.

## PARTIE II

### V-8 ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES DEVERSOIRS EN LABYRINTHE DEVELOPPES (DIFFERENTES FORMES EN PLAN) ET LES DEVERSOIRS EN MINCE PAROI

Il est nécessaire de rappeler que la performance représente le rendement du déversoir en labyrinthe développé par rapport au déversoir rectiligne. Elle est exprimée par le rapport entre le débit qui transite par le déversoir en labyrinthe développé et celui d'un déversoir rectiligne de même largeur et sous la même charge.

$$q = \frac{Q_{Nr}}{Q_{cr}} \quad (V-08)$$

Où :

$q$  : Performance du déversoir expérimenté (déversoir en labyrinthe développé)

$Q_{NR}$ : Débit mesuré ( $m^3/s$ )

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

Le débit qui transite par le déversoir rectiligne à paroi mince est déterminé par la relation de **(POLENI., 1736)**:

$$Q_{cr} = \mu L \sqrt{2gh}^{*3/2} \quad (V-09)$$

Où :

$\mu$  : Coefficient de débit d'un déversoir standard de type Creager ( $\mu=0.49$ )

$L$  : Largeur du déversoir (m)

$h^*$  : Charge totale sur le déversoir (mce)

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

Pour ce faire, trois modèles du déversoir en labyrinthe développé ont fait l'objet d'essais sur modèles réduits.

Ces trois modèles ont les mêmes dimensions et la même configuration géométrique :

- déversoir en labyrinthe développé triangulaire (figure V-29)

- déversoir en labyrinthe développé trapézoïdal (figure V-30)
- déversoir en labyrinthe développé rectangulaire (figure V-31)



Figure V-29 : Forme en plan triangulaire



Figure V-30 : Forme en plan trapézoïdale



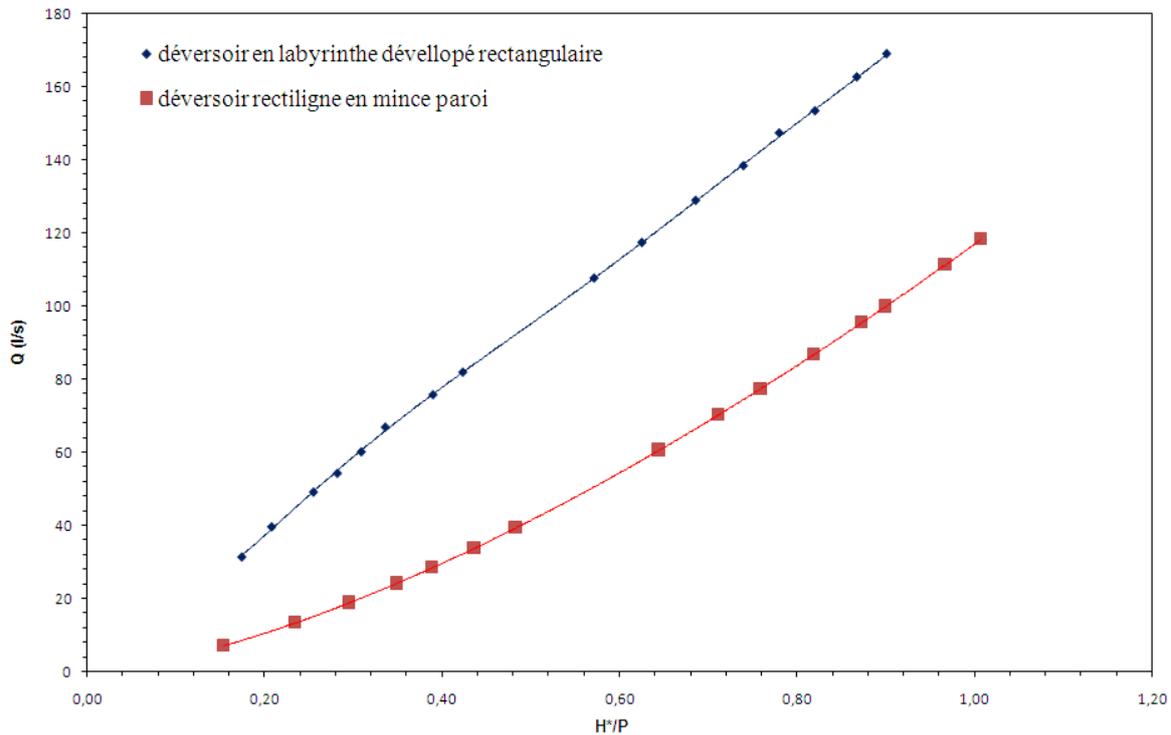
Figure V-31 : Forme en plan rectangulaire

#### V-8-1 Capacité d'évacuation du déversoir en labyrinthe développé rectangulaire par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur

La représentation graphique des courbes de débit en fonction de la charge relative  $Q = f(H^*/P)$  (Figure V-32) montre que :

- Pour les faibles charges relatives ( $H^*/P < 0.3$ ), l'écart d'évacuation du déversoir en labyrinthe développé rectangulaire (modèle D12) par rapport le déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur (modèle D01) est de l'ordre de 42%.
- Pour les moyennes et fortes charges relatives ( $H^*/P > 0.6$ ), l'accroissement de la capacité d'évacuation varie de 48% à 70%.
- La performance moyenne du déversoir en labyrinthe développé rectangulaire (modèle D12) par rapport au déversoir en mince paroi de même largeur (modèle D01) est de

l'ordre de 2 fois.



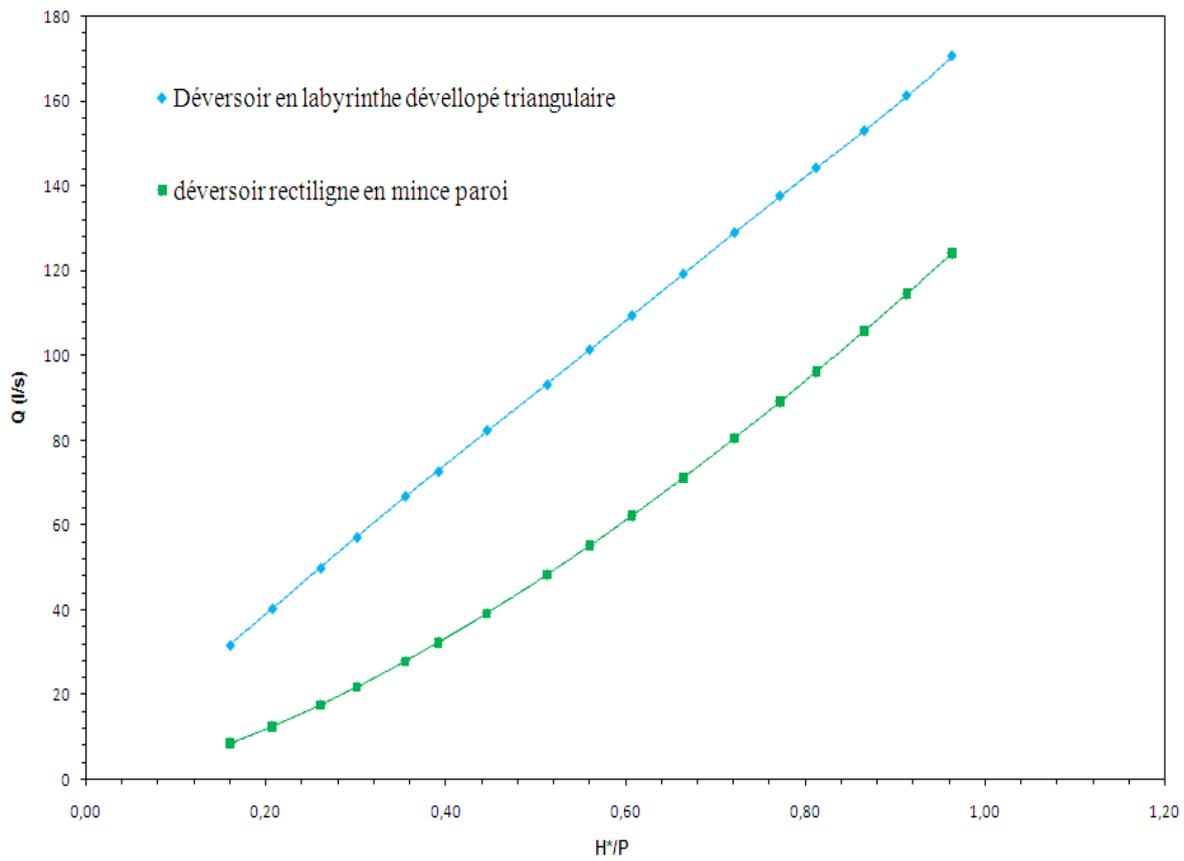
**Figure V-32 : Courbes des débits du déversoir en labyrinthe développé rectangulaire comparée à celles du déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur**

### V-8-2 Capacité d'évacuation du déversoir en labyrinthe développé triangulaire par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur

La représentation graphique des courbes de débit en fonction de la charge relative  $Q = f(H^*/P)$  (Figure V-33) montre que :

- Pour les faibles charges relatives ( $H^*/P < 0,3$ ), l'écart d'évacuation du déversoir en labyrinthe développé triangulaire (modèle D13) par rapport le déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur (modèle D01) est de l'ordre de 34%.
- Pour les moyennes et fortes charges relatives ( $H^*/P > 0,6$ ), l'accroissement de la capacité d'évacuation varie de 38% à 60%.
- La performance moyenne du déversoir en labyrinthe développé triangulaire (modèle D13) par rapport au déversoir en mince paroi de même largeur (modèle D01) est de l'ordre de 1.85 fois.
- La performance du déversoir en labyrinthe développé triangulaire (modèle D13) devant le (modèle D01) est inférieure à la performance du déversoir en labyrinthe développé rectangulaire (modèle D12) devant le déversoir en mince paroi (modèle

D01).



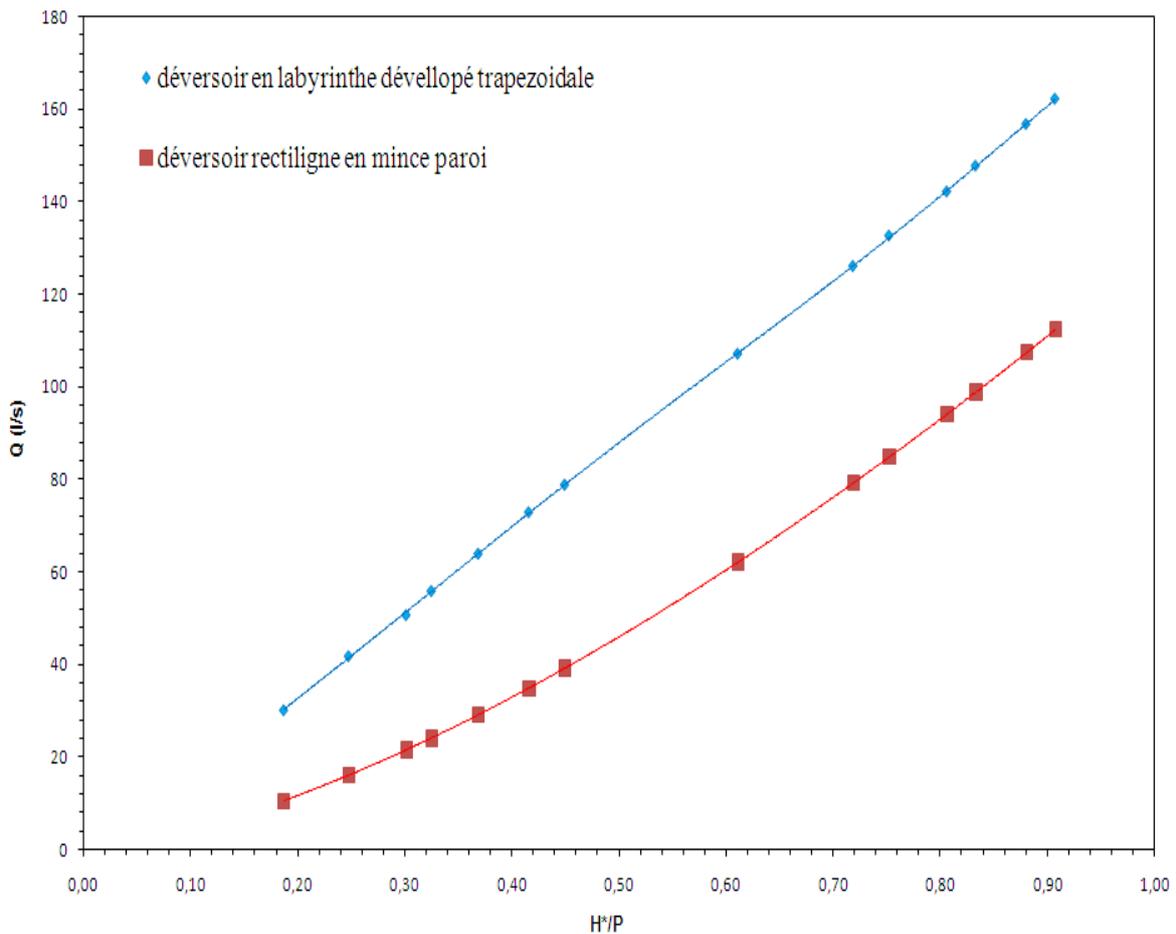
**Figure V-33 : Courbes des débits du déversoir en labyrinthe développé triangulaire comparée à celles du déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur**

### V-8-3 Capacité d'évacuation du déversoir en labyrinthe développé trapézoïdal par rapport un déversoir en mince paroi de même largeur

La représentation graphique des courbes de débit en fonction de la charge relative  $Q = f(H^*/P)$  (Figure V-34) montre que :

- Pour les faibles charges relatives ( $H^*/P < 0,3$ ), l'écart d'évacuation du déversoir en labyrinthe développé trapézoïdal (modèle D14) par rapport le déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur (modèle D01) est de l'ordre de 40%.
- Pour les moyennes et fortes charges relatives ( $H^*/P > 0,6$ ), l'accroissement de la capacité d'évacuation varie de 46% à 64%.
- La performance moyenne du déversoir en labyrinthe développé trapézoïdal (modèle D14) par rapport au déversoir en mince paroi de même largeur (modèle D01) est de l'ordre de 1.88 fois.

- La performance du déversoir en labyrinthe développé trapézoïdal (modèle D14) devant le déversoir en mince paroi (modèle D01) est inférieure à la performance du déversoir en labyrinthe développé rectangulaire (modèle D12) devant le déversoir en mince paroi (modèle D01).
- La performance du déversoir en labyrinthe développé trapézoïdal (modèle D14) devant le déversoir en mince paroi (modèle D01) est supérieure à la performance du déversoir en labyrinthe développé triangulaire (modèle D13) devant le déversoir en mince paroi (modèle D01).



**Figure V-32 : Courbes des débits du déversoir en labyrinthe développé trapézoïdal comparée à celles du déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur**

## INTERPRETATION DES RESULTATS

On rappelle qu'on a effectuait des essais expérimentaux sur les quatre modèles suivants :

- Un déversoir en mince paroi de même largeur (modèle D01)
- Un déversoir en labyrinthe développé rectangulaire (modèle D12)
- Un déversoir en labyrinthe développé triangulaire (modèle D13)
- Un déversoir en labyrinthe développé trapézoïdal (modèle D14)

Les résultats des essais sont traduits comme suit :

- La forme géométrique des alvéoles joue un rôle primordial dans l'augmentation / diminution de la capacité d'évacuation des déversoirs.
- La forme en plan rectangulaire du déversoir permet l'évacuation des grands débits, tandis que les formes en plans triangulaires et trapézoïdaux diminuent la capacité d'évacuation.
- La forme en plan trapézoïdale permet l'évacuation des grands débits en comparaison avec la forme en plan triangulaire.
- La performance des déversoirs non rectilignes en labyrinthe développé devant les déversoirs rectilignes en mince paroi de même largeur est variée de (1.85 à 2) fois.

Les résultats des essais sont mentionnés dans le (Tableau V-3), ce tableau résume les résultats obtenus.

<b>Déversoir en labyrinthe développé</b>	<b>Forme en plan</b>	<b>Déversoir rectiligne en mince paroi</b>	<b>Performance moyenne <math>q=Q_{Nr} / Q_{cr}</math></b>
D12	Rectangulaire	D01	2.02
D13	Triangulaire	D01	1.85
D14	Trapézoïdal	D01	1.88

**Tableau V-03 : Tableau récapitulatif des résultats obtenus (différents forme en plan)**

Ces résultats montrent que le déversoir en labyrinthe développé rectangulaire peut être une solution efficace pour faire évacuer des grands débits sous des faibles charges hydrauliques.

### **PARTIE III**

#### **V-9 ETUDE EXPERIMENTALE SUR MODELES REDUITS DES DEVERSOIRS CREUSES**

##### **V-9-1 Impact de l'endroit d'emplacement du déversoir non rectiligne creusé**

Le déversoir non rectiligne creusé est conçu pour être placé sur les barrages poids ou inséré dans les canaux des barrages en terre. Cet avantage est le résultat de la conception d'une grande partie du déversoir non rectiligne creusé en porte-à-faux. Pour le cas d'un déversoir non rectiligne creusé conçu sur un barrage en béton l'écoulement en aval n'est pas en contact avec le déversoir, tandis que pour le cas où le déversoir non rectiligne creusé est conçu dans un canal d'évacuation des crues d'un barrage en terre le déversoir est en contact avec l'écoulement aval.

Pour vérifier l'impact de l'endroit d'emplacement du déversoir non rectiligne creusé par rapport au niveau aval deux types d'essais ont été effectués sur les trois modèles suivants :

- (Modèle D03) avec rehausses symétriques en amont et en aval.
- (Modèle D04) avec rehausses uniquement en amont.
- (Modèle D05) avec rehausses uniquement en aval.

Le premier essai à concerner l'emplacement du modèle testé sur une section d'essai dont le radier du canal aval est au même niveau que le pied aval du déversoir non rectiligne creusé. Le second type d'essai a été réalisé après avoir fait surélever le déversoir non rectiligne creusé par un socle de hauteur 25.2cm, ceci a permis d'avoir un niveau du pied aval du déversoir plus haut que le canal de restitution aval.

❖ **Modèle (D03) avec rehausses symétriques en amont et en aval :**

Le premier modèle testé correspond au déversoir non rectiligne creusé (modèle D03), qui est caractérisé par l'existence de rehausses en amont et en aval sur les deux emplacements (emplacement avec socle et sans socle).



Figure V-35: Modèle D03 (sans socle)

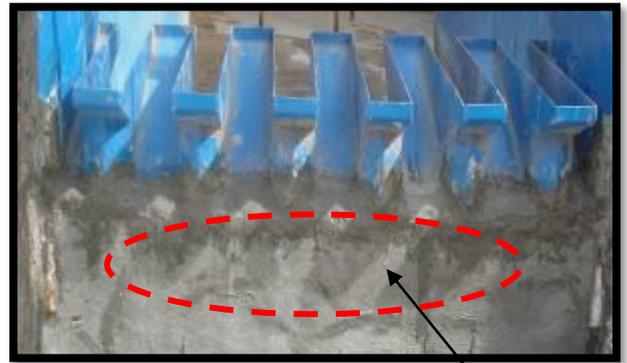
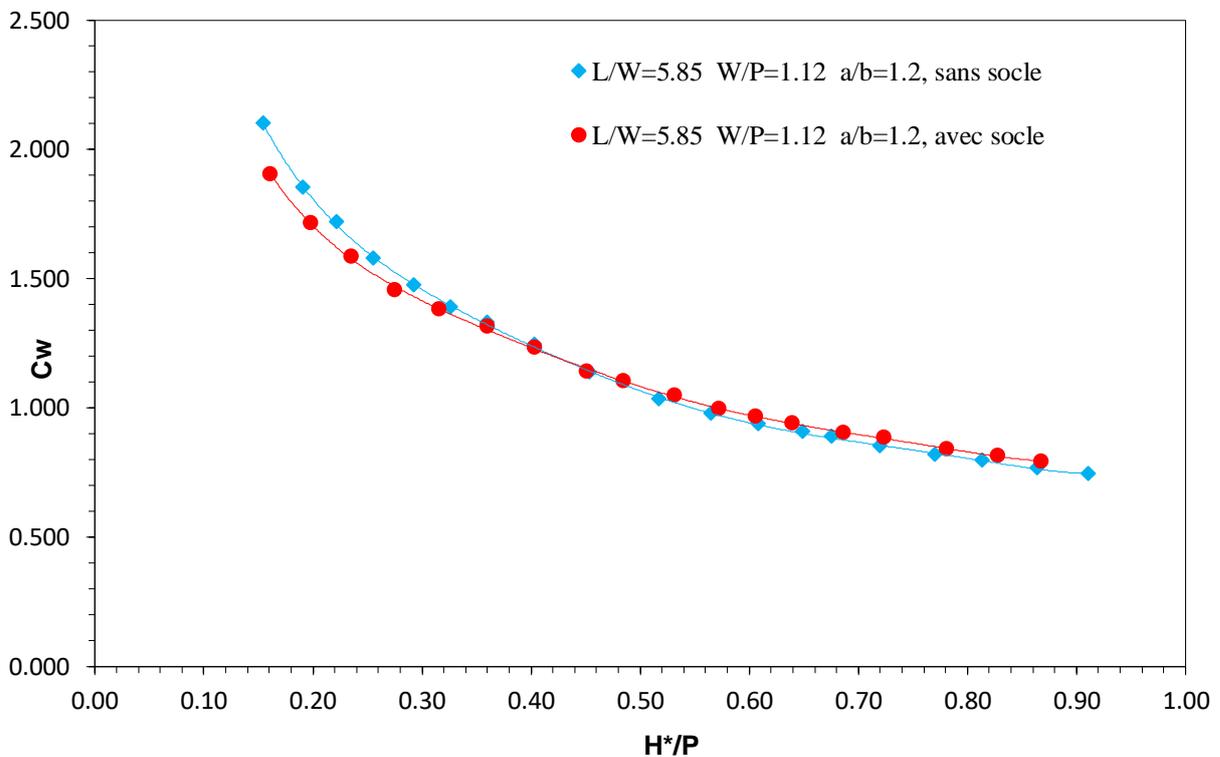


Figure V-36: Modèle D03 (avec socle)

La figure (V-37) montre la comparaison entre les coefficients de débit du (modèle D03) sans socle et le (modèle D03) avec socle. Cette comparaison montre que les deux courbes ont même allure sauf un écart très faible de l'ordre de 2% pour les faibles charges relatives inférieures à 0.30, c'est-à-dire que le déversoir non rectiligne creusé donne le même rendement pour les deux cas d'emplacement.



**Figure V-37 : Coefficients de débit en fonction de l'emplacement du déversoir non rectiligne creusé (modèle D03) ( $d' \text{ amont} = d' \text{ aval}$ )**

❖ **Modèle (D04) avec rehausses uniquement en amont :**

Le deuxième modèle testé correspond au (modèle D04), ce dernier se caractérise par l'existence de rehausses uniquement en amont (emplacement avec socle et sans socle).

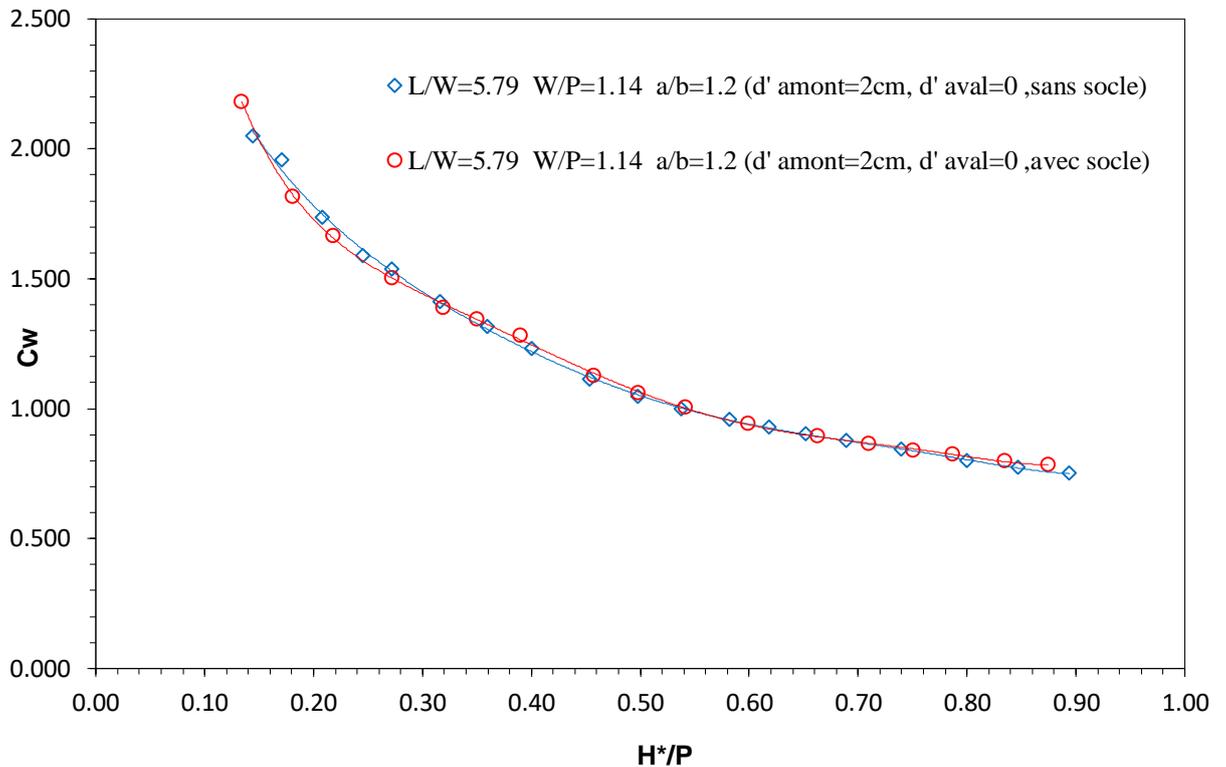


**Figure V-38: Modèle D04 (sans socle)**



**Figure V-39: Modèle D04 (avec socle)**

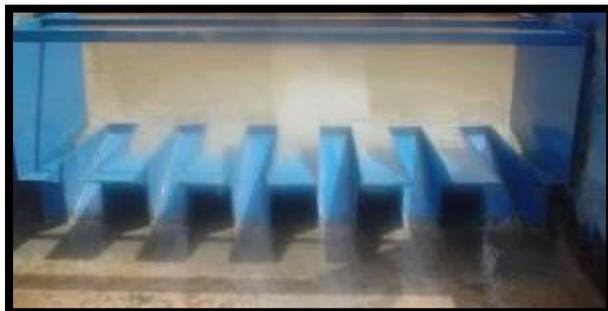
La (figure V-40) montre la comparaison entre les coefficients de débit du (modèle D04) sans socle et le (modèle D04) avec socle. Cette comparaison nous indique que les deux courbes sont presque semblables, c'est-à-dire que le déversoir non rectiligne creusé donne le même rendement pour les deux cas d'emplacement.



**Figure V-40 : Coefficients de débit en fonction de l'emplacement du déversoir non rectiligne creusé (modèle D04)**

❖ **Modèle (D05) avec rehausses uniquement en aval :**

Le troisième modèle testé correspond au (modèle D05), ce dernier se caractérise par l'existence de rehausses uniquement en aval (emplacement avec socle et sans socle).

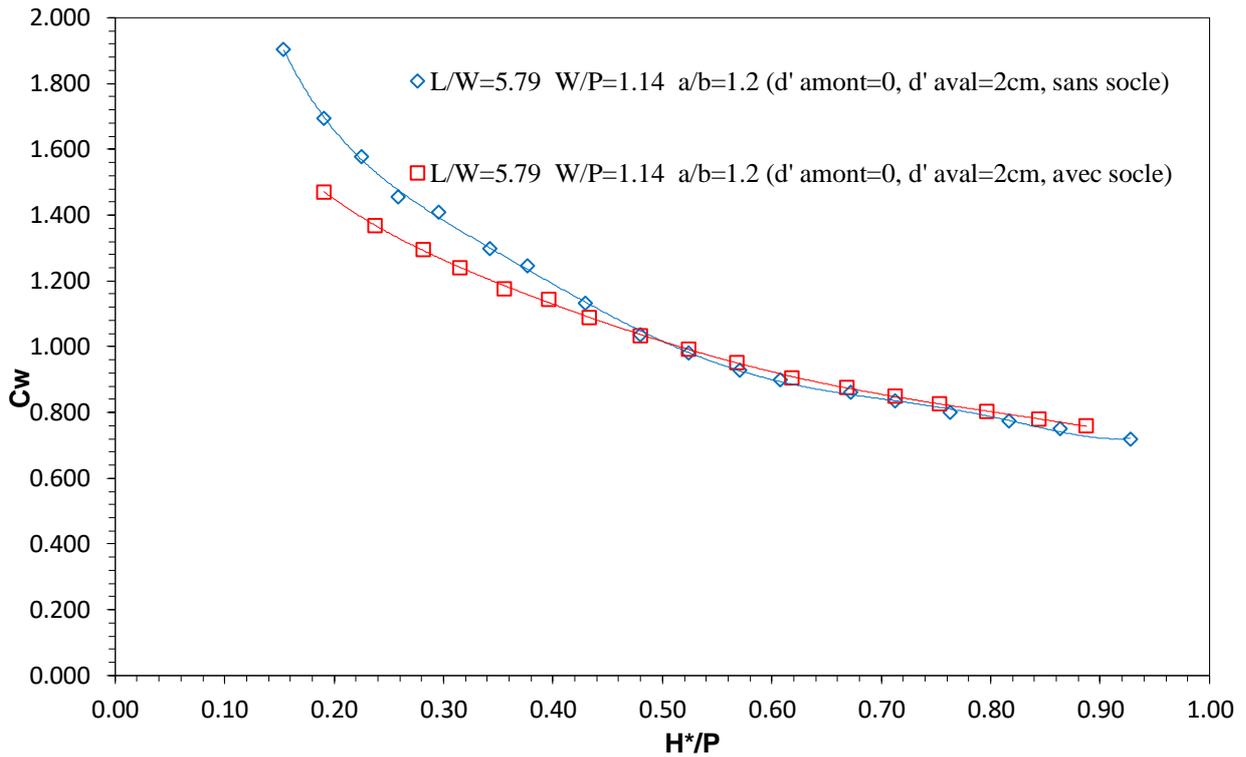


**Figure V-41: Modèle D05 (sans socle)**



**Figure V-42: Modèle D05 (avec socle)**

La (figure V-43) montre la comparaison entre les coefficients de débit du (modèle D05) sans socle et le (modèle D05) avec socle. Cette comparaison montre un écart très remarquable de l'ordre de 7% pour les charges relatives inférieures à 0.40, par contre pour les moyennes et les fortes charges relatives, les courbes sont presque identiques, c'est-à-dire que dans les deux cas d'emplacement, le déversoir non rectiligne creusé (modèle D05) donne le même rendement hydraulique uniquement à partir des moyennes charges relatives.



**Figure V-43 : Coefficients de débit en fonction de l'emplacement du déversoir non rectiligne creusé (modèle D05)**

**V-9-2 Effet des corps flottants sur la performance du déversoir non rectiligne creusé**

Deux modèles du déversoir non rectiligne creusé (modèle D03) ont été expérimentés de même configuration géométrique pour voir le comportement du déversoir non rectiligne creusé sous l'effet des corps flottants, le premier modèle à écoulement libre (fig V-44), le deuxième modèle est confronté à la présence des corps flottant dans l'écoulement (fig V-45).



**Figure V-44 :**  
**Figure V-45 : Présence des**



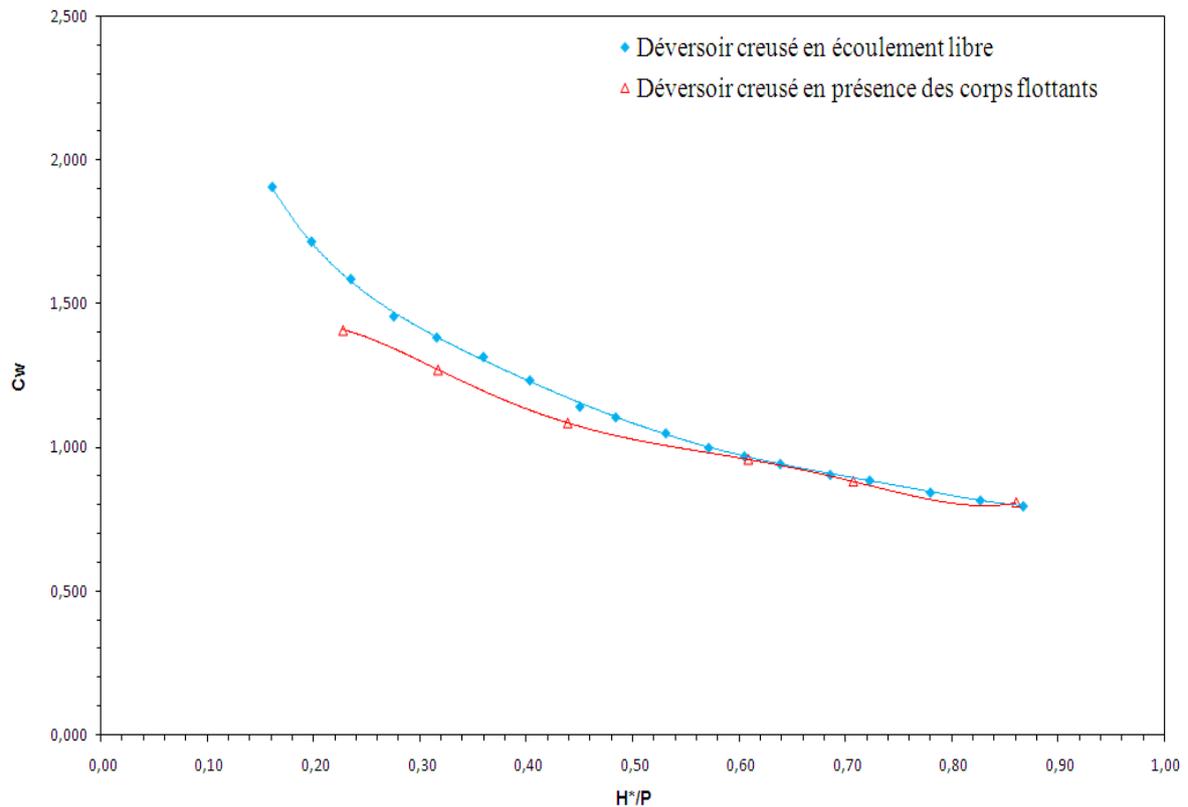
**Écoulement libre**  
**corps flottants**

**Figure V-46 : Ecoulement après l'évacuation des corps flottants**

La représentation graphique des coefficients de débit en fonction de la charge relative pour les deux cas d'écoulement ; libre, en présence des corps flottants (figure V-47) montre que :

- La capacité d'évacuation de l'écoulement en présence des corps flottants se diminue brusquement à partir des faibles charges relatives ( $H^*/P$  égale à 0.30) à cause que la géométrie du déversoir comporte de rehausses, alors les corps flottants se bloquent dans les alvéoles amonts du déversoir.
- Dès que la charge relative atteint ses fortes valeurs ( $H^*/P > 0.60$ ), on remarque que l'écoulement est redevenu libre, donc tous les corps flottants ont été évacués.

Donc, on peut dire que la présence des corps flottants fait diminuer d'une manière significative la capacité d'évacuation du déversoir non rectiligne creusé surtout dans les phases de faibles et moyennes charges relatives.



**Figure V-47: Coefficients du débit en fonction de l'effet des corps flottants sur la performance du déversoir non rectiligne creusé**

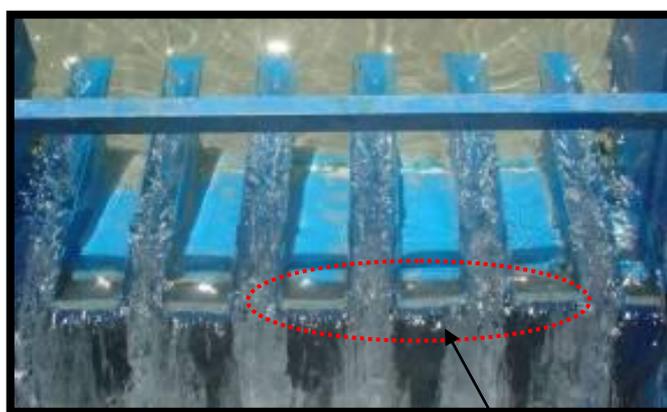
### V-9-3 Effet de la forme d'entrée sur le déversoir non rectiligne creusé

La forme d'entrée de crue en amont du déversoir non rectiligne creusé signifie la forme géométrique à la partie supérieure des porte-à-faux amont du déversoir non rectiligne creusé. Notre souci est de chercher une meilleure forme géométrique de la forme d'entrée afin d'augmenter le rendement hydraulique du déversoir non rectiligne creusé. Dans ce contexte deux modèles de mêmes paramètres adimensionnels ( $L/W$ ,  $W/P$ ,  $a/b$ ,  $d'/P$ ) ont été testés, la seule différence entre eux était que :

- (Modèle D03) : forme d'entrée plane (figure V-48)
- (Modèle D10) : forme d'entrée en arc (figure V-49)



**Figure V-48: Forme d'entrée plan (modèle D03)**



**Figure V- 9: Forme d'entrée en arc (modèle D10)**

La représentation graphique de la variation du débit en fonction de la charge totale au niveau de la partie supérieure des porte-à-faux amont pour les deux modèles testés (modèle D03) avec forme d'entrée plane et (modèle D10) avec forme d'entrée en arc (figure V-50) montre que :

- Pour les faibles débits [30-80] l/s: le modèle du déversoir non rectiligne creusé avec forme d'entrée en plan évacue des charges plus grandes que celui de la forme d'entrée en arc de l'ordre de 8% à cause que la forme en arc fait perturber l'écoulement;
- Pour les moyennes valeurs de débit de [80 à 110] l/s : un écart très faible de l'ordre de 3% est constaté entre les deux modèles.
- Pour les grandes valeurs de débit de [110 à 170] l/s : les deux modèles ont presque le même rendement d'évacuation.

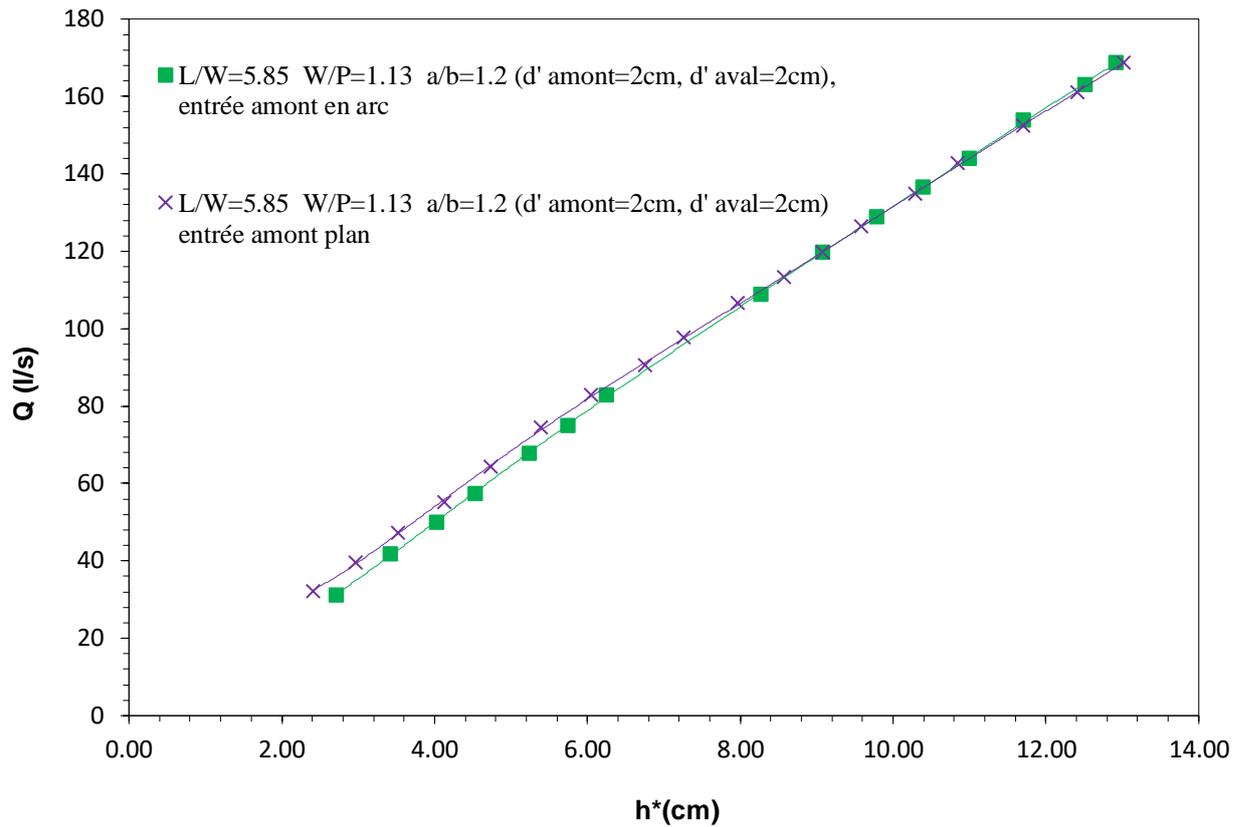


Figure V-50: Courbes du débit en fonction de la forme d'entrée en amont

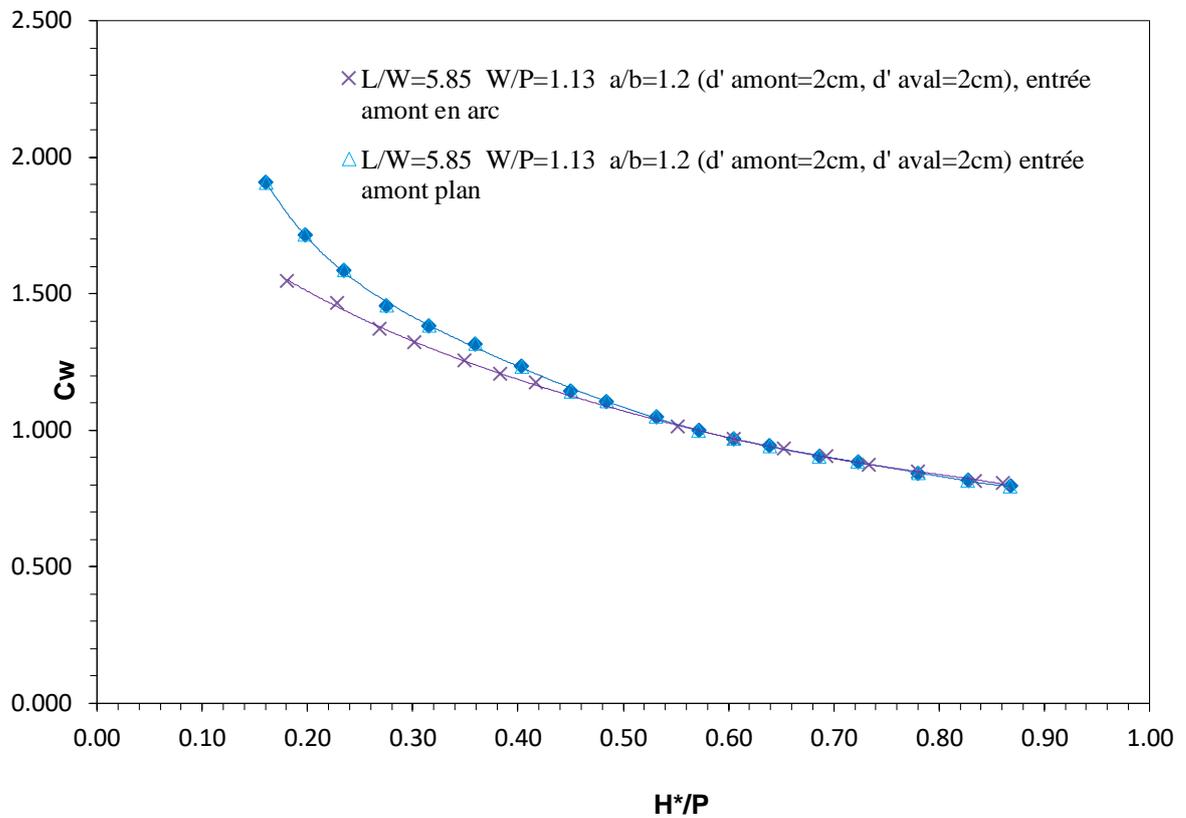


Figure V-51: Coefficients du débit en fonction de la forme d'entrée en amont

La (figure V-51) montre que la forme d'entrée en arc fait diminuer la capacité d'évacuation d'une manière significative devant la forme d'entrée plane. Cette diminution est de l'ordre de 10% pour ( $H^*/P < 0.3$ ) et d'environ 5% pour les moyennes charges ( $0.2 < H^*/P < 0.45$ ), tandis que pour les grandes charges ( $H^*/P > 0.6$ ) les courbes deviennent identiques.

Ce que signifie qu'il n'est pas recommandé de construire les déversoirs non rectilignes creusés avec une forme d'entrée en arc au niveau des porte-à-faux amont.

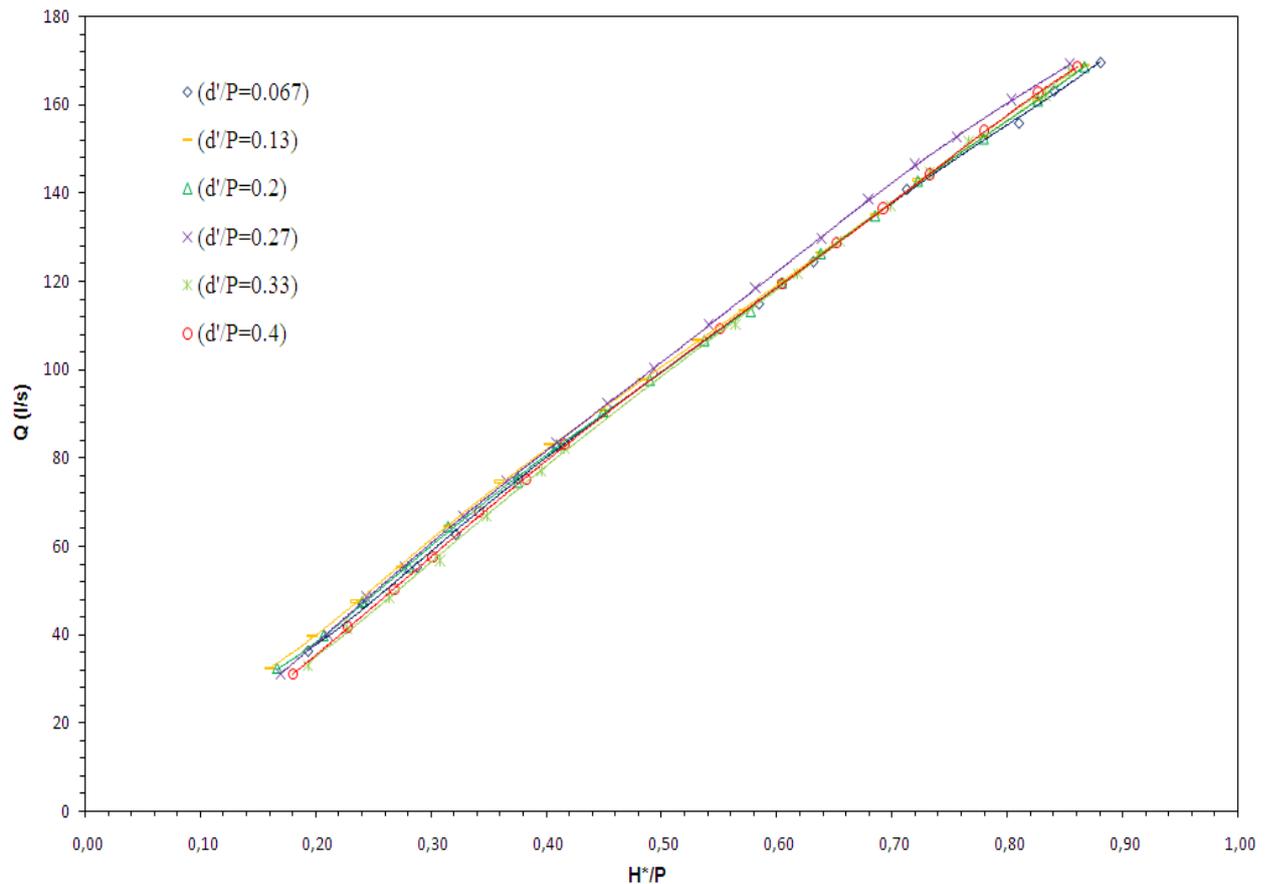
#### V-9-4 Comparaison expérimentale entre les déversoirs non rectilignes creusés

Pour vérifier l'impact du ratio ( $d'/P$ ) sur la capacité d'évacuation des déversoirs non rectilignes creusés, six (06) modèles de même paramètres géométriques et de différents ratios ( $d'/P$ ) ont été expérimentés, la hauteur maximale du déversoir ( $P$ ) est considérée fixe pour tous les modèles ( $P=15\text{cm}$ ).

- (Modèle D02) [ $d'$ amont =  $d'$ aval = 1 cm], ( $d'/P = 0.067$ )
- (Modèle D03) [ $d'$ amont =  $d'$ aval = 2 cm], ( $d'/P = 0.13$ )
- (Modèle D06) [ $d'$ amont =  $d'$ aval = 3 cm], ( $d'/P = 0.2$ )
- (Modèle D07) [ $d'$ amont =  $d'$ aval = 4 cm], ( $d'/P = 0.27$ )
- (Modèle D08) [ $d'$ amont =  $d'$ aval = 5 cm], ( $d'/P = 0.33$ )
- (Modèle D09) [ $d'$ amont =  $d'$ aval = 6 cm], ( $d'/P = 0.4$ )

La représentation graphique des courbes de débit en fonction de la charge relative  $Q = f(H^*/P)$  (Figure V-52) montre que :

- Pour les faibles charges relatives ( $H^*/P < 0.3$ ) toutes les courbes sont presque identiques, c'est-à-dire que l'effet du ratio ( $d'/P$ ) n'apparaît pas dans cette phase d'écoulement.
- Pour les moyennes et grandes charges relatives ( $H^*/P > 0.5$ ), on distingue presque deux courbes différentes avec un écart d'évacuation très remarquable entre elles. La courbe supérieure qui correspond au (modèle D07) ( $d'/P=0.27$ ) se caractérise par un grand taux d'évacuation d'environ 5% en comparaison avec les courbes qui représentent les modèles avec ratios ( $d'/P=0.067$ ), ( $d'/P=0.13$ ), ( $d'/P=0.2$ ), ( $d'/P=0.33$ ) et ( $d'/P=0.4$ ).



**Figure V-52: Courbes de débit en fonction du ratio ( $d'/P$ )**

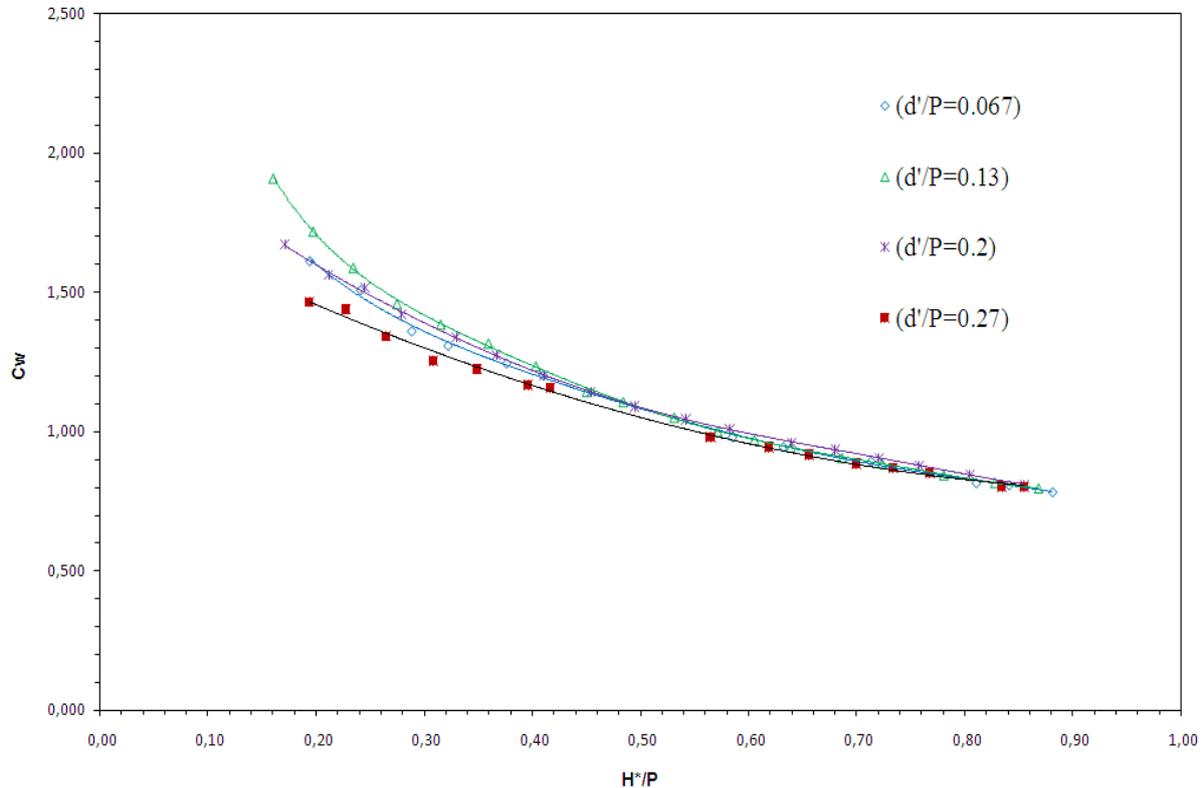
Afin de confirmer le résultat obtenu, qu'il montre que le (modèle D07) avec ( $d'/P=0.27$ ) se caractérise par un taux d'évacuation optimum devant les autres modèles, on va essayer d'étudier deux catégories des modèles séparément : les modèles avec ratio ( $d'/P \leq 0.27$ ), et les modèles avec ratio ( $d'/P \geq 0.27$ ), on trace les courbes des coefficients du débit en fonction de la charge relative  $C_w=f(H^*/P)$ .

#### ❖ Modèles avec ratio ( $d'/P \leq 0.27$ )

La représentation graphique  $C_w=f(H^*/P)$  de quatre (04) modèles avec ratios différents ( $d'/P \leq 0.27$ ) (Figure V-53), montre que:

- Pour les faibles charges relatives ( $H^*/P < 0.3$ ), le (modèle D03) ( $d'/P=0.13$ ) se caractérise par une capacité d'évacuation supérieure aux autres modèles D02 ( $d'/P= 0.067$ ) et D06 ( $d'/P= 0.2$ ), D07 ( $d'/P= 0.27$ ) avec un écart estimé à 2%.
- Pour les moyennes charges relatives ( $0.3 < h^*/P < 0.6$ ), les quatre modèles D02 ( $d'/P= 0.067$ ) et D03 ( $d'/P=0.13$ ), D06 ( $d'/P= 0.2$ ) et D07 ( $d'/P= 0.27$ ) ont une capacité d'évacuation identique.

- Pour les grandes charges relatives ( $H^*/P > 0.6$ ), le modèle D07 ( $d'/P=0.27$ ) se caractérise par une capacité d'évacuation supérieure aux modèles D02 ( $d'/P= 0.067$ ) et D03 ( $d'/P=0.13$ ) et D06 ( $d'/P= 0.2$ ) avec un écart de 3%.



**Figure V-53: Coefficient de débit en fonction des modèles avec ratio ( $d'/P \leq 0.27$ )**

#### ❖ Modèles avec ratio ( $d'/P \geq 0.27$ )

La (figure V-54) illustre une représentation graphique  $C_w=f(H^*/P)$  de trois modèles de ratio ( $d'/P \geq 0.27$ ). Cette représentation montre que:

- Pour les charges relatives ( $H^*/P < 0.3$ ), le modèle D07 ( $d'/P=0.27$ ) se caractérise par une capacité d'évacuation supérieure aux modèles D08 ( $d'/P= 0.33$ ) et D09 ( $d'/P= 0.4$ ), avec un écart de 7%.
- Aux moyennes et fortes charges relatives ( $H^*/P > 0.5$ ), le modèle D07 ( $d'/P=0.27$ ) continue avec son grande performance d'évacuation devant les deux modèles D08 ( $d'/P= 0.33$ ) et D09 ( $d'/P= 0.4$ ), avec un écart estimé à 3%.

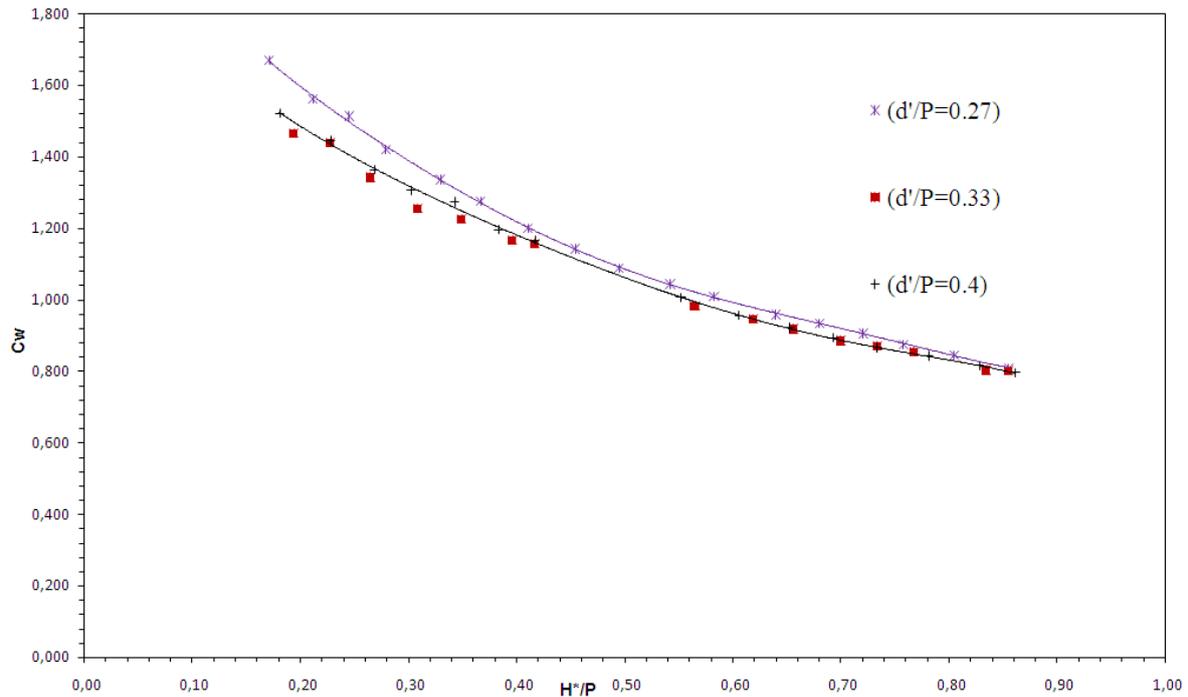


Figure V-54: Coefficient de débit en fonction des modèles avec ratio ( $d'/P \geq 0.27$ )

## INTERPRETATION DES RESULTATS

- La diminution de la pente fait augmenter la capacité d'évacuation d'une manière significative jusqu'à la pente qui correspond au ratio ( $d'/P = 0.27$ ). Au-delà de cette valeur la capacité d'évacuation du déversoir non rectiligne creusé sera diminué.
- Le meilleur ratio entre le creusement des alvéoles et la hauteur maximale du déversoir correspond à la valeur ( $d'/P = 0.27$ ).

## V-10 CONCLUSION

L'étude expérimentale effectuée au laboratoire Aménagements Hydrauliques et Environnement (LAHE) de l'université de Biskra sur 14 modèles réduits des déversoirs en mince paroi, déversoirs en labyrinthe développés et des déversoirs non rectilignes creusés, a été pour objectifs principaux:

- La comparaison entre les déversoirs non rectilignes creusés et les déversoirs en mince paroi de même largeur;
- La comparaison entre les déversoirs non rectilignes en labyrinthe développés et les déversoirs en mince paroi de même largeur;
- Etude expérimentale sur modèles réduits des déversoirs creusés.

### **L'étude de comparaison entre les déversoirs non rectilignes creusés et les déversoirs en mince paroi de même largeur a montré que:**

- La performance moyenne des déversoirs non rectilignes avec différents endroits de creusement des alvéoles par rapport au déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur est de l'ordre de 2.15 fois.
- Du point de vue hydraulique, le meilleur creusement des alvéoles est celui qui correspond d'un creusement symétrique des alvéoles ou creusement unique en amont. Tandis que le creusement unique en aval peu apporte à la capacité d'évacuation du déversoir non rectiligne creusé.
- Du point de vue stabilité de l'ouvrage, le creusement symétrique des alvéoles est bénéfique, il assure mieux la stabilité du déversoir creusé en comparaison avec les autres types de creusement (uniquement en amont ou uniquement en aval).
- L'augmentation de la pente de creusement des alvéoles fait augmenter la performance du déversoir non rectiligne creusé symétriquement jusqu'à le ratio ( $d'/P= 0.27$ ), mais à partir du ratio ( $d'/P= 0.33$ ) la performance se diminue d'une manière significative. Ce résultat signifie que la pente de creusement des alvéoles ne doit pas dépasser le (1/3).
- La diminution de la pente de creusement des alvéoles fait diminuer la performance du déversoir non rectiligne creusé symétriquement jusqu'à le ratio ( $d'/P= 0$ ).
- La performance des déversoirs non rectilignes creusés devant les déversoirs rectilignes en mince paroi de même largeur est variée de (2 à 2.15) fois.
- Le déversoir non rectiligne creusé peut être une solution pour faire évacuer des grands débits sous des faibles charges.

**L'étude de comparaison entre les déversoirs non rectilignes en labyrinthe développés et les déversoirs en mince paroi de même largeur a montré que :**

- La forme géométrique des alvéoles joue un rôle primordial dans l'augmentation / diminution de la capacité d'évacuation des déversoirs.
- La performance des déversoirs non rectilignes en labyrinthe développé devant les déversoirs rectilignes en mince paroi de même largeur est variée de (1.85 à 2) fois.
- La forme en plan rectangulaire du déversoir permet l'évacuation des grands débits, tandis que les formes en plans triangulaires et trapézoïdaux diminuent la capacité d'évacuation.
- La forme en plan trapézoïdale permet l'évacuation des grands débits en comparaison avec la forme en plan triangulaire.
- Le déversoir en labyrinthe développé rectangulaire peut être une solution pour faire évacuer des grands débits sous des faibles charges.

**L'étude expérimentale sur modèles réduits des déversoirs non rectilignes creusés a montré que :**

- Le déversoir non rectiligne creusé peut être placé sur les barrages poids ou inséré dans les canaux des barrages en terre. Les essais effectués dans ce sens ont montré que le déversoir non rectiligne creusé donne le même rendement pour les deux cas d'emplacement. Par conséquent, le déversoir non rectiligne creusé peut être une solution rentable pour les deux cas de barrage poids (en béton et en terre).
- L'étude de l'effet des corps flottants sur l'écoulement du déversoir non rectiligne creusé a montré que les corps flottants sont arrêtés sous les porte-à-faux du déversoir non rectiligne creusé pour les faibles et moyennes charges relatives mais par contre, l'écoulement est redevenu libre pour les fortes charges relatives.
- La forme d'entrée d'eau évacuée en amont du déversoir non rectiligne creusé signifie la forme géométrique à la partie supérieure des porte-à-faux amont du déversoir non rectiligne creusé, l'expérimentation sur deux formes d'entrée, le premier plan et le deuxième en arc a montré que la forme d'entrée en arc fait diminuer la capacité d'évacuation d'une manière significative devant la forme d'entrée plane. Cette diminution est de l'ordre de 10% pour ( $H^*/P < 0.2$ ) et d'environ 5% pour les moyennes charges ( $0.2 < H^*/P < 0.45$ ). Ce que signifie qu'il n'est pas recommandé de construire les déversoirs non rectilignes creusés avec une forme d'entrée en arc au niveau des porte-à-faux amont.

- La diminution de la pente fait augmenter la capacité d'évacuation d'une manière significative jusqu'à la pente qui correspond au rapport adimensionnel ( $d'/P = 0.27$ ). Au-delà de cette valeur la capacité d'évacuation du déversoir non rectiligne creusé sera diminuée.
- Le meilleur ratio entre le creusement des alvéoles et la hauteur maximale du déversoir correspond à la valeur ( $d'/P = 0.27$ ).

Une étude numérique et statistique est indispensable sur les déversoirs non rectilignes creusés afin d'obtenir une relation approximative du coefficient du débit en fonction des paramètres adimensionnels régissant l'écoulement sur ce type de déversoirs.

# **Chapitre VI :**

Analyse Numérique et

Statistique

---

## CHAPITRE VI

### ANALYSE NUMERIQUE ET STATISTIQUE

#### VI-1 INTRODUCTION

Généralement la solution des problèmes physiques complexes (notamment en sciences hydrauliques) nécessite de recourir au champ expérimental au biais des modèles réduits, ainsi par des essais empiriques et semi-empiriques. Dans ce sens la validation des résultats expérimentaux est indispensable par l'analyse numérique.

L'analyse numérique est une discipline des mathématiques. Elle s'intéresse tant aux fondements théoriques qu'à la mise en pratique des méthodes permettant de résoudre, par des calculs purement numériques, des problèmes d'analyse mathématique et d'autres problèmes liés survenant dans les sciences physiques et l'ingénierie (**FERROUN., 2016**)

L'analyse numérique s'effectue par plusieurs méthodes statistiques telles que l'interpolation, extrapolation et la régression.

À cet effet, la présente étude tente de vérifier et valider les résultats de l'analyse dimensionnelle (chapitre IV) et les résultats expérimentaux obtenus sur modèles réduits des déversoirs non rectilignes creusés (chapitre V) par une analyse numérique et statistique afin d'obtenir une relation approximative du coefficient du débit en fonction des paramètres adimensionnels régissant l'écoulement sur les déversoirs non rectilignes creusés.

#### VI-2 CHOIX DES OUTILS DE L'ANALYSE NUMERIQUE

Après une recherche approfondie sur le meilleur outil adéquat à l'analyse numérique appliquée sur les déversoirs non rectilignes creusés, il est apparu qu'il est nécessaire de recourir à la régression multiple des résultats obtenus expérimentalement par le logiciel mathématique MINITAB 17.

##### VI-2-1 Définition de la régression multiple

La régression multiple est un outil de la statistique qui a pour but d'expliquer la variabilité existante dans une variable aléatoire (Y) lorsque le comportement de cette variable est conditionné par les valeurs certaines que peuvent prendre d'autres variables, contrôlées ou non par l'expérimentateur (**HAMISULTANE., 2002**).

D'une autre façon, la régression multiple génère une équation pour décrire la relation statistique entre un ou plusieurs prédicteurs et la variable de réponse, ainsi que pour prévoir de nouvelles observations. En règle générale, la régression utilise la méthode des moindres carrés ordinaire, qui trouve l'équation en réduisant la somme des valeurs résiduelles carrées.

La forme générale du modèle de régression linéaire multiple est comme suit :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p \quad (\text{VI-01})$$

Dont :

- Y :** variable dépendante ou expliquée à caractère aléatoire;
- X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>,... X<sub>p</sub> :** variables indépendantes ou explicatives mesurées sans erreur ou fixées à des niveaux arbitraires (non aléatoire);
- $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$  :** sont les paramètres du modèle (nous les estimons à l'aide d'un échantillon et la méthode d'estimation sera de nouveau la méthode des moindres carrés);

### VI-2-2 La méthode des moindres carrés ordinaire (MCO)

La méthode des moindres carrés ordinaire (MCO) est le nom technique de la régression mathématique en statistiques, et plus particulièrement de la régression linéaire multiple.

Il s'agit d'ajuster un nuage de points  $\{Y_i, X_i\}_{i=1, \dots, n}$  selon une relation linéaire, prenant la forme de la relation matricielle  $Y = X\beta + \epsilon$ , où  $\epsilon$  est un terme d'erreur.

La méthode des moindres carrés consiste à minimiser la somme des carrés des écarts, écarts pondérés dans le cas multidimensionnel, entre chaque point du nuage de régression et son projeté, parallèlement à l'axe des ordonnées, sur la droite de régression.

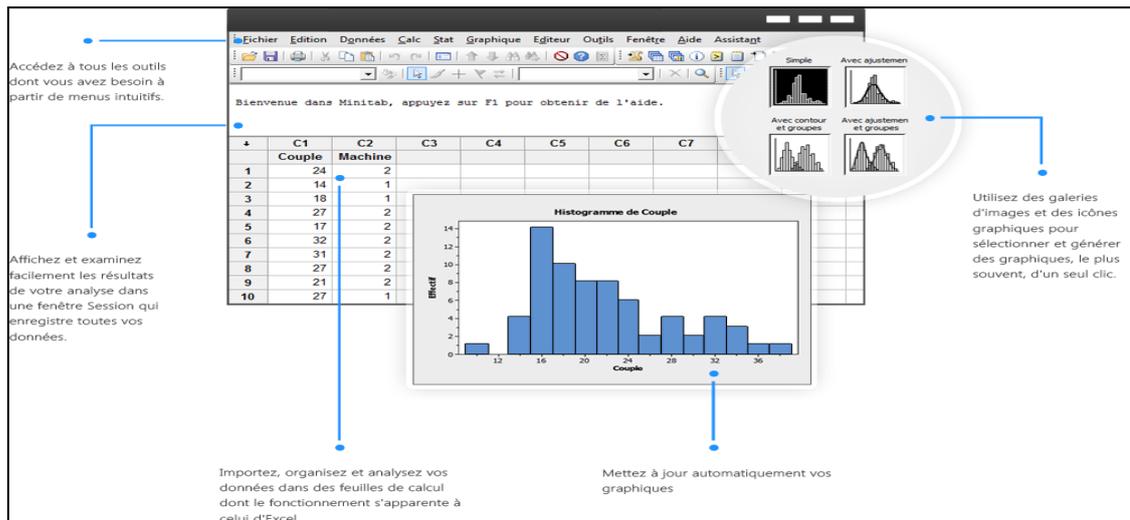
Lorsque la matrice  $X$  se décompose en  $[1; X_1]$ , on parle de régression linéaire uni-variée (régression linéaire). Lorsqu'il y a plusieurs régresseurs dans la matrice  $X$ , on a plutôt affaire à une régression linéaire multiple (**HURLIN - 1998**).

### VI-2-3 Présentation de MINITAB 17

MINITAB 17 est un logiciel (Français) propriétaire commercial de statistiques. Il est développé par la société MINITAB. Il est largement utilisé par les universités pour enseigner les statistiques, et les développeurs le dirigent particulièrement aux entreprises en affichant leur intention de les rendre plus performantes selon la méthode « Six Sigma ».

Il offre un éventail d'outils qui permettent de mener à bien les projets d'amélioration de la qualité les plus exigeants. Il contient cinq didacticiels à utiliser de manière consécutive :

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



**Figure VI-01 : L'interface de MINITAB 17**

#### VI-2-4 Différents type de régression par MINITAB 17:

MINITAB 17 fournit plusieurs procédures de régression tels que :

- Les procédures de régression par les moindres carrés et les moindres carrés partiels
- Les procédures de régression logistique
- Les procédures de régression non linéaire
- Les procédures de régression orthogonale
- Les procédures de régression pas à pas
- Les procédures de régression polynomiale
- Les procédures de régression pondérée

#### VI-2-5 La régression multiple par MINITAB 17

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

- Le signe de chaque coefficient indique la direction de la relation.
- Les coefficients représentent l'évolution moyenne de la réponse pour un changement d'unité dans le prédicteur, sans modification des autres prédicteurs du modèle.
- La valeur de (p) de chaque coefficient teste l'hypothèse nulle que le coefficient est égal à zéro (aucun effet). Par conséquent, si les valeurs de (p) sont petites, cela peut souligner le caractère significatif de l'ajout du prédicteur au modèle.
- L'équation prévoit de nouvelles observations, en fonction de valeurs de prédicteur spécifiques.

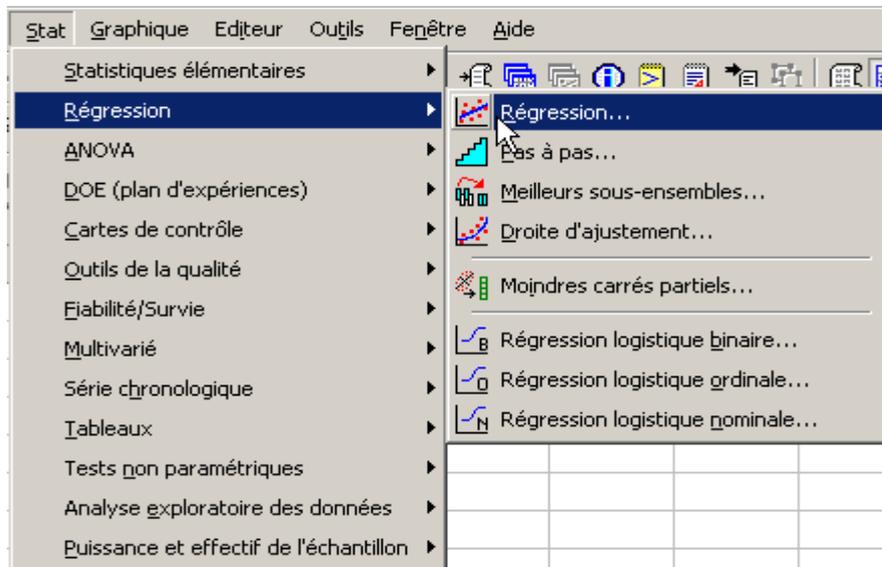


Figure VI-02 : Menu de Régression – MINITAB 17

### VI-2-6 Conditions d'application de la régression multiple par MINITAB 17

La réussite du modèle de régression multiple par MINITAB 17 est conditionnée par :

- Utilisée chaque fois qu'une variable observée, dite variable dépendante, doit être exprimée en fonction de 2 ou plusieurs autres variables observées, dites indépendantes ou mieux explicatives.
- Le cas le plus simple est celui où les variables explicatives sont des variables non aléatoires, leurs valeurs étant toutes choisies a priori de façon arbitraire.
- D'autre part les p variables explicatives peuvent être des variables aléatoires dont les valeurs sont observées dans des conditions analogues à celle de la variable dépendante.

### VI-3 ANALYSE NUMERIQUE APPLIQUEE SUR LES DEVERSOIRS NON RECTILIGNES CREUSES

La relation obtenue par l'analyse dimensionnelle (chapitre IV) a montré que le coefficient de débit du déversoir non rectiligne creusé est en fonction de :

$$C_w = f(H^*/P, L/W, W/P, a/b, d'/P)$$

- La charge relative ( $H^*/P$ ) ;
- Le ratio ( $L/W$ ) ;
- Le rapport de l'aspect vertical ( $W/P$ );
- La largeur relative des alvéoles ( $a/b$ ) ;
- Le rapport entre le creusement des alvéoles et la hauteur du déversoir ( $d'/P$ ).

Les résultats expérimentaux obtenus sur modèles réduits du déversoir non rectiligne creusé (chapitre V) sont classifiés sous forme de 06 séries :

Série 01 : modèle D02 ( $d'/P=0.067$ )

Série 02 : modèle D03 ( $d'/P=0.13$ )

Série 03 : modèle D06 ( $d'/P=0.2$ )

Série 04 : modèle D07 ( $d'/P=0.27$ )

Série 05 : modèle D08 ( $d'/P=0.33$ )

Série 06 : modèle D09 ( $d'/P=0.4$ )

### VI-3-1 Introduction des données :

Nous avons effectué l'introduction de toutes les valeurs des paramètres adimensionnels ( $H^*/P$ ,  $L/W$ ,  $W/P$ ,  $a/b$ ,  $d'/P$ ) et toutes les valeurs expérimentales obtenues de  $C_w$ .

	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13-T	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	
	Hm	V2/2g	H*	H*/P	Cw	Cdrect	Qrect	q*	CWB,49	Q créager	H créager	modèle	L/W	W/P	a/b	d'P						
1	2.43	0.0189	2.41	0.16	1.907	0.448	7.44	4.34	2.99	8.29	6.96	A02	5.85	1.129	1.190	0.130						
2	2.95	0.0155	2.97	0.20	1.716	0.438	10.87	3.33	3.50	11.31	6.04	A02	5.85	1.129	1.190	0.130						
3	3.58	0.0289	3.52	0.23	1.588	0.435	12.89	3.85	3.24	14.63	7.71	A02	5.85	1.129	1.190	0.130						
4	4.19	0.0266	4.13	0.20	1.656	0.434	15.44	3.35	2.97	18.54	8.53	A02	5.85	1.129	1.190	0.130						
5	4.79	0.0340	4.73	0.32	1.383	0.434	20.21	3.19	2.82	22.88	9.45	A02	5.85	1.129	1.190	0.130						
6	5.35	0.0426	5.39	0.36	1.316	0.435	24.60	3.92	2.66	27.32	16.41	A02	5.85	1.129	1.190	0.130						
7	6.00	0.0497	6.05	0.40	1.233	0.438	29.30	2.83	2.52	32.94	11.19	A02	5.85	1.129	1.190	0.130						
8	6.79	0.0555	6.76	0.45	1.142	0.437	34.89	2.81	2.33	38.87	11.87	A02	5.85	1.129	1.190	0.130						
9	7.59	0.0617	7.36	0.48	1.055	0.438	39.74	2.32	2.25	43.39	12.49	A02	5.85	1.129	1.190	0.130						
10	7.99	0.0691	7.97	0.53	1.049	0.440	44.71	2.39	2.14	49.88	13.24	A02	5.85	1.129	1.190	0.130						
11	8.59	0.0740	8.57	0.57	0.998	0.441	50.87	2.36	2.04	55.58	13.78	A02	5.85	1.129	1.190	0.130						
12	9.00	0.0793	9.05	0.61	0.909	0.443	54.72	2.19	1.90	63.57	14.30	A02	5.85	1.129	1.190	0.130						
13	9.59	0.0847	9.58	0.64	0.942	0.444	59.54	2.12	1.92	65.88	14.82	A02	5.85	1.129	1.190	0.130						

Figure VI-03 : Introduction des données

### VI-3-2 Application de la régression multiple :

Nous avons effectué la régression multiple par le suivi des étapes suivantes :

- Choisir une analyse de régression multiple (figure VI-04)
- Introduction du variable de réponse  $C_w$  (figure VI-05)
- Introduction des variables prédicateurs ( $H^*/P$ ,  $L/W$ ,  $W/P$ ,  $a/b$ ,  $d'/P$ ) (figure VI-05)

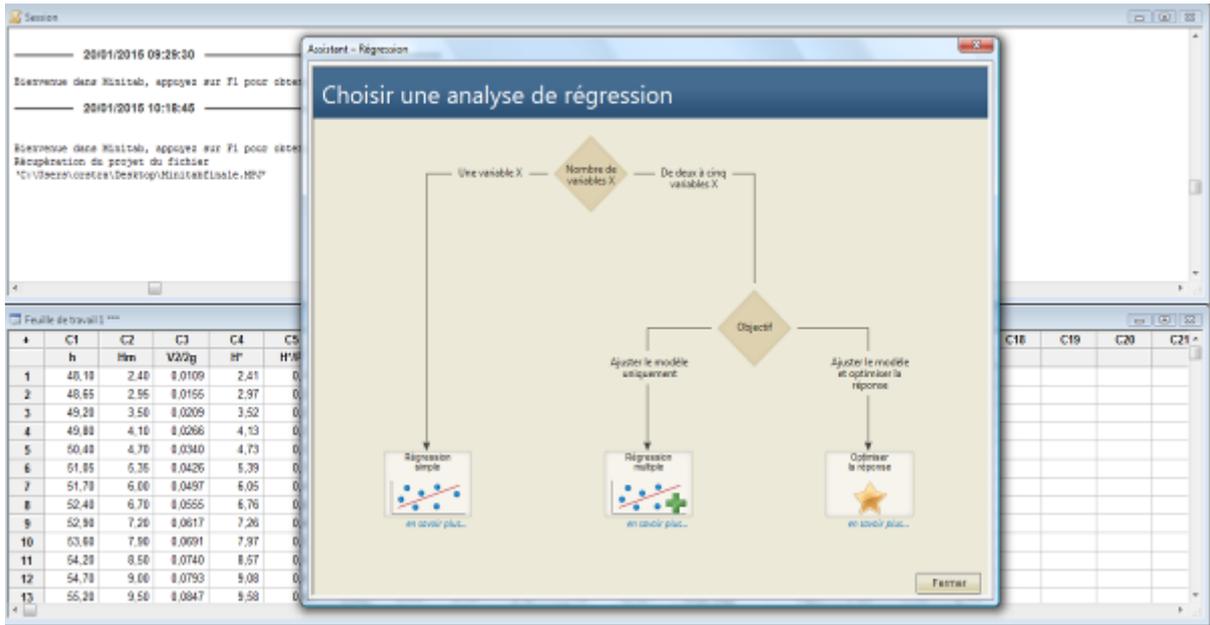


Figure VI-04: Application de l'analyse par régression multiple

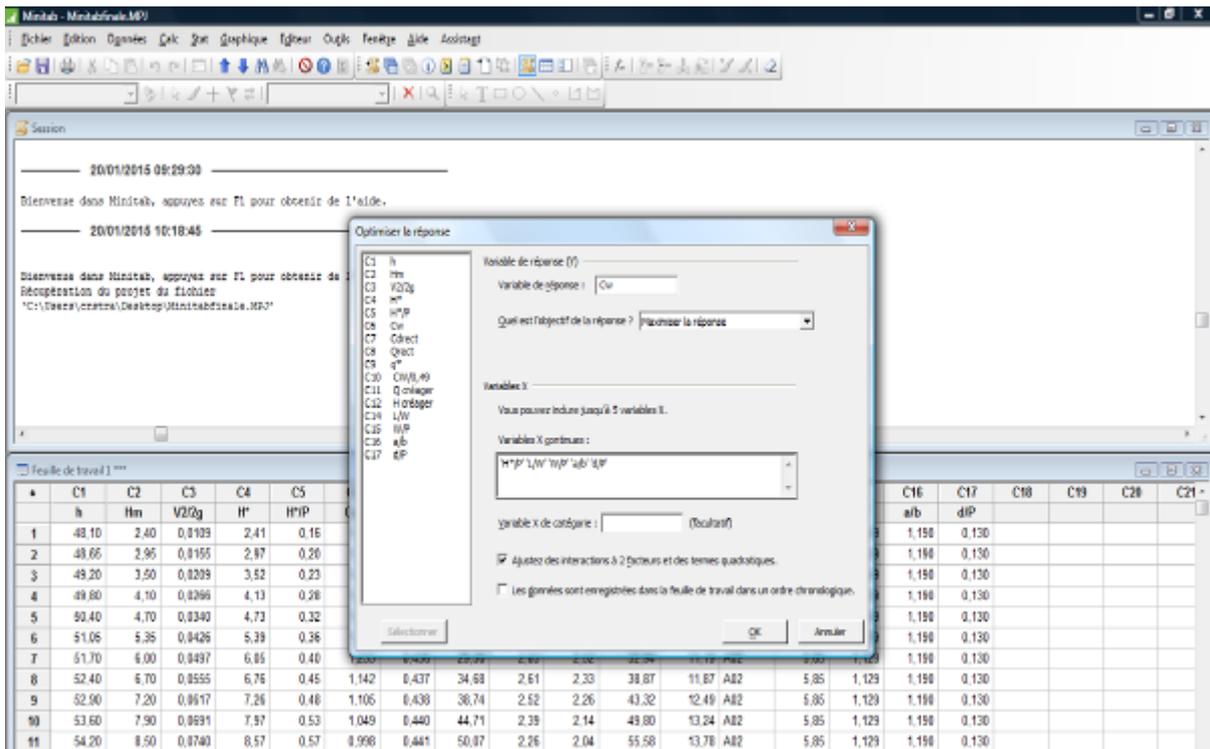
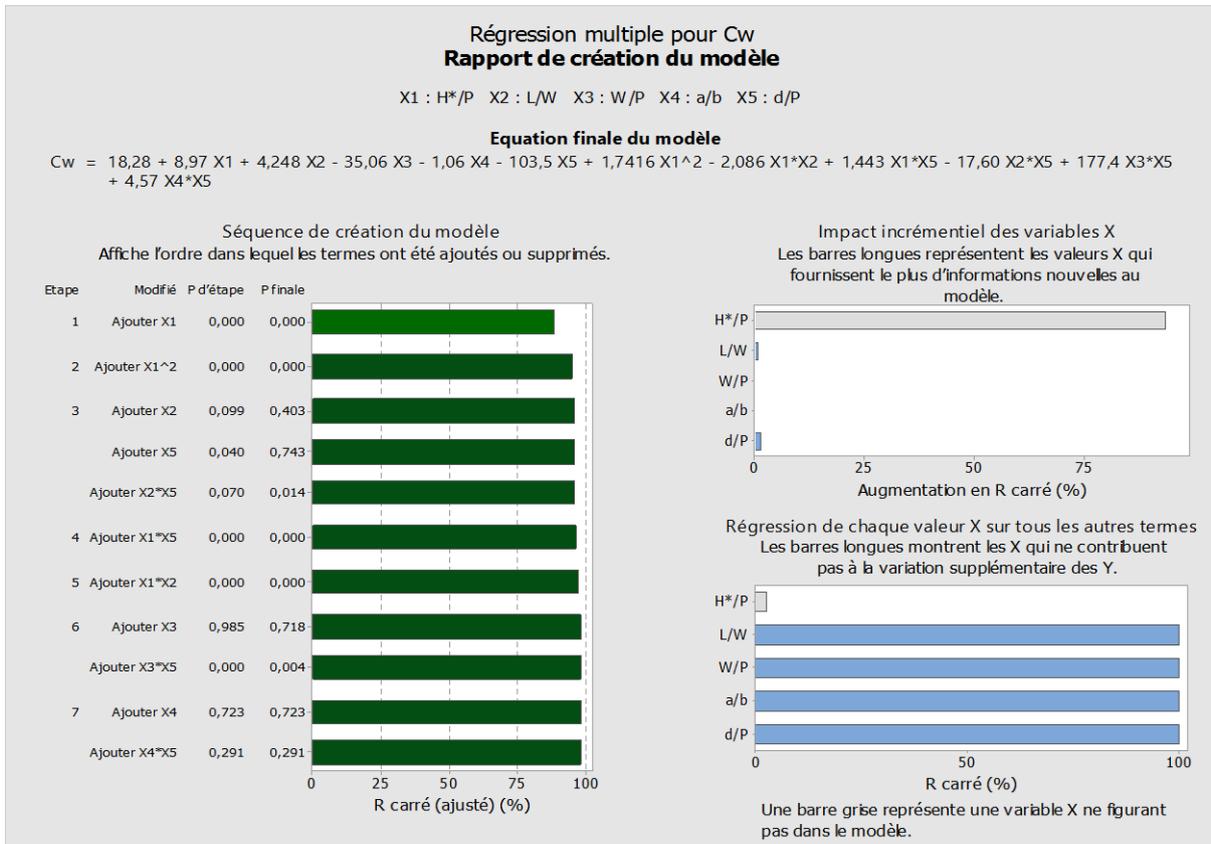


Figure VI-05: Introduction du variable de réponse et les variables prédicteurs

**VI-3-3 Résultats numériques :**

Après l'introduction de toutes les données, la figure suivante a été obtenue :



**Figure VI-06: Rapport de création du modèle (déversoir non rectiligne creusé)**

La figure (VI-06) présente le rapport de création du modèle de régression multiple du déversoir non rectiligne creusé, elle montre les résultats suivants :

- La forte corrélation entre les paramètres adimensionnels (L/W, W/P, a/b, d'/P)
- L'effet important de la charge relative (H\*/P) sur les informations du modèle
- L'effet important des paramètres adimensionnels sur le coefficient du débit (Cw)
- Une équation de 2<sup>ème</sup> degré du coefficient du débit en fonction de cinq paramètres
- Un grand coefficient de corrélation R<sup>2</sup> de l'ordre de 98.06 %

Donc, il ressort que :

Seuls les paramètres adimensionnels (H\*/P, L/W, W/P, a/b, d'/P) régissent fortement et directement d'une manière significative sur la performance du déversoir non rectiligne creusé par l'équation approchée et simplifiée suivante :

$$C_{w (th)} = 18.28 + (H^*/P) * [8.97 + 1.7416(h^*/P) - 2.086(L/W) + 1.443(d'/P)] + (d'/P) *$$

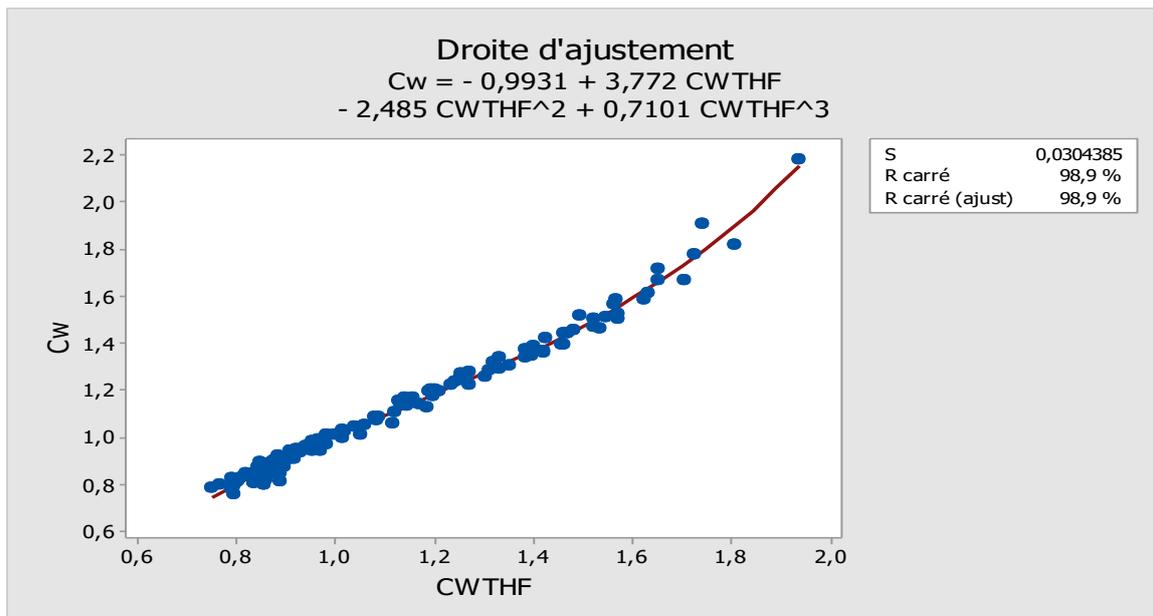
$$[177.4(W/P) + 4.57(a/b) - 103.5 - 17.60(L/W)] + 4.248(L/W) - 35.06(W/P) - 1.06(a/b) \quad (VI-02)$$

Avec  $R^2 = 98.06 \%$

$C_{w(th)}$ : coefficient du débit théorique

- Afin de vérifier la certitude de l'équation (VI-02) du coefficient du débit théorique
- Afin de déterminer une relation qui permet d'avoir des valeurs du coefficient de débit très proche de ceux obtenus expérimentalement.

Un ajustement de  $C_w$  théorique avec  $C_w$  expérimentale a été effectué par MINITAB 17



**Figure VI-07: Rapport de l'ajustement de  $C_{w(th)}$  avec  $C_{w(exp)}$  du déversoir non rectiligne creusé**

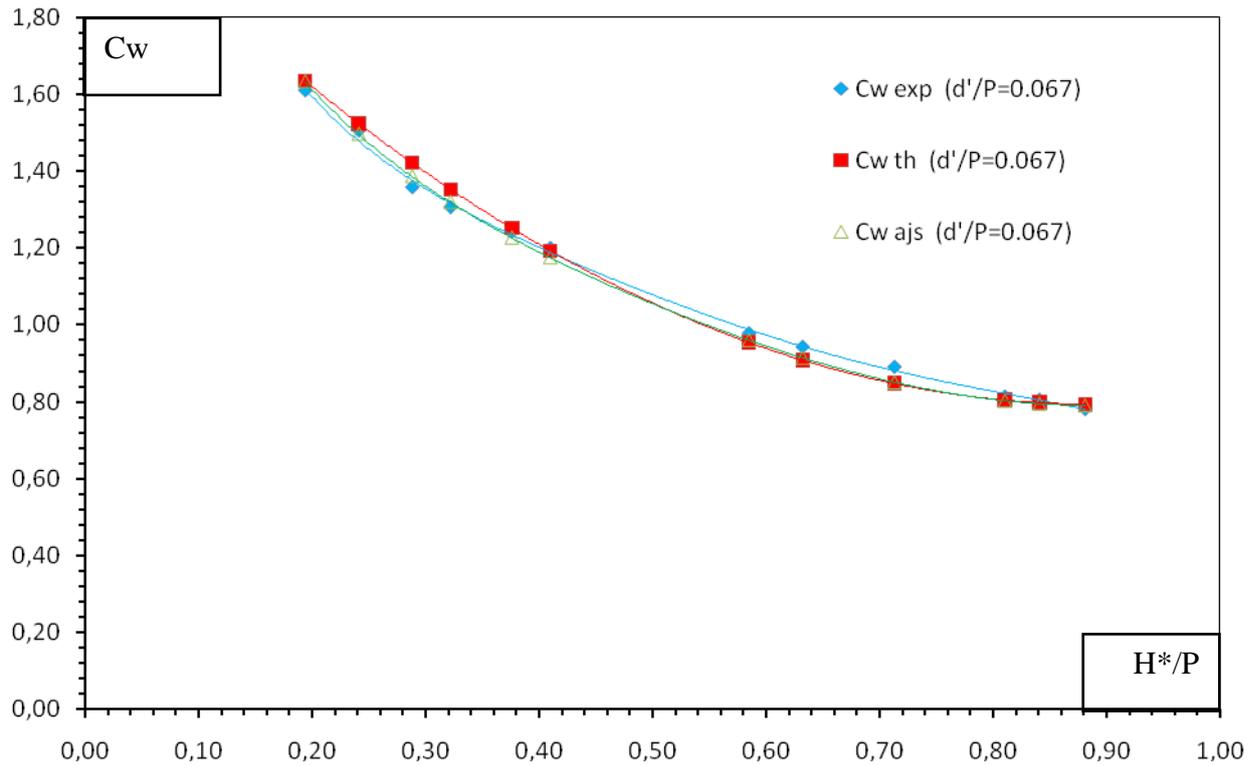
La figure (VI-07) montre une grande corrélation entre le coefficient du débit théorique et le coefficient du débit expérimental de l'ordre de 98.9%.

L'équation de régression suivante a été obtenue:

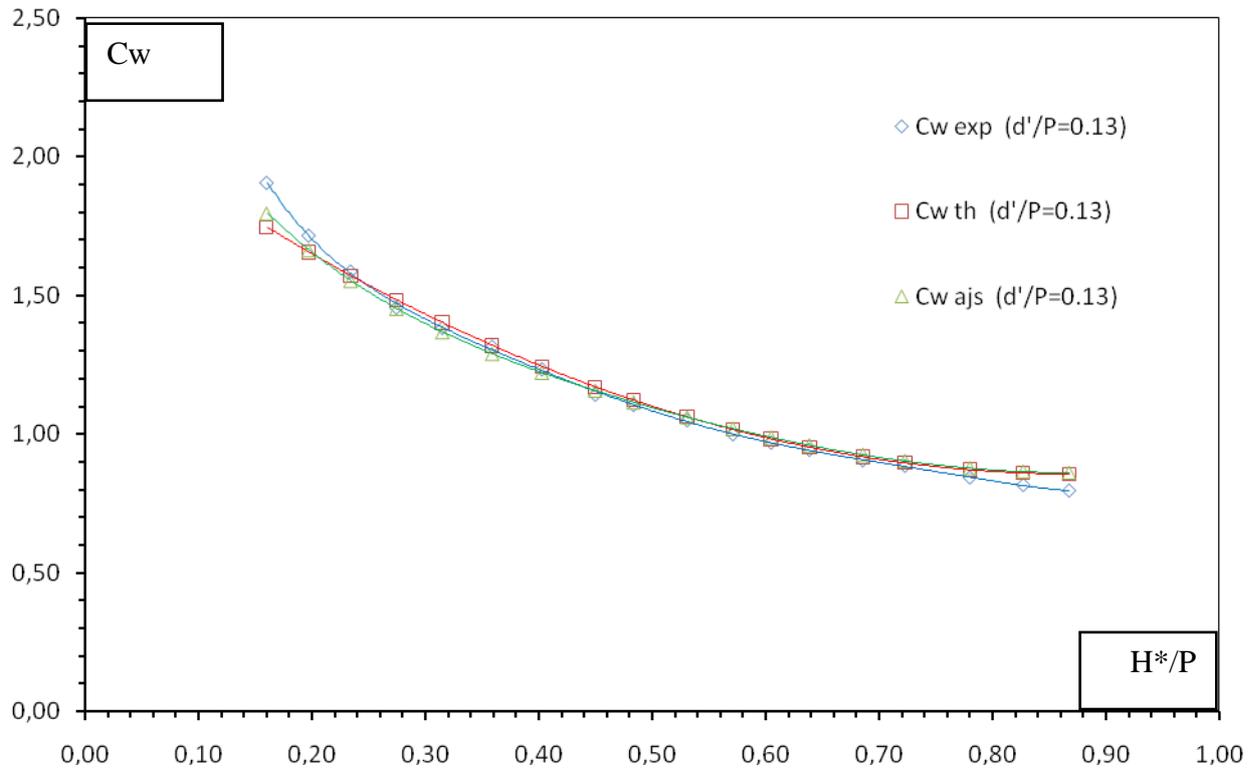
$$C_{wajusst} = -0.9931 + 3.772 C_{w(th)} - 2.485 (C_{w(th)})^2 + 0.7101 (C_{w(th)})^3 \quad (VI-03)$$

Avec  $R^2 = 98.9 \%$  et  $C_{w(th)}$  correspondant à la relation (VI-02).

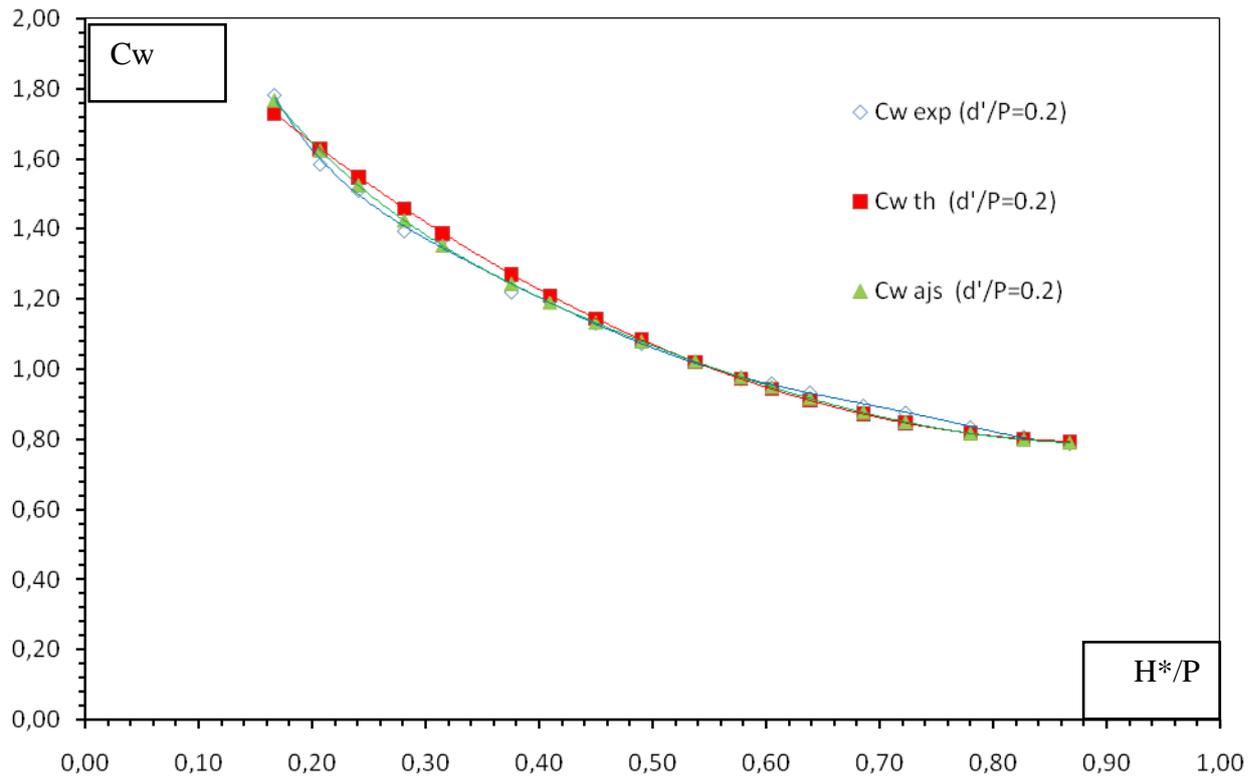
Les relations (VI-02) et (VI-03) peuvent être présentées et comparés avec les résultats expérimentaux obtenus (chapitre V) de la manière cités ci-dessous:



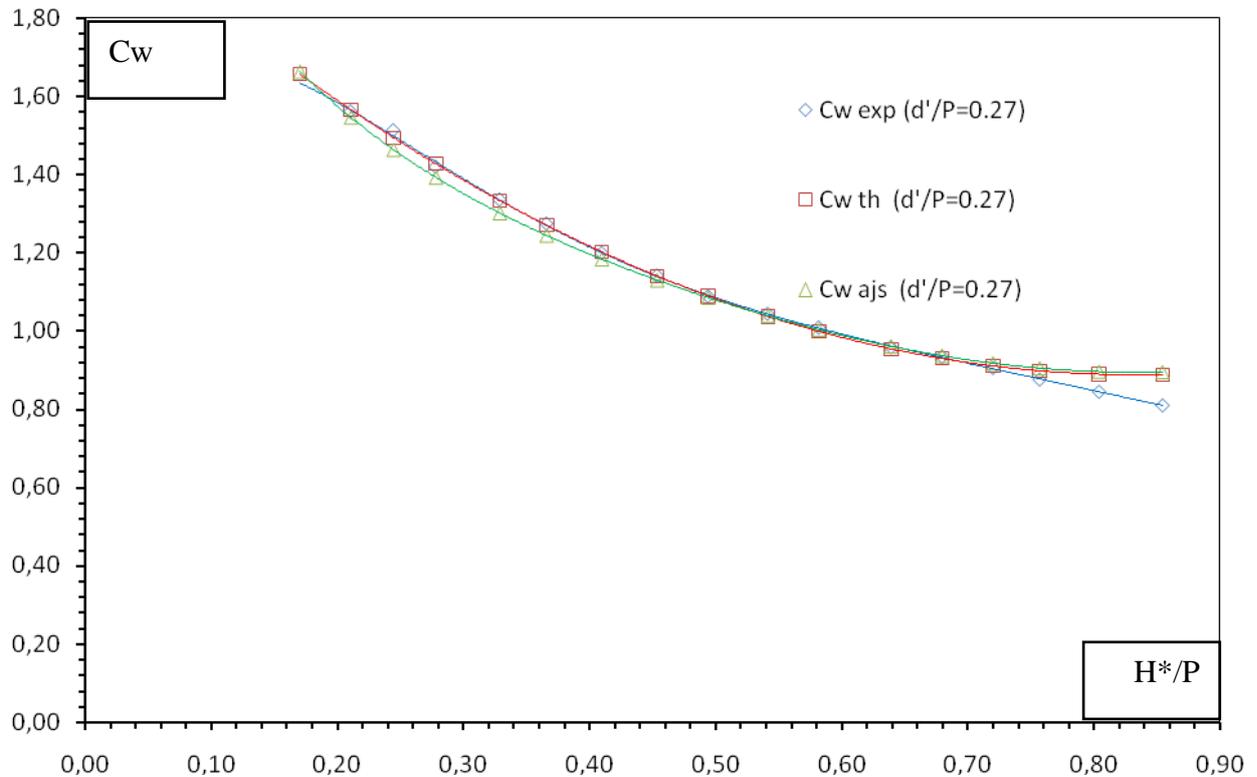
**Figure VI-08: Courbes de  $C_w$ , expérimentales, théoriques et ajustés en fonction de  $(H^*/P)$  (modèle D02)**



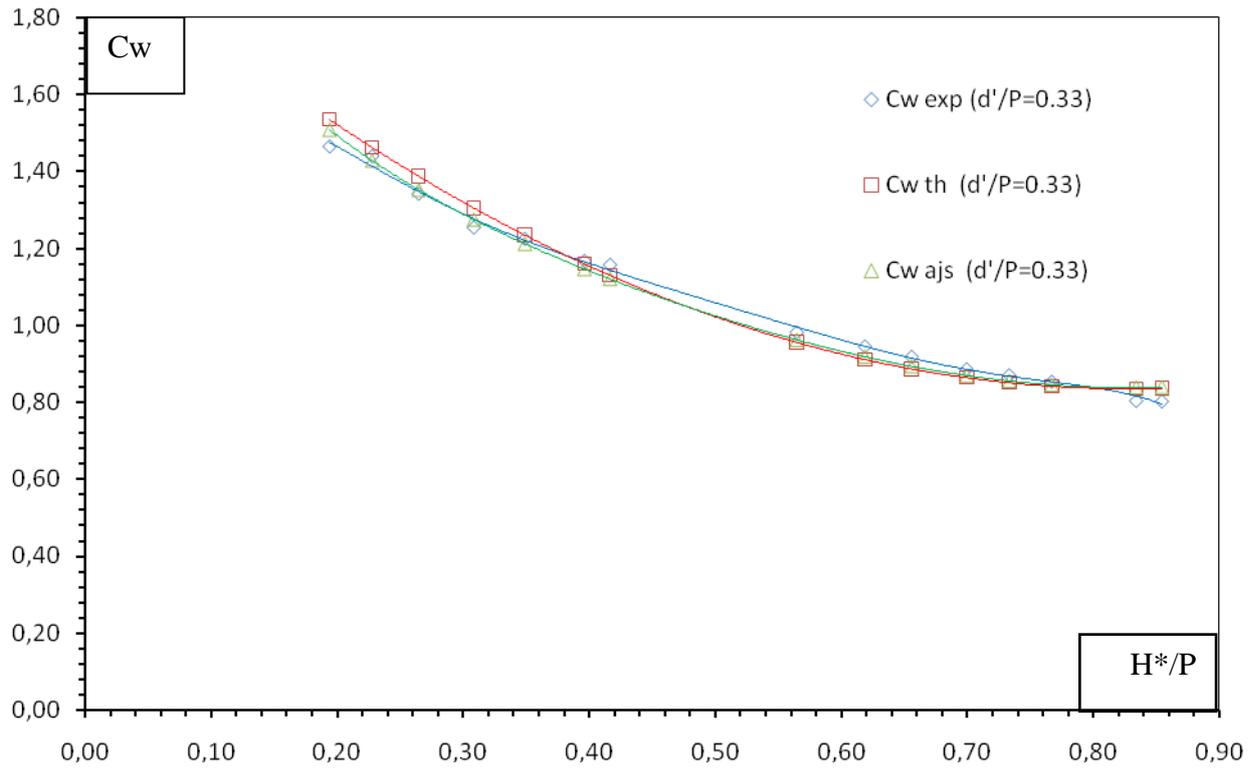
**Figure VI-09: Courbes de  $C_w$ , expérimentales, théoriques et ajustés en fonction de  $(H^*/P)$  (modèle D03)**



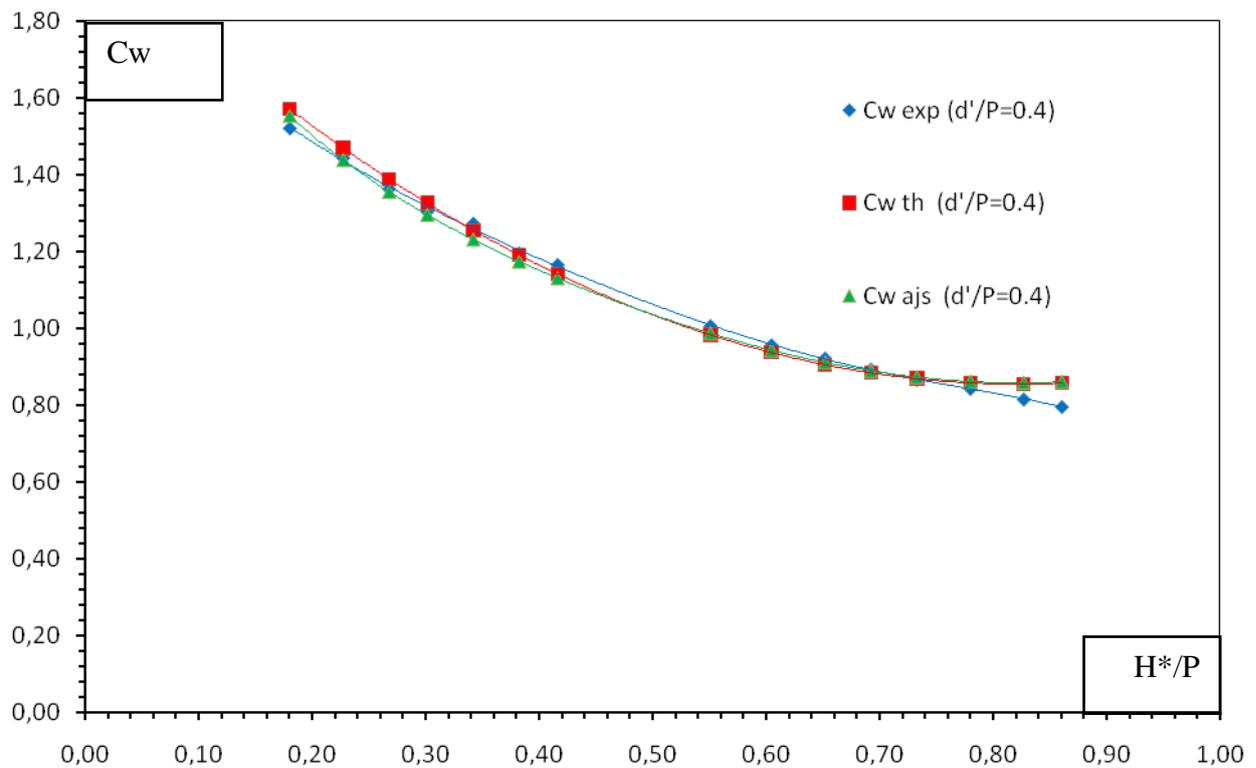
**Figure VI-10: Courbes de  $C_w$ , expérimentales, théoriques et ajustés en fonction de  $(H^*/P)$  (modèle D06)**



**Figure VI-11: Courbes de  $C_w$ , expérimentales, théoriques et ajustés en fonction de  $(H^*/P)$  (modèle D07)**



**Figure VI-12: Courbes de  $C_w$ , expérimentales, théoriques et ajustés en fonction de  $(H^*/P)$  (modèle D08)**



**Figure VI-13: Courbes de  $C_w$ , expérimentales, théoriques et ajustés en fonction de  $(H^*/P)$  (modèle D09)**

<b>Modèle</b>	<b>Erreur max Cw théorique (%)</b>	<b>Erreur moyenne Cw théorique (%)</b>	<b>Erreur max Cw ajusté (%)</b>	<b>Erreur moyenne Cw ajusté (%)</b>
<b>D02</b>	8.53%	1.10%	5.92%	0.85%
<b>D03</b>	4.96%	0.091%	4.57%	0.88%
<b>D06</b>	3.33%	0.23%	2.93%	0.15%
<b>D07</b>	1.28%	1.03%	3.29%	0.53%
<b>D08</b>	3.44%	0.37%	3.09%	0.19%
<b>D09</b>	2.43%	0.73%	3.33%	0.21%
<b>Récapitule</b>	<b>8.53%</b>	<b>0.59%</b>	<b>5.92%</b>	<b>0.46%</b>

**Tableau VI-01: Erreurs relatives maximales et moyennes entre Cw exp – Cw th – Cw ajus  
déversoir non rectiligne creusé**

D'après la comparaison des courbes des coefficients de débit expérimentales, théoriques et ajustés des figures précédentes (VI-08), (VI-09), (VI-10), (VI-11), (VI-12), (VI-13), il est apparu que l'écart est très faible entre toutes les courbes soit expérimentales, théoriques ou ajustés, ainsi que les courbes sont presque semblables et superposées.

Le tableau (VI-01) des erreurs relatives maximales et moyennes entre les coefficients de débit expérimentales, théoriques et ajustés des modèles du déversoir non rectiligne creusé nous montre que :

- L'erreur maximale relative du coefficient du débit théorique de tous les modèles ne dépasse pas 8.53%
- L'erreur maximale relative du coefficient du débit ajusté de tous les modèles ne dépasse pas 5.92%
- L'erreur moyenne relative du coefficient du débit théorique de tous les modèles est de l'ordre de la valeur 0.59%

- L'erreur moyenne relative du coefficient du débit ajusté de tous les modèles est de l'ordre de la valeur 0.46%

D'après ces résultats, les erreurs maximales et moyennes sont très faibles, qu'ils justifient la validité des équations du coefficient du débit théorique et ajustés obtenus par l'analyse numérique (VI-02) et (VI-03). À cet effet les équations (VI-02) et (VI-03) sont adéquates et valables pour expliquer les coefficients du débit expérimentaux des déversoirs non rectilignes creusés.

La relation obtenue par le traitement des données issues de l'expérimentation permet de déterminer avec une précision suffisante le coefficient de débit. Cette relation contient tous les paramètres adimensionnels qui régissent l'écoulement sur le déversoir non rectiligne creusé. Par conséquent le débit qui transite par ce type de déversoir peut-être déterminé par la relation suivante :

$$Q = C_{wajust} W \sqrt{2gh}^{*3/2} \quad (VI-04)$$

$$Q = -0.9931 + 3.772 C_{w(th)} - 2,485 (C_{w(th)})^2 + 0.7101 (C_{w(th)})^3 W \sqrt{2gh}^{*3/2} \quad (VI-05)$$

Où :

Q : Débit évacué par le déversoir non rectiligne creusé (m<sup>3</sup>/s)

C<sub>wajut</sub> : Coefficient de débit ajusté

C<sub>w(th)</sub> : coefficient du débit théorique

H\* : Charge totale sur le seuil (mce)

W : Largeur du déversoir non rectiligne creusé (m)

#### VI-4 CONCLUSION

L'analyse numérique et statistique appliquée sur les résultats expérimentaux obtenus par les modèles réduits dans le chapitre (V) du déversoir non rectiligne creusé par l'outil informatique MINITAB 17 et l'application mathématique de la régression multiple, nous fournit les récapitulations suivantes:

- Il ressort que les résultats numériques précédents valides et confirment les résultats expérimentaux obtenus par les modèles réduits (chapitre V) en raison de la forte superposition des courbes expérimentales, théoriques de chaque modèle testé, ainsi en raison que les écarts relatifs calculés maximaux et moyens de toutes les courbes expérimentales, théoriques, ajustés sont très faibles;

- Il ressort que les résultats numériques précédents affirment les résultats de l'analyse dimensionnelle (chapitre IV). À cet effet, seuls les paramètres adimensionnels ( $H^*/P$ ,  $L/W$ ,  $W/P$ ,  $a/b$ ,  $d'/P$ ) régissent fortement et directement d'une manière significative sur la performance du déversoir non rectiligne creusé.
- Le coefficient du débit du déversoir non rectiligne creusé peut être présenté par l'une des équations approchées et simplifiées suivantes :

$$C_{w(th)} = 18.28 + (H^*/P) * [8.97 + 1.7416(h^*/P) - 2.086(L/W) + 1.443(d'/P)] + (d'/P) * [177.4(W/P) + 4.57(a/b) - 103.5 - 17.60(L/W)] + 4.248(L/W) - 35.06(W/P) - 1.06(a/b)$$

Avec  $R^2 = 98.06\%$

Ou bien :

$$C_{wajust} = -0.9931 + 3.772 C_{w(th)} - 2,485 (C_{w(th)})^2 + 0.7101 (C_{w(th)})^3$$

Avec  $R^2 = 98.9\%$

- Le débit qui transite par le déversoir non rectiligne creusé peut être déterminé par la relation suivante :

$$Q = -0.9931 + 3.772 C_{w(th)} - 2,485 (C_{w(th)})^2 + 0.7101 (C_{w(th)})^3 W \sqrt{2gh}^{*3/2}$$

### **Remarque importante :**

Les équations du coefficient du débit théorique et ajusté du déversoir non rectiligne creusé obtenu précédemment sont valables uniquement dans le cas où le déversoir non rectiligne creusé se caractérise par les paramètres adimensionnels suivants :

- La valeur de  $(L/W)$  est comprise entre : 5.76 et 6
- La valeur de  $(W/P)$  est comprise entre : 1.11 et 1.14
- La valeur de  $(a/b)$  est comprise entre : 1.187 et 1.2
- La valeur de  $(d'/P)$  est comprise entre 0.067 et 0.4

**Conclusion Générale**

**&**

**Perspective**

## CONCLUSION GENERALE & PERSPECTIVE

La plupart des accidents des barrages sont dus à l'insuffisance de la capacité d'évacuation de l'évacuateur de crues (déversoir) (DEGOUTTE, 1993). Dizaines des travaux sont effectués sur les déversoirs rectilignes notamment les déversoirs en mince paroi. Par contre les déversoirs non rectilignes restent en stade de développement expérimental et numérique tel que les déversoirs non rectilignes en labyrinthes développés.

Lorsque le seuil d'un déversoir est en alignement rectiligne, ce type de déversoir est appelé déversoir rectiligne, tandis que le déversoir non rectiligne se caractérise par son alignement non rectiligne (BARCOUDA et al., 2006).

Les déversoirs non rectilignes creusés sont à l'origine des déversoirs non rectilignes en labyrinthe développés, mais ils sont caractérisés par un creusement vertical de ses alvéoles. Dans ce sens, trois modèles de conception du déversoir non rectilignes creusés ont été sélectionnés. Le premier se caractérise par un creusement symétrique de ses alvéoles, le second modèle se caractérise par un creusement unique en aval de ses alvéoles. Tandis que la troisième configuration se caractérise par un creusement unique d'alvéoles amont. (MACHIELS and al., 2012).

La présente thèse a eu pour objectif général de comparer la capacité d'évacuation entre les déversoirs rectilignes en mince paroi et les déversoirs non rectilignes en labyrinthe développés par voie théorique, expérimental et numérique, ainsi d'optimiser la configuration géométrique du déversoir non rectiligne creusé et de proposer des relations mathématiques approchées qui permettent le pré-dimensionnement général du ce type des déversoirs.

Ce travail a été présenté en deux parties et six principaux chapitres :

**La première partie** est considérée comme une comparaison théorique entre les déversoirs rectilignes et non rectilignes. Elle a été consacrée sur la recherche bibliographique de différents types d'évacuateurs de crues traditionnels, auto-stables et les déversoirs non rectilignes. Il a été scindé en trois chapitres :

**Le premier chapitre** a eu pour objectif de passer en revue les principaux travaux de recherche effectués dans le domaine des déversoirs traditionnels « rectilignes et non rectilignes ».

La bibliographie montre que les déversoirs traditionnels peuvent classifiés en deux types :

- Déversoirs rectilignes
- Déversoirs non rectilignes

La recherche bibliographique sur les déversoirs rectilignes a montré que :

Les principaux types de déversoirs rectilignes sont :

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

Ainsi, la bibliographie a montré que :

- Pour une singularité à crête mince, l'écoulement peut être de trois types (écoulement noyé, écoulement noyé en dessous, écoulement dénoyé), tandis que pour une singularité à crête épaisse, l'écoulement ne peut être que de deux types (écoulement noyé, écoulement dénoyé).
- Les déversoirs à seuil épais offrent un passage facile aux corps flottants, et il est solide et peu altérable.
- Ces types des déversoirs peuvent utiliser comme dispositifs de mesure de débit (débitmètre), et peuvent utiliser comme des évacuateurs de crues.

La recherche bibliographique sur les déversoirs non-rectilignes (traditionnels) a montré que :

- La géométrie en plan du déversoir en labyrinthe traditionnel est caractérisée par une ligne centrale discontinue qui engendre un écoulement tridimensionnel compliqué. Elle peut prendre plusieurs configurations géométriques :
  - Angulaire
  - Rectangulaire
  - Triangulaire
  - Arrondie
- La bibliographie a montré aussi que l'écoulement sur un déversoir en labyrinthe traditionnel passe par quatre phases d'écoulement distinctes en fonction de la charge sur le déversoir :

- Un écoulement complètement aéré
  - Un écoulement partiellement aéré
  - Un écoulement de transition
  - Un écoulement déprimé
- La performance d'un déversoir en labyrinthe traditionnel a été définie pour la première fois par (**HAY et TAYLOR., 1971**) qui a montré que la performance du déversoir en labyrinthe est dépendante des paramètres géométriques du déversoir et des conditions d'approches.
- Une approche numérique du coefficient de débit basé sur l'expérimentation et l'analyse dimensionnelle est attribuée à (**LUX et HINCHLIFF., 1985**). Cette approche montre que le coefficient du débit est lié aux paramètres adimensionnels du déversoir en labyrinthe traditionnel.

*Le deuxième chapitre* de cette thèse a eu pour objectif de faire une recherche approfondie sur les principaux travaux de recherche effectués dans le domaine des déversoirs auto-stables (nouvelle technologie), notamment le système des hausses fusibles et les dispositifs fusibles.

Les déversoirs auto-stables sont nombreux, ils sont plusieurs types :

- les hausses fusibles
- les blocs fusibles
- flashboards
- les digues fusibles
- les hausses rabattables
- les vannes automatiques
- les boudins gonflables
- les murs en « L » fusibles

On a conclu que cette nouvelle technique est très utile pour augmenter la capacité de déversoir ou accroître la capacité de stockage de la retenue. Il a été démontré que le dimensionnement de ces types des déversoirs se base sur le calcul de la stabilité limite des hausses / blocs.

*Le troisième chapitre* a eu pour objectif de passer en revue les principaux travaux effectués soit au niveau local, soit au niveau international, sur les nouveaux déversoirs non rectilignes, notamment les déversoirs en labyrinthes développés.

La recherche bibliographique a montré que :

- La nouvelle forme de déversoir développé par **(LEMPERIERE et al., 2003)** représente une alternative économique et efficace pour l'évacuation des crues et l'accroissement de la capacité des retenues des barrages.
- Deux types du déversoir en labyrinthe développé ont été sélectionnés, le premier avec des porte-à-faux en amont et en aval (type A) et le second avec des porte-à-faux en amont (type B) **(LEMPERIERE et al., 2006)**.
- L'écoulement sur le déversoir en labyrinthe développé se caractérise par deux nappes déversantes, la première sous forme d'un jet du fond qui s'écoule le long du radier incliné de l'alvéole aval et la deuxième sous forme d'un écran plus au moins mince. La deuxième nappe qui est superficielle favorise l'aération du déversoir à cause de la présence des porte-à-faux **(LEMPERIERE et al., 2006)**.
- Le coefficient du débit du déversoir en labyrinthe développé est en fonction des paramètres adimensionnels suivants :

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

- Le déversoir en labyrinthe développé de (type A) a fait l'objet d'une étude expérimentale détaillée, qui a permis de déterminer l'impact de la plupart des paramètres géométriques et l'impact des paramètres adimensionnels qui régissent sur le rendement de ce type de déversoir.
- Le déversoir en labyrinthe développé de type (B) a fait l'objet de quelques essais expérimentaux, qu'il montre son efficacité hydraulique par ses paramètres géométriques **(NOUI et al., 2007)**.
- Les conditions d'approche sur le rendement du déversoir en labyrinthe développé montrent que :
  - Le niveau d'eau aval n'influe pas sur les conditions en amont, sauf si la surface du plan d'eau aval dépasse le niveau de la crête du déversoir **(BELAABED et al., 2011)**.
  - La forme curviligne des guideaux peut avoir un résultat favorable sur le rendement du déversoir **(BORDJI et al., 2013)**.
- Les travaux de recherche sur le déversoir en labyrinthe développé à l'international sont vastes en raison que le déversoir en labyrinthe développé se caractérise par de nombreux paramètres géométriques régissant son écoulement. On peut citer :

- L'augmentation de la hauteur de la pelle à l'aval du déversoir en labyrinthe développé (type A) fait augmenter sa capacité d'évacuation d'une manière importante ;
  - Les travaux de comparaison entre un déversoir en labyrinthe développé avec un déversoir en labyrinthe traditionnel ont montré que le déversoir en labyrinthe développé a une meilleure efficacité de décharge si l'on compare le coefficient de débit global ;
  - Les travaux de l'effet de creusement des alvéoles sur la performance du déversoir en labyrinthe développé (type A) (**MARCELO et al., 2013**) ont montré que le creusement des alvéoles en aval apporte peu à la capacité d'évacuation du déversoir en labyrinthe développé, ainsi que le creusement des alvéoles en amont a un impact bénéfique sur la capacité d'évacuation du déversoir en labyrinthe développé ;
  - La performance du déversoir en labyrinthe développé (type A) avec rehausses est modérée en comparaison avec le déversoir en labyrinthe développé (type A) sans rehausses (**MACHIELS and al., 2012**).
  - Le ratio hydraulique optimum des largeurs des alvéoles est compris entre (1.25 et 1.5), tandis que le ratio optimum économique est correspond à la valeur ( $a/b=1$ ).
  - Le déversoir en labyrinthe développé fractal montre son efficacité hydraulique malgré sa complexité de construction, mais il reste de vérifier son comportement mécanique ;
  - Les travaux de la comparaison entre la performance de trois types de déversoirs testés (déversoirs en labyrinthe développés (type A) et (type B) et un déversoir traditionnel rectangulaire) dans le cas des petits barrages, ont montré que le déversoir en labyrinthe développé (type B) reste une solution très efficace devant le déversoir en labyrinthe développé (type A) et les déversoirs traditionnels rectangulaires, notamment pour les petits barrages (**TA KHANH et al, 2011**).
  - Les travaux de (**TULLIS et al, 2011**), sur l'effet des corps flottants sur la performance des déversoirs en labyrinthe développés et les déversoirs en labyrinthe traditionnels, ont montré qu'il faut prendre en considération l'effet du blocage des déversoirs par des énormes sédiments lors de la conception et l'entretien des déversoirs.
- La réhabilitation des barrages existants impose fréquemment une augmentation de leur capacité d'évacuation (France, Vietnam). Dans de nombreuses situations, le déversoir en labyrinthe développé offre une solution compacte et efficace.

**La deuxième partie** a été consacrée à la comparaison entre les déversoirs non rectilignes en labyrinthe développés (les déversoirs non rectilignes creusés) et les déversoirs rectilignes en mince paroi par voie analytique, expérimentale & numérique, elle a été répartie comme suit :

**Le quatrième chapitre**, a été consacré à une analyse dimensionnelle les paramètres adimensionnels régissant l'écoulement sur les déversoirs rectilignes en mince paroi et les déversoirs non rectilignes creusés.

L'analyse dimensionnelle appliquée sur un déversoir en mince paroi a montré que le coefficient du débit est en fonction du :

- Largeur d'écoulement du déversoir (L)
- La charge totale sur le déversoir (H)

Cette étude a montré que le coefficient de débit qui exprime la capacité d'évacuation des déversoirs non rectilignes creusés est lié étroitement aux paramètres adimensionnels suivants :

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

- Rapport de la charge totale à la hauteur ( $h^*/P$ ) ;
- Rapport de la longueur développé à la largeur ( $L/W$ ) ;
- Rapport de la largeur à la hauteur ( $W/P$ );
- Rapport de la largeur d'alvéole amont à la largeur d'alvéole avale ( $a/b$ );
- Rapport de la profondeur du rehausse à la hauteur ( $d'/P$ ).

**Le cinquième chapitre** de cette partie a été consacré à la comparaison expérimentale entre les déversoirs non rectilignes en labyrinthe développés et les déversoirs en mince paroi de même largeur, cette étude expérimentale a été répartie sur les axes suivants:

- La comparaison entre les déversoirs non rectilignes creusés et les déversoirs en mince paroi de même largeur;
- La comparaison entre les déversoirs non rectilignes en labyrinthe développés (forme en plan) et les déversoirs en mince paroi de même largeur;
- Etude expérimentale sur modèles réduits des déversoirs creusés.

**L'étude de comparaison entre les déversoirs non rectilignes creusés et les déversoirs en mince paroi de même largeur a montré que:**

- La performance moyenne des déversoirs non rectilignes avec différents endroits de creusement des alvéoles par rapport au déversoir rectiligne en mince paroi de même largeur est de l'ordre de 2.15 fois.

- Du point de vue hydraulique, le meilleur creusement des alvéoles est celui qui correspond d'un creusement symétrique des alvéoles ou creusement unique en amont. Tandis que le creusement unique en aval peu apporte à la capacité d'évacuation du déversoir non rectiligne creusé.
- Du point de vue stabilité de l'ouvrage, le creusement symétrique des alvéoles est bénéfique, il assure mieux la stabilité du déversoir creusé en comparaison avec les autres types de creusement (uniquement en amont ou uniquement en aval).
- L'augmentation de la pente de creusement des alvéoles fait augmenter la performance du déversoir non rectiligne creusé symétriquement jusqu'à le ratio ( $d'/P= 0.27$ ), mais à partir du ratio ( $d'/P= 0.33$ ) la performance se diminue d'une manière significative. Ce résultat signifie que la pente de creusement des alvéoles ne doit pas dépasser le  $(1/3)$ .
- La diminution de la pente de creusement des alvéoles fait diminuer la performance du déversoir non rectiligne creusé symétriquement jusqu'à le ratio ( $d'/P= 0$ ).
- La performance des déversoirs non rectilignes creusés devant les déversoirs rectilignes en mince paroi de même largeur est variée de (2 à 2.15) fois.
- Le déversoir non rectiligne creusé peut être une solution pour faire évacuer des grands débits sous des faibles charges.

**L'étude de comparaison entre les déversoirs non rectilignes en labyrinthe développés et les déversoirs en mince paroi de même largeur a montré que :**

- La forme géométrique des alvéoles joue un rôle primordial dans l'augmentation / diminution de la capacité d'évacuation des déversoirs.
- La performance des déversoirs non rectilignes en labyrinthe développé devant les déversoirs rectilignes en mince paroi de même largeur est variée de (1.85 à 2) fois.
- La forme en plan rectangulaire du déversoir permet l'évacuation des grands débits, tandis que les formes en plans triangulaires et trapézoïdales diminuent la capacité d'évacuation.
- La forme en plan trapézoïdale permet l'évacuation des grands débits en comparaison avec la forme en plan triangulaire.
- Le déversoir en labyrinthe développé rectangulaire peut être une solution pour faire évacuer des grands débits sous des faibles charges.

**L'étude expérimentale sur modèles réduits des déversoirs non rectilignes creusés a montré que :**

- Le déversoir non rectiligne creusé peut être placé sur les barrages poids ou inséré dans les canaux des barrages en terre. Les essais effectués dans ce sens ont montré que le

déversoir non rectiligne creusé donne le même rendement pour les deux cas d'emplacement. Par conséquent, Le déversoir non rectiligne creusé peut être une solution rentable pour les deux cas de barrage poids (en béton et en terre).

- L'étude de l'effet des corps flottants sur l'écoulement du déversoir non rectiligne creusé a montré que les corps flottants sont arrêtés sous les porte-à-faux du déversoir non rectiligne creusé pour les faibles et moyennes charges relatives mais par contre, l'écoulement est redevenu libre pour les fortes charges relatives.
- La forme d'entrée d'eau évacuée en amont du déversoir non rectiligne creusé signifie la forme géométrique à la partie supérieure des porte-à-faux amont du déversoir non rectiligne creusé, l'expérimentation sur deux formes d'entrée, le premier plan et le deuxième en arc a montré que la forme d'entrée en arc fait diminuer la capacité d'évacuation d'une manière significative devant la forme d'entrée plane. Cette diminution est de l'ordre de 10% pour ( $h^*/P < 0.2$ ) et d'environ 5% pour les moyennes charges ( $0.2 < h^*/P < 0.45$ ). Ce que signifie qu'il n'est pas recommandé de construire les déversoirs non rectilignes creusés avec une forme d'entrée en arc au niveau des porte-à-faux amont.
- La diminution de la pente fait augmenter la capacité d'évacuation d'une manière significative jusqu'à la pente qui correspond au rapport adimensionnel ( $d'/P = 0.27$ ), Au-delà de cette valeur la capacité d'évacuation du déversoir non rectiligne creusé sera diminué.
- Le meilleur ratio entre le creusement des alvéoles et la hauteur maximale du déversoir correspond à la valeur ( $d'/P = 0.27$ ).

*Le sixième chapitre* de cette partie a été consacré sur l'analyse numérique de résultats obtenus, en utilisant la régression multiple à l'aide d'un logiciel mathématique MINITAB 17 qui permet de donner une première estimation du débit en fonction des différents paramètres adimensionnels. Des relations mathématiques pour le pré-dimensionnement du déversoir non rectiligne creusé ont été proposées :

- Le coefficient du débit du déversoir non rectiligne creusé peut être présenté par l'équation approchée suivante :

$$C_{wajusst} = -0.9931 + 3.772 C_{w(th)} - 2,485 (C_{w(th)})^2 + 0.7101 (C_{w(th)})^3$$

- Le débit qui transite par le déversoir non rectiligne creusé peut être déterminé par la relation suivante :

$$Q = -0.9931 + 3.772 C_{w(th)} - 2,485 (C_{w(th)})^2 + 0.7101 (C_{w(th)})^3 W \sqrt{2gh} *^{3/2}$$

En guise de notre étude théorique, expérimentale et numérique, on peut conclure que :

- Les déversoirs non rectilignes en labyrinthe développés, notamment les déversoirs non rectilignes creusés peuvent être une solution efficace pour évacuer des grands débits sous des faibles charges hydrauliques en comparaison avec les déversoirs rectilignes en mince paroi.
- Les déversoirs non rectilignes creusés peuvent améliorer la sécurité des barrages existants / nouveaux par leurs grandes capacités d'évacuation.

### **RECOMMANDATIONS**

Les équations du coefficient du débit théorique et ajusté du déversoir non rectiligne creusé obtenus précédemment sont valables uniquement dans le cas où le déversoir non rectiligne creusé se caractérise par les paramètres adimensionnels suivants :

- La valeur de  $(L/W)$  est comprise entre : (5.76 et 6)
- La valeur de  $(W/P)$  est comprise entre : (1.11 et 1.14)
- La valeur de  $(a/b)$  est comprise entre : (1.187 et 1.2)
- La valeur de  $(d'/P)$  est comprise entre : (0.067 et 0.4)

### **PERSPECTIVE**

- Cette étude est considérée comme une simple référence aux futurs travaux de recherche sur la performance hydraulique des déversoirs non rectilignes creusés et les déversoirs rectilignes en mince paroi.

- En raison que la classification des déversoirs rectilignes montre deux types des déversoirs rectilignes :

- Déversoirs rectilignes en mince paroi
- Déversoirs rectilignes à seuil épais

Il est souhaitable d'entamer d'autres travaux futurs de comparaison entre les déversoirs non rectilignes creusés et les déversoirs rectilignes à seuil épais.

- Les équations obtenus de dimensionnement des déversoir non rectilignes creusés sont intéressantes, mais il est nécessaire d'entamer d'autres travaux futurs pour améliorer ces équations afin d'aboutir d'autres équations simples de dimensionnement des déversoirs non rectilignes creusés.

### **PUBLICATIONS RELATIVES A LA THESE :**

**NOUI A., SAKAA B. (2018)**, The non-rectilinear spillway dug symmetrically and the rectilinear spillway (experimental study), Journal of fundamental and applied sciences, 10 (2), El-Oued, Algeria, 58-66.

# **Références Bibliographiques**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **AFSHAR A., (1998)**, The development of labyrinth spillway designs, *Water Power & Dam Construction*, pp. 36-39.
- **ANDERSON R., TULLIS B. (2011)**, Influence of Piano Key Weir geometry on discharge, *Labyrinth and piano key weirs-PKW 2011*, CRC press, London, 75-80.
- **BARBE, R. (1947)**, La mesure dans un laboratoire des pertes de charge de conduites industrielles. *La Houille Blanche*, (3), 191-204.
- **BARCOUDA M., CAZAILLET O., COCHET P., JONES B.A., LACROIX S., LAUGIER F., ODEYER C. and VIGNY J.P. (2006)**, Cost effective increase in storage and safety of most dams using fusegates or P. K. Weirs, in proceedings of 22nd ICOLD congress, CIGB/ICOLD, Barcelona, Spain, Q86, R3.
- **BELAABED F, OUAMANE A, (2011)**, Mémoire Magister en Hydraulique, Contribution à l'étude des déversoirs en touches de piano (P.K.WEIR) noyés par l'aval, Université de Biskra.
- **BEN SAID M., OUAMANE A, (2007)**, Mémoire Magister en Hydraulique, Étude de l'optimisation des évacuateurs de crues en labyrinthe, Biskra.
- **BIERI M., FEDERSPIEL M., BOILLAT J., HOUDANT B. and DELORME F. (2009)**, Spillway capacity upgrade of Gloriettes Dam: Environmental integration and energy dissipation, in proceedings of HYDRO 2009, Lyon, France.
- **BLANC P. and LEMPÉRIÈRE F. (2001)**, Labyrinth spillways have a promising future, *International Journal of Hydropower and Dams* 8 (4), 129-131.
- **BLANCHER B., MONTARROS F. and LAUGIER F. (2011)**, Hydraulic comparison between Piano Key Weirs and labyrinth spillways, *Labyrinth and piano key weirs-PKW 2011*, CRC press, London, 141-150.
- **BOREDJI S, OUAMANE A, (2013)**, Mémoire Magister en Hydraulique, Contribution à l'étude de l'effet des conditions amont sur l'écoulement du déversoir en touches de piano.
- **BOUSSINESQ., 1871**, « Théorie de l'intumescence liquide, appelée onde solitaire ou de translation, se propageant dans un canal *rectangulaire* », *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, vol. 72, 1871, p. 755–759

- **BROSH H., (1999)**, Méthodologie scientifique, méthode en physique, Université de Nice Sophia Antipolis, France V.7.1.
- **BUREAU OF RECLAMATION, (1987)**, Design of small Dams, a Water Resources Technical Publication, Denver, Colorado.
- **CAMPUS, F. (1956)**, Les ouvrages du génie civil. Livre de l'eau: guide pratique à l'usage des ingénieurs et des techniciens. Tome 3, 170-186.
- **CARLIER M., (1986)**, Hydraulique générale et appliquée, Eyrolles, pp. 189-215.
- **CAROL S., KATHLEEN L., (1982)**, A Site Specific Study of a Labyrinth Spillway, Proceeding of the conference Applying Research to Hydraulic Practice, Hydraulics Division of ASCE, pp. 86-95.
- **CASSIDY, J.J., GARDNER, C.A. and PEACOCK, R. T. (1985)**, Boardman Labyrinth Crest-Spillway, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 111, N° .3, pp. 398-416.
- **CIBLAC T., (1995)**, Modélisation ; Analyse dimensionnelle, Similitude. Méthodologies de modélisations informatiques du projet et de son environnement, S5a.
- **CICERO G.-M. (2011)**, METHOD to design a PK-Weir with a shape and hydraulic performances, Labyrinth and piano key weirs-PKW 2011, CRC press, London, 207-212.
- **DEGOUTTE G., ROYET P., (1992)**, Hausses fusibles sur déversoirs de barrages, Augmentation de la capacité utile des retenues ou de la sécurité des évacuateurs de crues. CEMAGREF, n° 15, note 1.
- **DEGOUTTE, G. (1993)**, Guide pour le diagnostic rapide des barrages anciens (Vol. 13). Editions Quae.
- **DUGUÉ V., HACHEM F., BOILLAT J.L., NAGEL V., ROCA J.P. and LAUGIER F. (2011)**, PK Weir and flap gate spillway for the Gage II Dam, Labyrinth and piano key weirs-PKW 2011, CRC Press, London, 35-42.
- **EDDIE S., (1999)**, Application de Maple a l'analyse dimensionnelle, bibliothèque de Serge Le Goff, France.
- **FALVEY, H. T., TREILLE, P. (1995)**, Hydraulics and design of fusegates Journal of hydraulic engineering, Vol. 121, N°7, pp. 512-518.

- **FERROUN., (2016)**, Projet d'analyse numérique (méthode de Trapez et Simpson).
- **FLEURY, P. (1948)**, Coordination des unités mécaniques et électriques en un système «pratique» international: formules classiques ou rationalisées. J. Phys. Radium, 9(2), 33-38.
- **HAMISULTANE, H. (2002)**, ECONOMETRIE.
- **HAY N., TAYLOR G., (1970)**, Performance and design of labyrinth weirs, Journal of the hydraulics division Proceedings of ASCE, Vol 96, N° 11, pp 2337-2357.
- **HINCHLIFF, D. L. and HOUSTON, K. L. (1984)**, Hydraulic Design and Application of Labyrinth Spillways, Division of Research Engineering and Research Center, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- **HO Ta KHANH M., HIEN T.C. and HAI N.T. (2011)**, Main results of the P.K weir model tests in Vietnam (2004 to 2010), Labyrinth and piano key weirs-PKW 2011, CRC press, London, 191-198.
- **HURLIN, C., PAPA, M. B., & N'DIAYE, P. (1998)**, La méthode d'estimation des moindres carrés modifiés ou fully modified. Université de Paris I.
- **LADREYT S., LABORIE V., (2005)**, Notice sur les déversoirs, Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales (CETMEF), France, pp 21-71.
- **LALLEMAND, A. (2000)**, Ecoulement des fluides-Analyse dimensionnelle. Similitude.
- **LAUGIER F., PRALONG J., BLANCHER B. and MONTARROS F. (2011)**, Development of a new concept of Piano Key Weir spillway to increase low head hydraulic efficiency: Fractal PKW, Labyrinth and piano key weirs-PKW 2011, CRC press, London, 281-288.
- **LAVALLEE, D., MARCHE, C., & QUACH, T. (2000)**, De nouvelles approches pour quantifier le risque de rupture d'une retenue d'eau. Canadian Journal of Civil Engineering, 27(6), 1217-1229.
- **Le DOUCEN O., LEITE RIBEIRO M., BOILLAT J.-L., SCHLEISS A. and LAUGIER F. (2009)**, Etude paramétrique de la capacité des PK-Weirs, in proceedings of Modèles physiques hydrauliques - outils indispensables du XXIe siècle, SHF, Lyon.
- **LEITE RIBEIRO M., PFISTER M., BOILLAT J.-L., SCHLEISS A., LAUGIER F. (2012)**. Piano key weirs as efficient spillway structure, 24th ICOLD Congress, Kyoto.

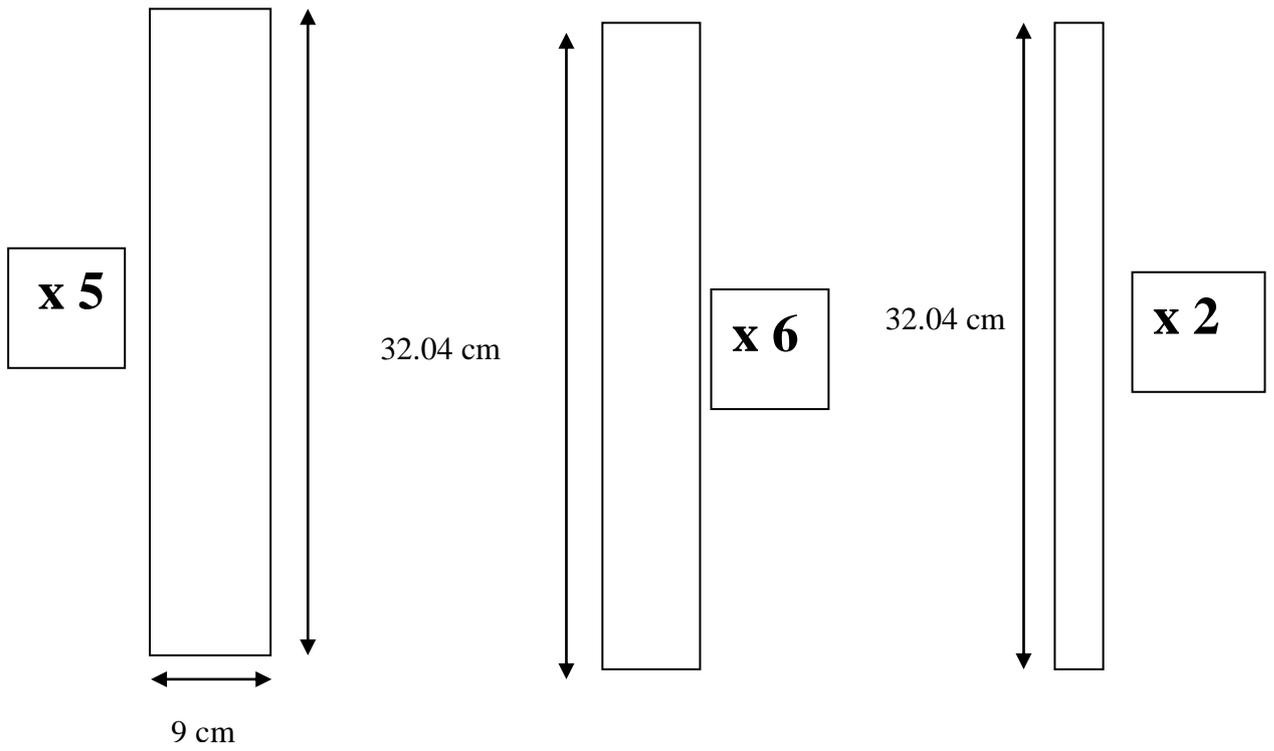
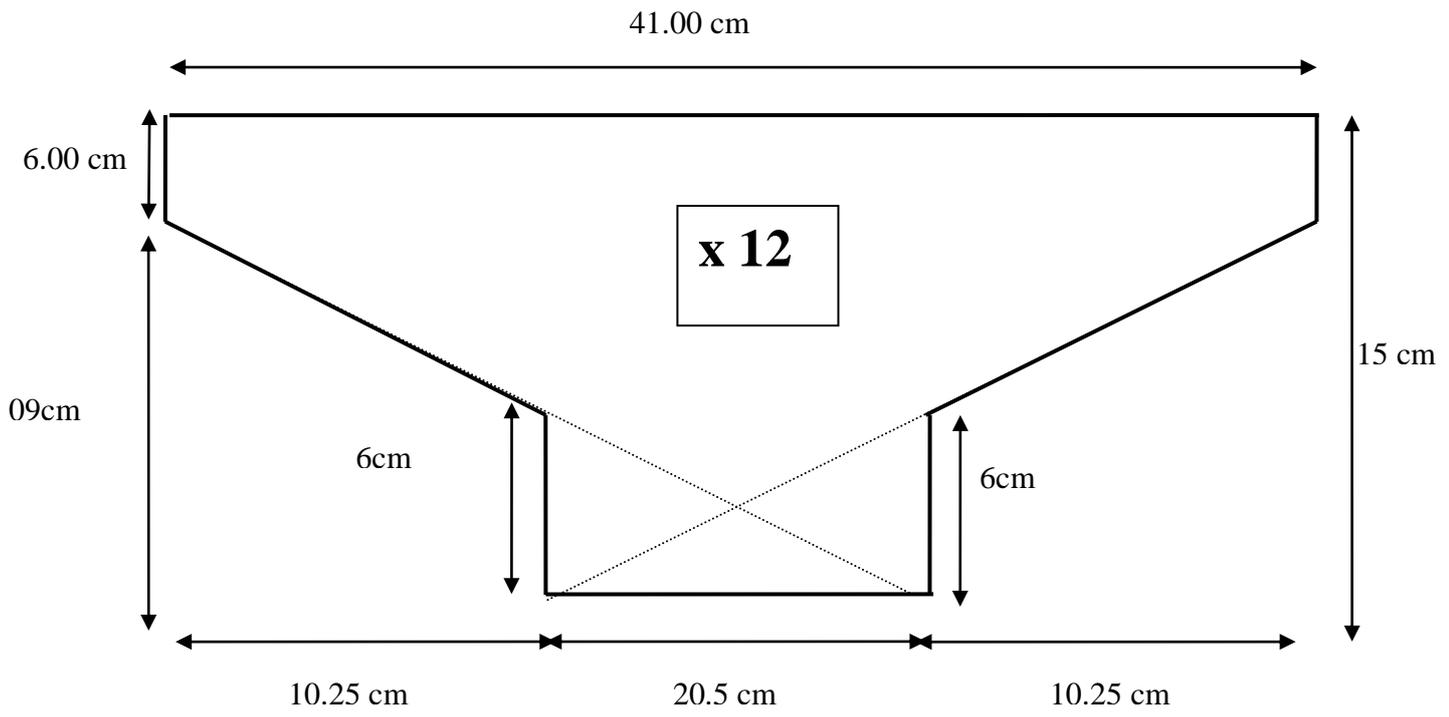
- **LEMPÉRIÈRE F. and OUAMANE A. (2003)**, The piano keys weir: a new cost-effective solution for spillways, *International Journal of Hydropower and Dams* 10 (5), 144-149.
- **LENCASTRE A., (1969)**, Manuel d'hydraulique générale. Collection du centre de recherches et d'essais de Chatou, Eyrolles.
- **LUX III, F., HINCHLIFF, D.L. (1985)**, Design and Construction of Labyrinth Spillways, 15<sup>th</sup> Congress on Large Dams, ICOLD, Vol. IV, Q59, R 15, pp. 249-274, Lausanne.
- **MACHIELS O., ERPICUM S., ARCHAMBEAU P., DEWALS B. and PIROTON M. (2012)**, Influence of weir height and keys slope on PKW discharge, in proceedings of 4th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, Porto, Portugal.
- **MACHIELS O., ERPICUM S., ARCHAMBEAU P., DEWALS B. and PIROTON M. (2012)**, Influence of the relative alveoli widths on Piano Key Weirs efficiency for varied weir heights, in proceedings of 24th ICOLD congress, Kyoto, Japan.
- **MAGALHAES A., (1985)**, Labyrinth-Weir Spillways. 15<sup>th</sup> Congress on Large Dams, ICOLD, Vol. IV, Q59, R 24, pp. 395-407, Lausanne.
- **NOUI A., OUAMANE A., (2007)**, Mémoire Magister en Hydraulique, Etude de l'optimisation de l'évacuateur de crues en touches de piano (PK-Weir), Biskra.
- **NOUI A., OUAMANE A., (2011)**, Study of optimization of the Piano Key Weir, Labyrinth and piano key weirs-PKW 2011, CRC press, London, 175-182.
- **NOUI A., OUAMANE A., (2015)**, Contribution à l'étude de l'effet de creusement des alvéoles sur la performance du déversoir en touches de piano, *Journal Eau et Environnement*, (26 & 27) 83-98.
- **OUAMANE A., LEMPERIERE F., (2006)**, Amélioration de la forme des déversoirs en labyrinthe pour l'évacuation des grands débits, Séminaire National sur les ressources en eaux et leurs utilisations, Centre Universitaire Khemis Meliana.
- **PADET, J. P., & GERMAIN, P. (1991)**, Fluides en écoulement: méthodes et modèles. Paris.: Masson.
- **PALLU, D., VOLTE, E., ROSTAING, C., MORIN-BATUT, C., & BERMOND, P. (2010)**, Calcul de l'impact et hiérarchisation d'un grand nombre de déversoirs d'orage, exemple sur un bassin versant du Grand Lyon. *NOVATECH 2010*.

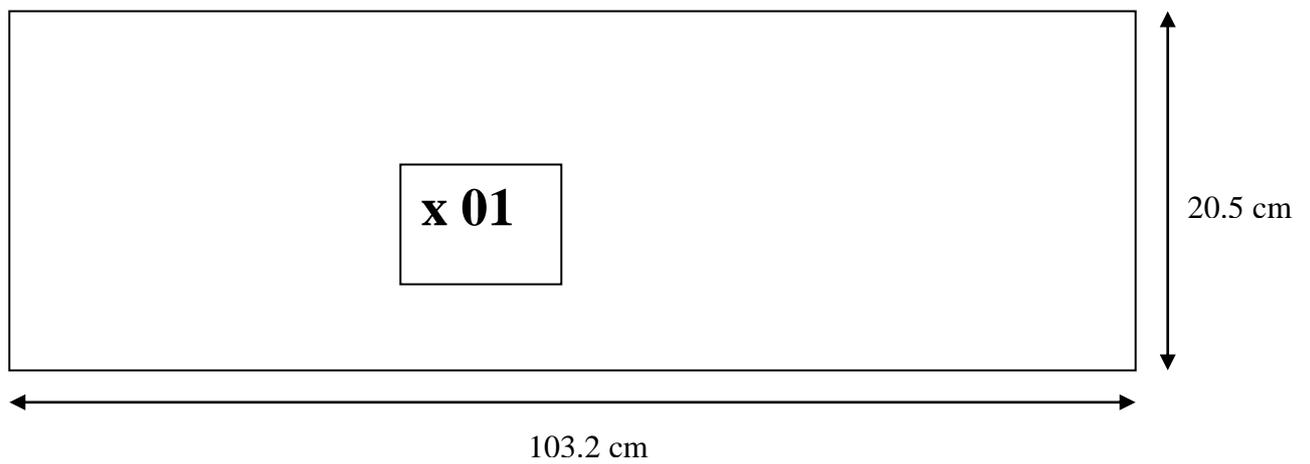
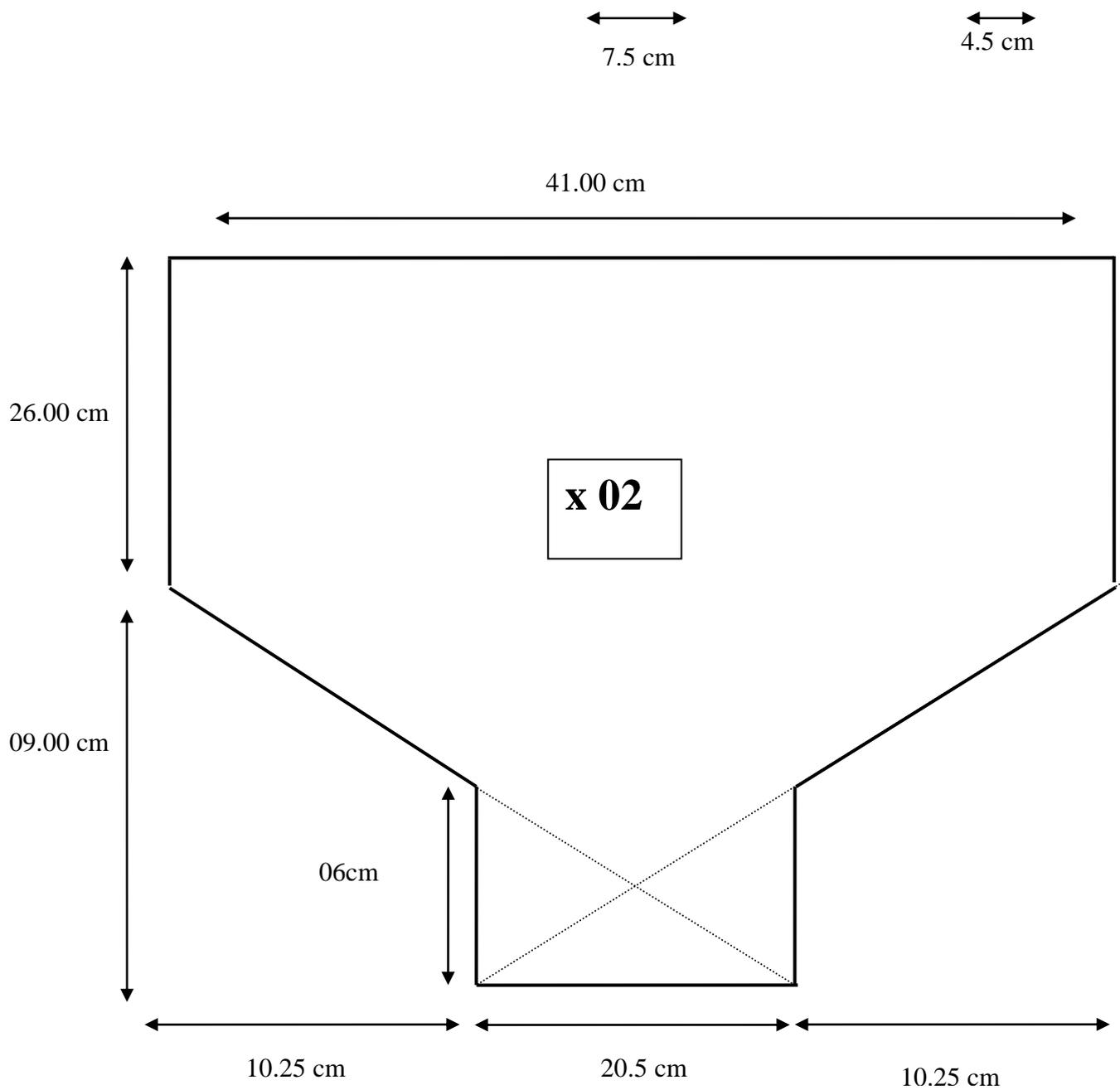
- **SCHLEISS A. (2011)**, From Labyrinth to Piano Key Weirs - A historical review, Labyrinth and piano key weirs-PKW 2011, CRC press, London, 3-15.
- **SINNINGER R., HAGER W. (1989)**, Construction hydrauliques. Presse Polytechniques Romandes, Vol. 15, pp. 143-181.
- **TISON, L. J. (1950)**, Cours d'hydraulique. Centerick.
- **TULLIS, J. P., AMANIAN, N. WALDRON, D. (1995)**, Design of Labyrinth Spillways, Journal of hydraulic engineering, Vol. 121, N°.3, pp 247-255.
- **VERMEULEN J., LAUGIER F., FARAMOND L. and GILLE C. (2011)**, Lessons learnt from design and construction of EDF first Piano Key Weirs, Labyrinth and piano key weirs-PKW 2011, CRC press, London, 215-224.
- **YILDIZ, D., ÜZÜCEK, E. (1996)**, Modelling the performance of labyrinth spillways, The International Journal on Hydropower & Dams Issue Three.

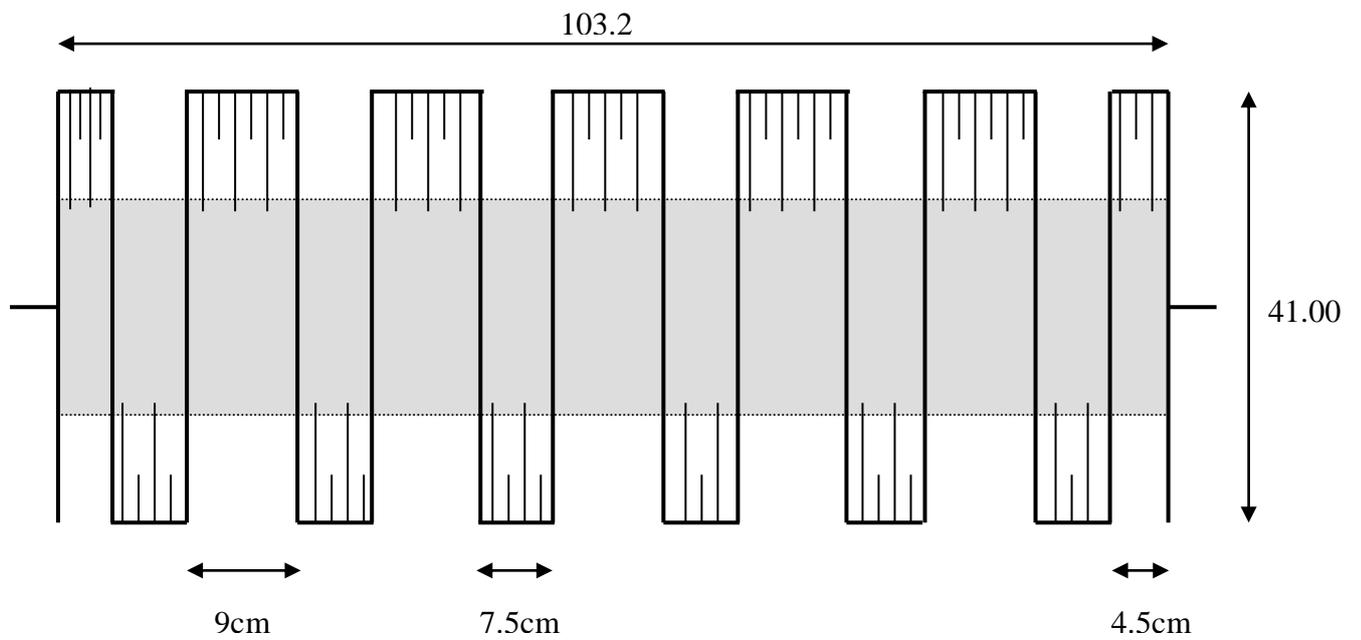
#### **WEBOGRAPHIE / SITOGRAFIE**

- <http://aof-maquettes.fr/fr/presentation/>
- [http://biol09.biol.umontreal.ca/BIO2042/Regr\\_mult.pdf/](http://biol09.biol.umontreal.ca/BIO2042/Regr_mult.pdf/)
- <http://fr.hydrocoop.org/>
- <http://www.abhsmmd.ma/>
- <http://www.anbt-dz.com/>
- <http://www.dams.org/>
- <http://www.eau-mer-fleuves.cerema.fr/notice-sur-les-deversoirs-synthese-des-lois-d-a527.html/>
- [http://www.editions.polytechnique.fr/files/pdf/EXT\\_0833\\_X.pdf/](http://www.editions.polytechnique.fr/files/pdf/EXT_0833_X.pdf/)
- <http://www.hydrocoop.org/>
- <http://www.hydroplus.com/hydroplus/hydroplus.nsf/web/index.htm&lng=L2/>
- <http://www.icold-cigb.net/home.asp/>
- <http://www.irstea.fr/accueil/>
- <http://www.meca.unicaen.fr/~ridha/pdf/HOutDynFluidM1-3.pdf/>
- <http://www.minitab.com/fr-fr/products/minitab/>
- <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/>
- <https://www.eaurmc.fr/>
- <https://www.edf.fr/>

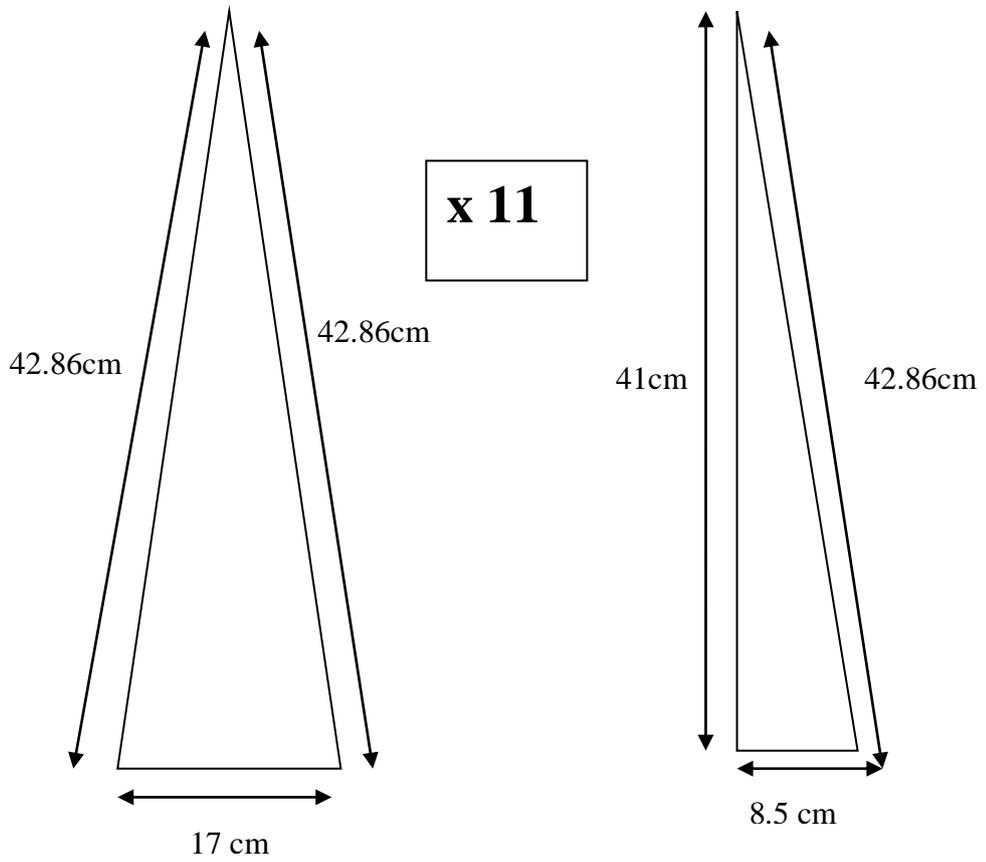
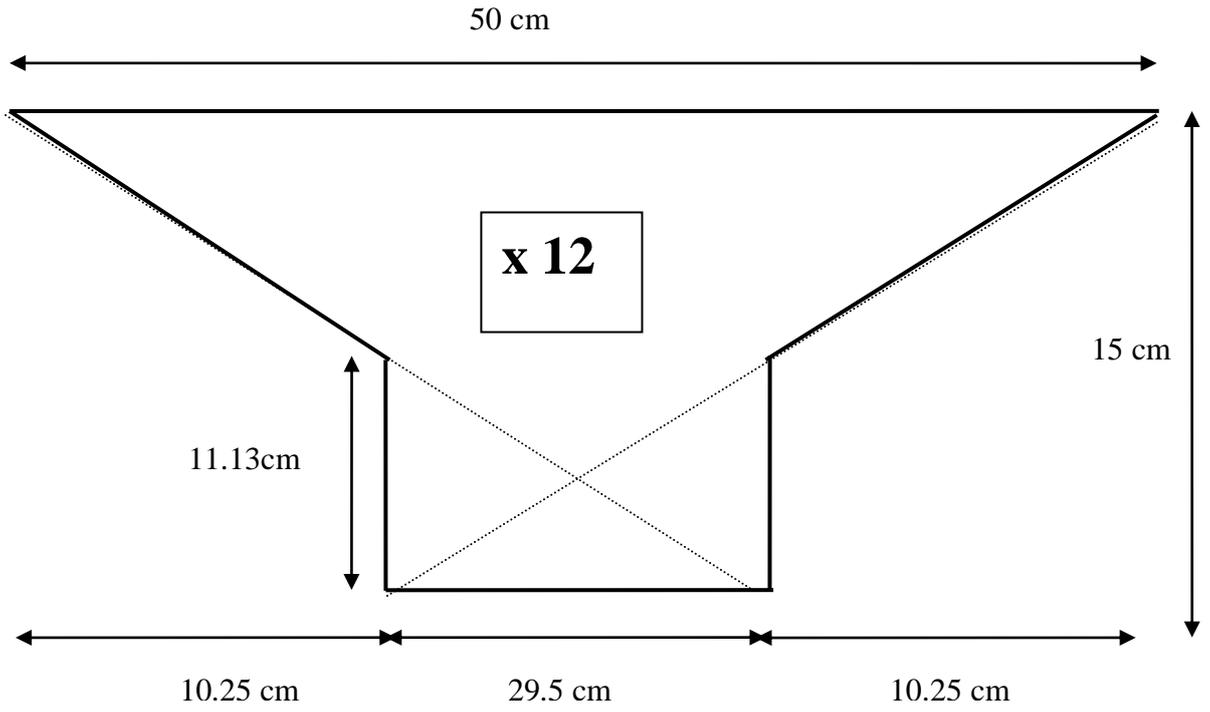
# **Annexe**

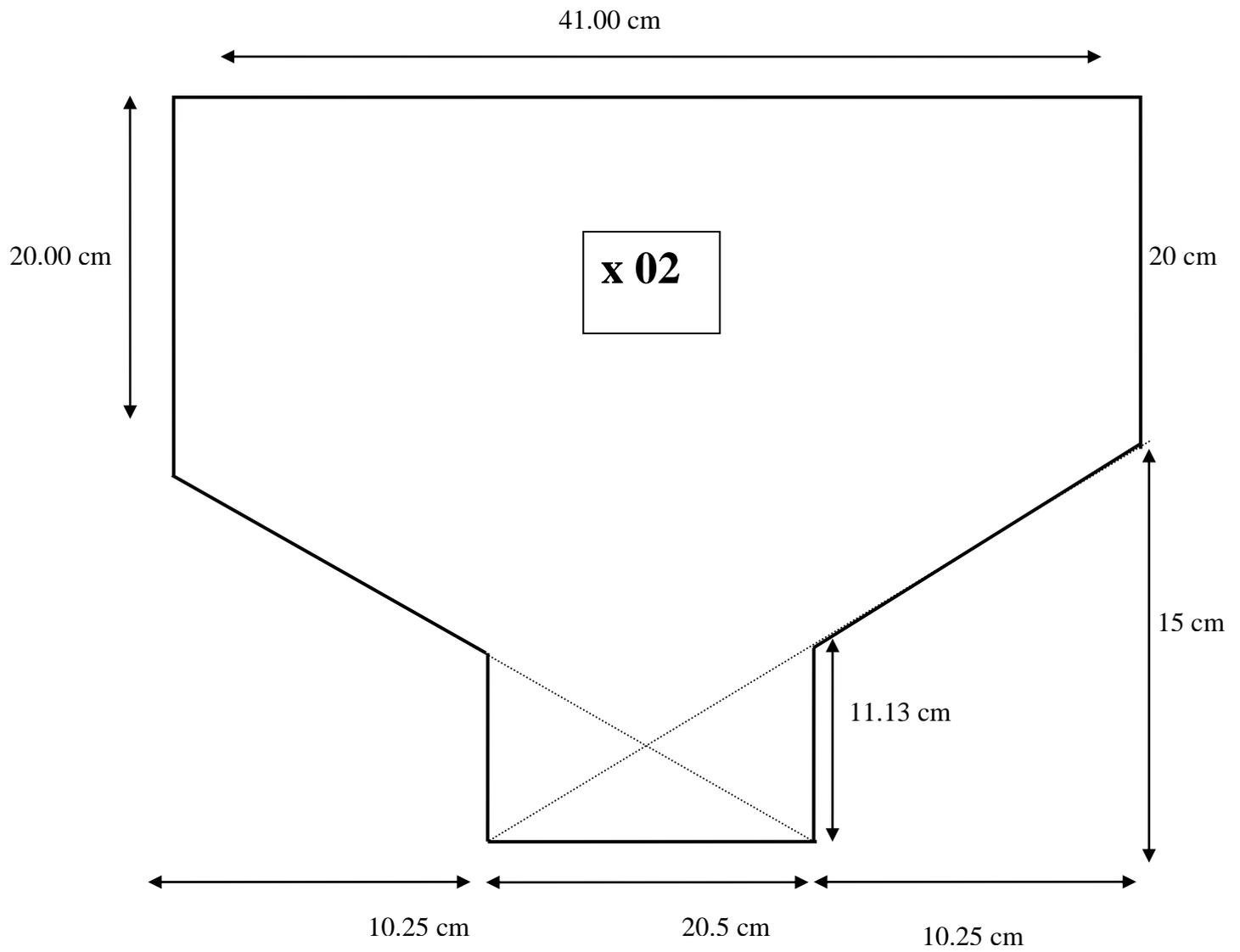
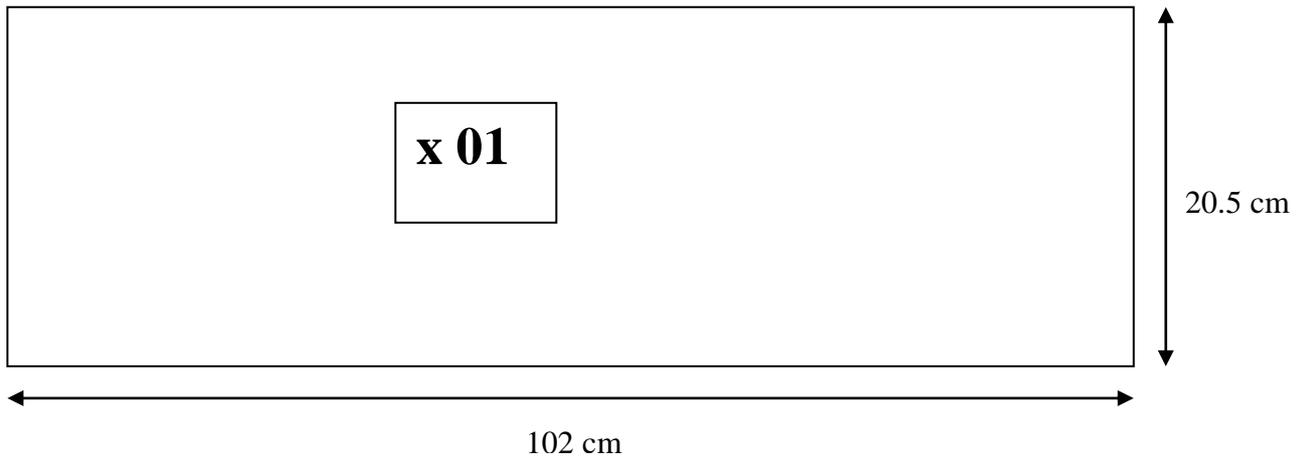


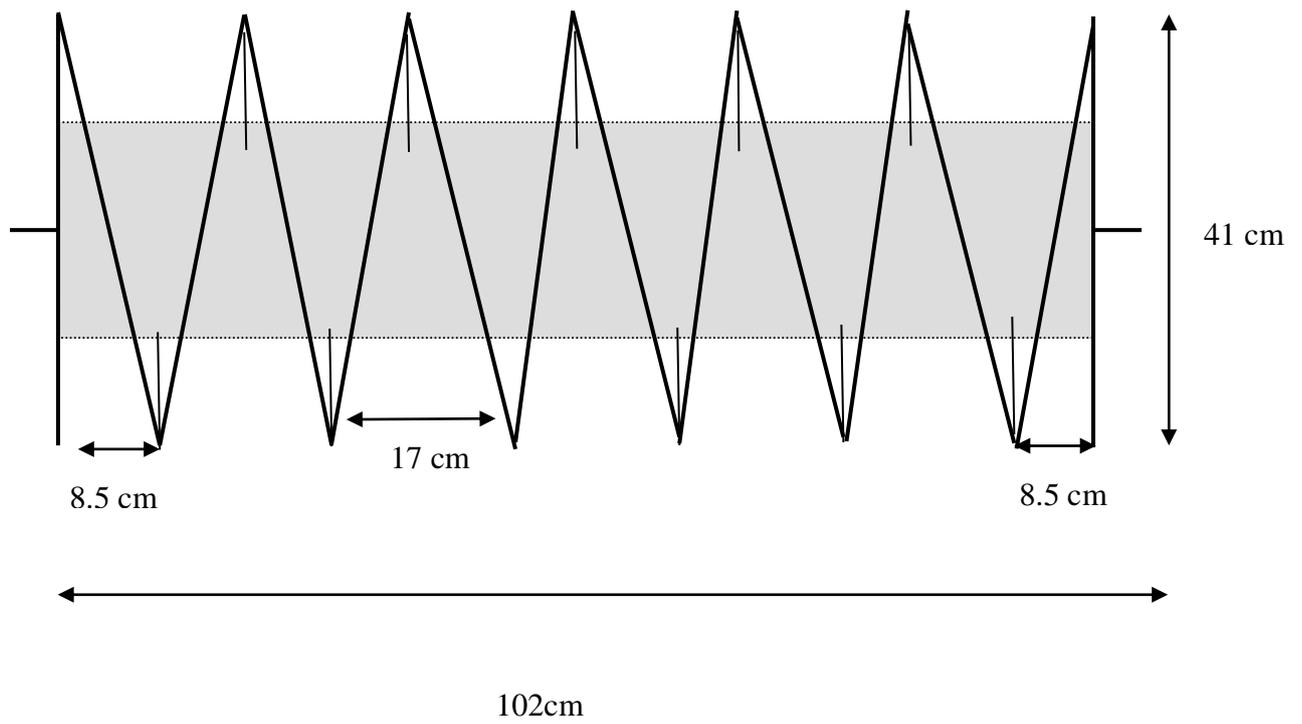




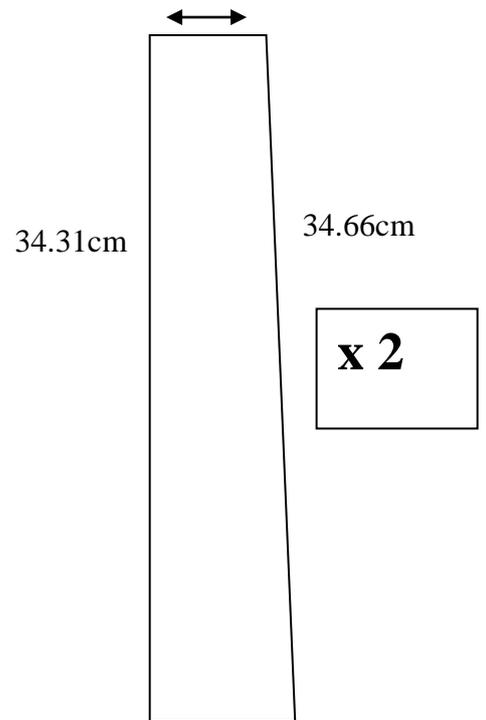
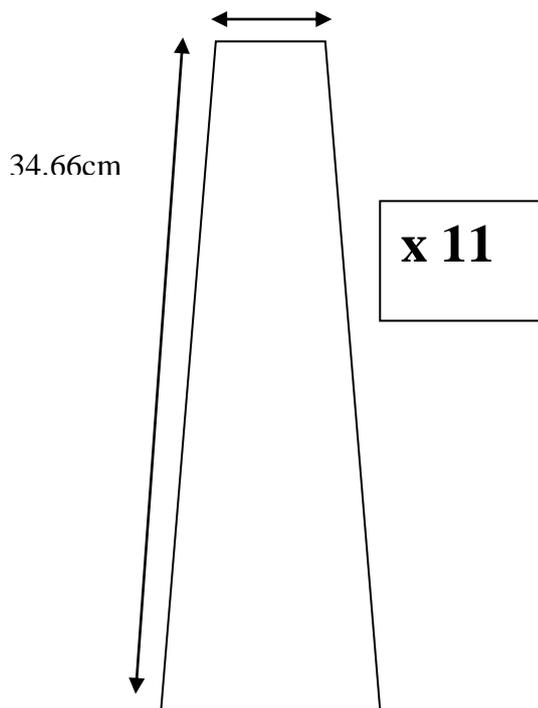
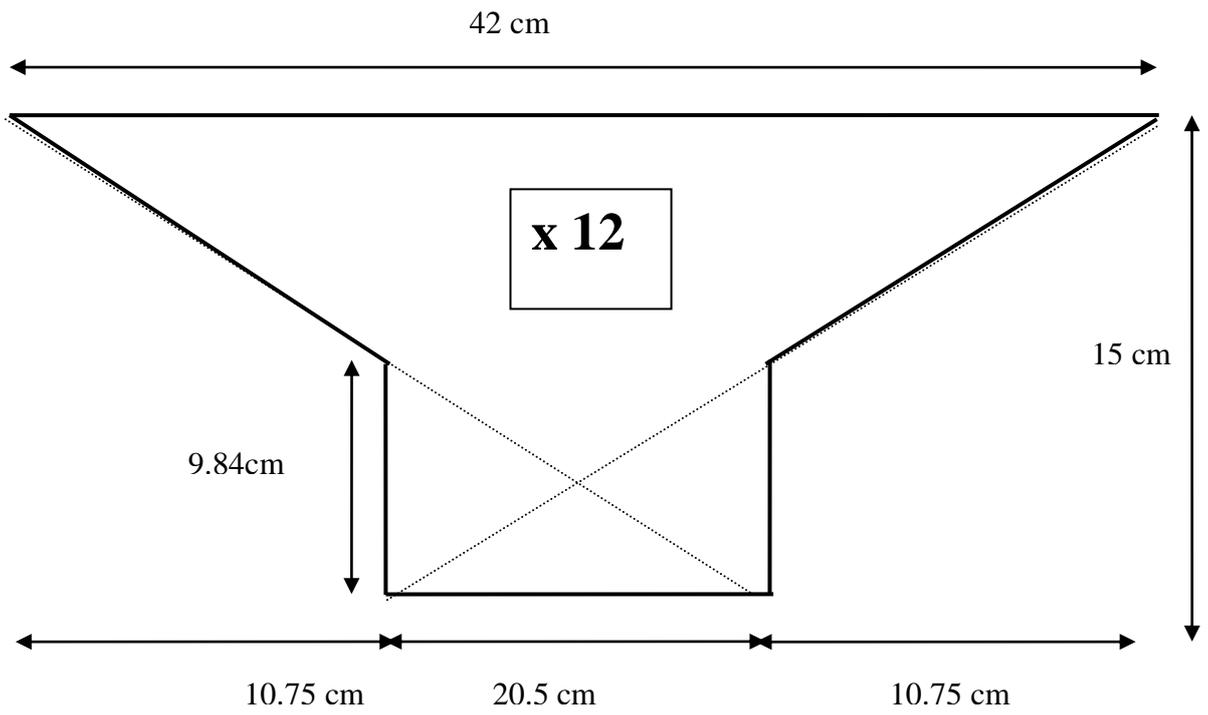
**Figure 01: Configuration géométrique détaillée du déversoir non rectiligne creusé  
( $d'/P=0.4$ ) Modèle D 09**

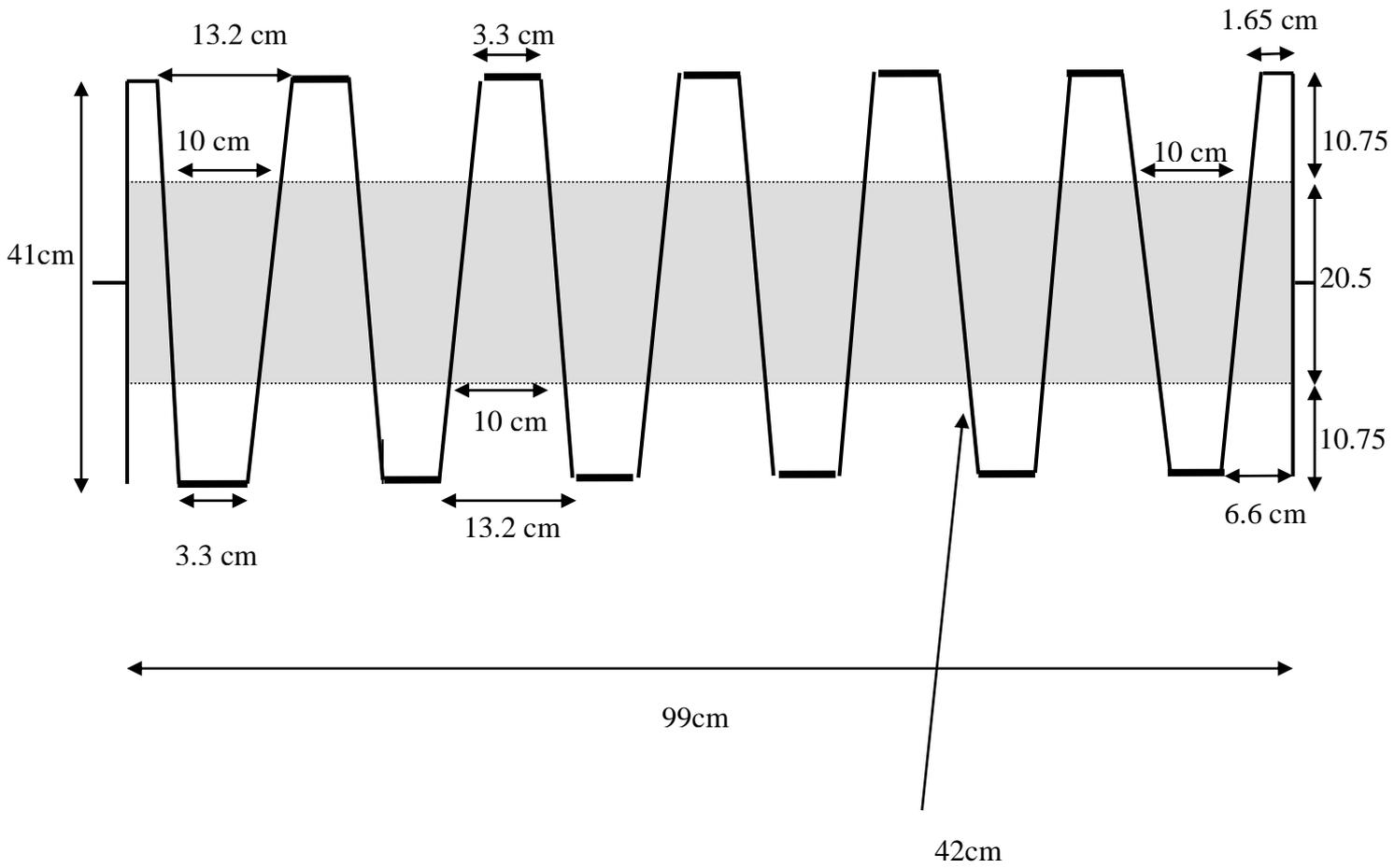




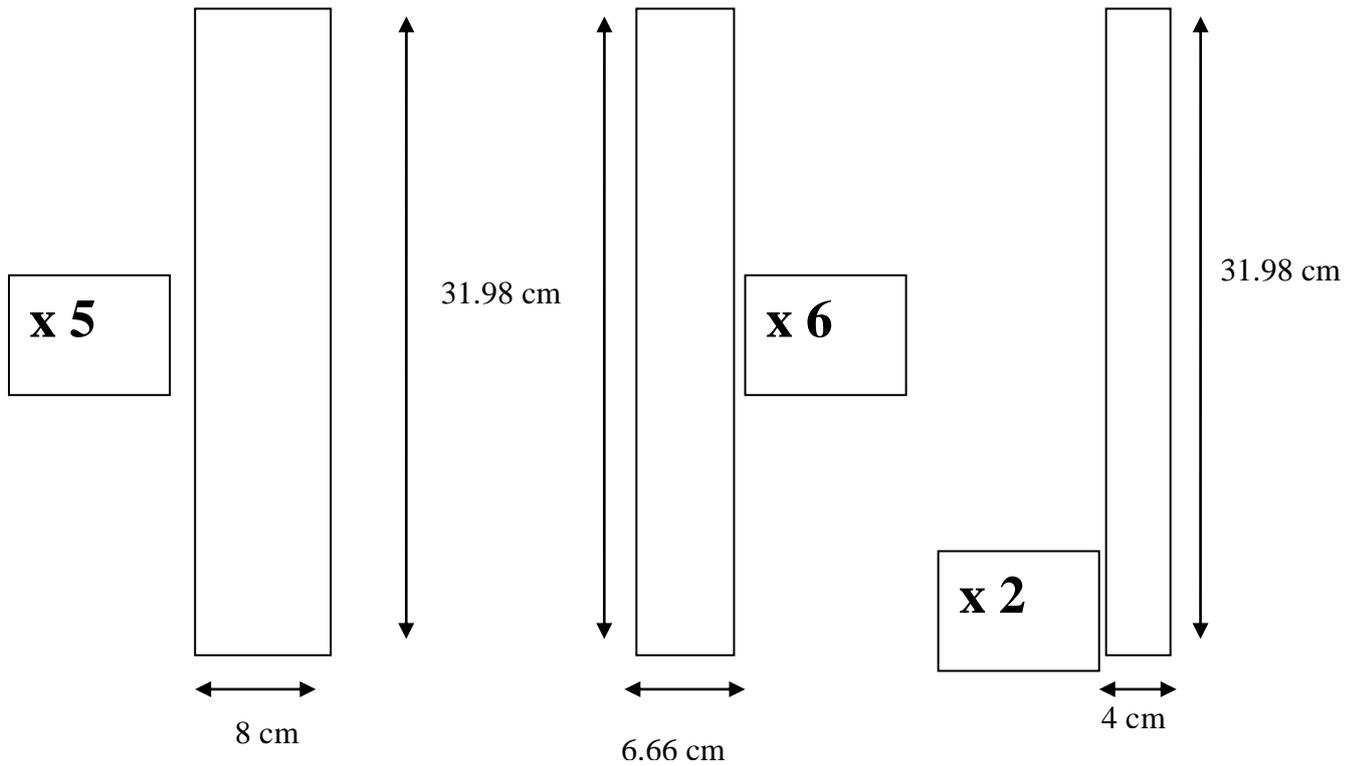
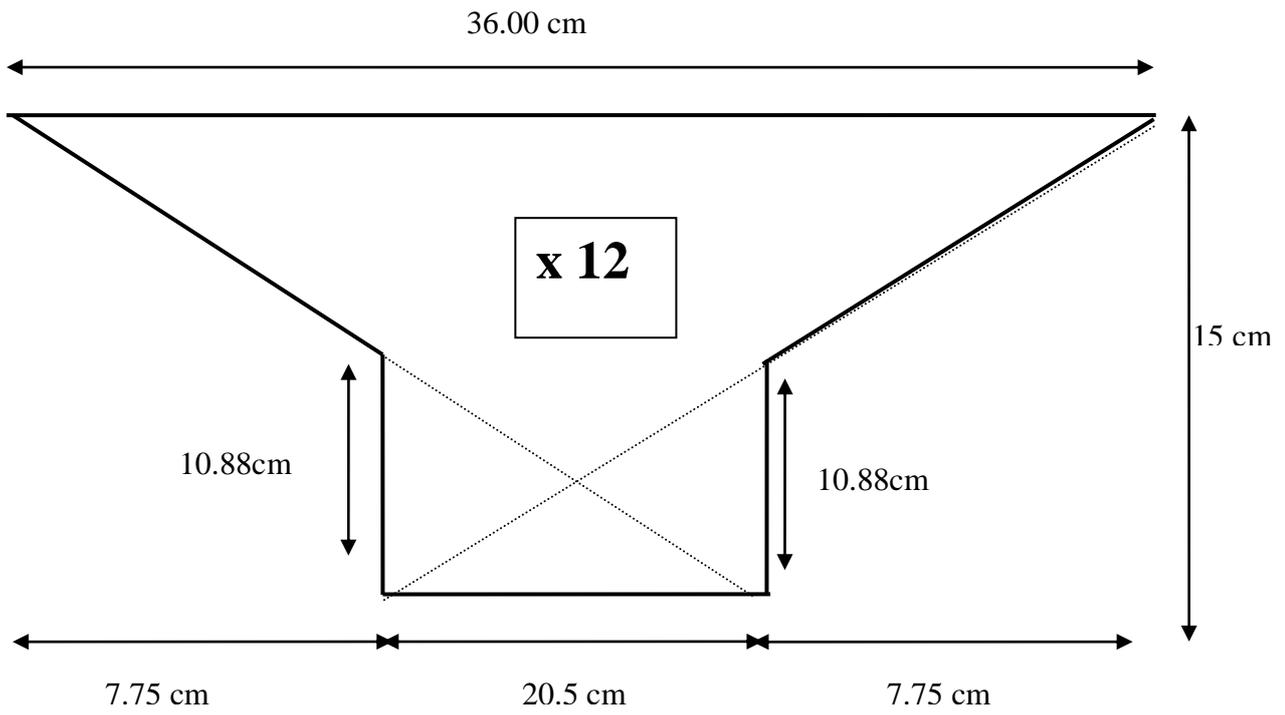


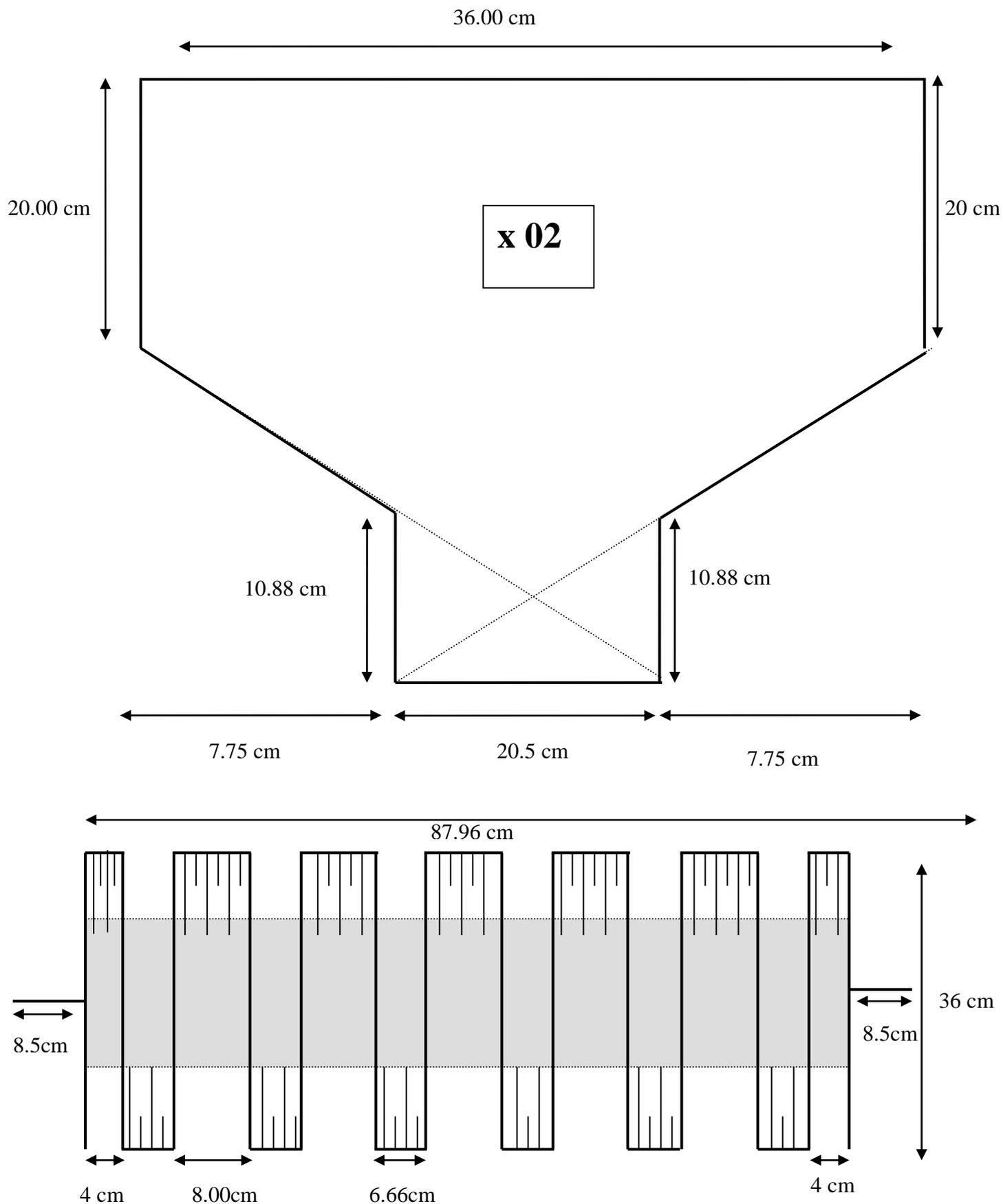
**Figure 02: Configuration géométrique détaillée du déversoir en labyrinthe développé triangulaire - Modèle D13**





**Figure 03: Configuration géométrique détaillée du déversoir en labyrinthe développé  
Trapézoïdale - Modèle D14**





**Figure 04: Configuration géométrique détaillée du déversoir en labyrinthe développé avec paroi latérale court (B=36cm) - Modèle D12**



**Figure 05: Vue en plan du déversoir non rectiligne creusé**



**Figure 06: Ecoulement sur le déversoir non rectiligne creusé**



**Figure 07: Présence des corps flottants sur le déversoir non rectiligne creusé**



**Figure 08: Forme en plan du déversoir en labyrinthe développé triangulaire**



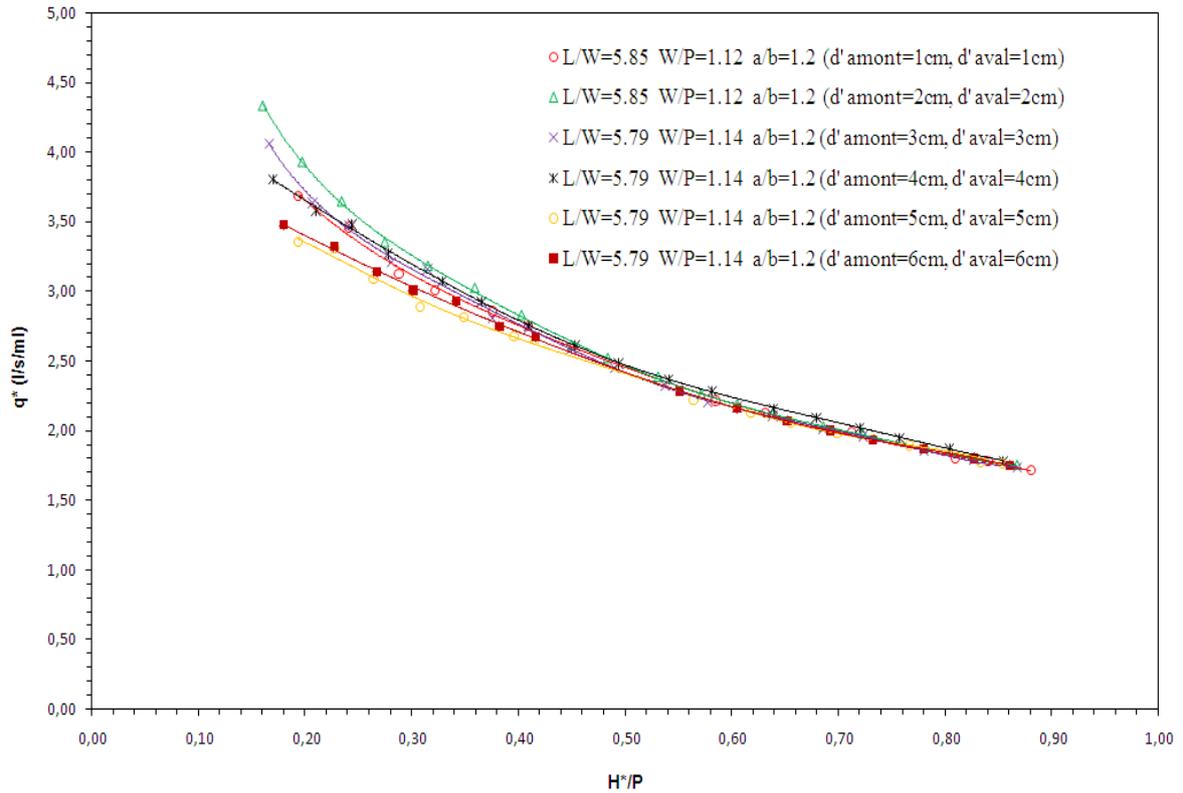
**Figure 09: Ecoulement sur le déversoir en labyrinthe développé triangulaire**



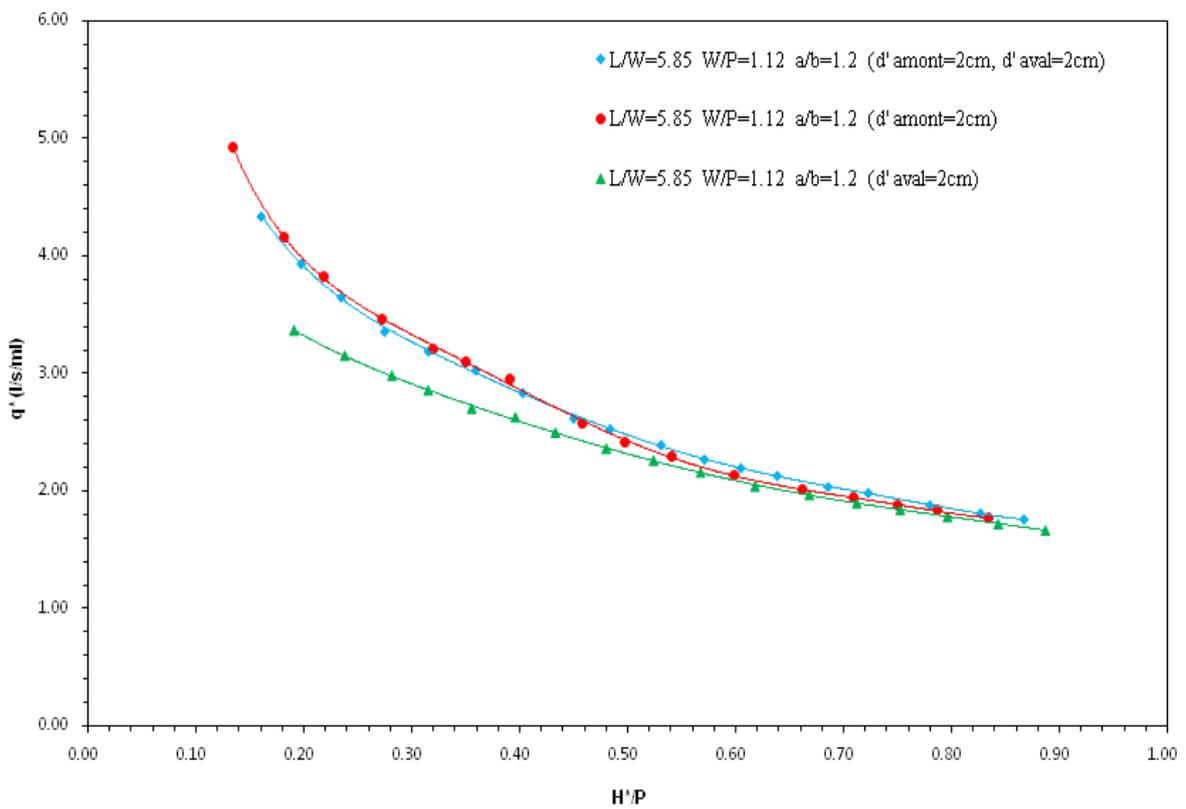
**Figure 10 : Forme en plan du déversoir en labyrinthe développé trapézoïdale**



**Figure 11 : Ecoulement sur le déversoir en labyrinthe développé trapézoïdale**



**Figure 12: Courbes de la performance en fonction de la profondeur de creusement des alvéoles**



**Figure 13: Courbes de la performance en fonction de l'endroit de creusement des alvéoles**

Q	h	Hm	V2/2g	H*	H*/P	Cw
29.8	21.95	2.65	0.0091	2.66	0.18	1.506
37.84	22.55	3.25	0.0137	3.26	0.22	1.407
44.75	23.05	3.75	0.0181	3.77	0.25	1.341
51.85	23.6	4.30	0.0230	4.32	0.29	1.264
60.75	24.15	4.85	0.0298	4.88	0.33	1.235
68.26	24.75	5.45	0.0355	5.49	0.37	1.165
76.48	25.45	6.15	0.0417	6.19	0.41	1.088
84.5	26.15	6.85	0.0476	6.90	0.46	1.022
91.64	26.8	7.50	0.0528	7.55	0.50	0.968
98.92	27.4	8.10	0.0584	8.16	0.54	0.930
106.95	28.1	8.80	0.0643	8.86	0.59	0.888
115.07	28.7	9.40	0.0708	9.47	0.63	0.865
124.28	29.35	10.05	0.0784	10.13	0.68	0.845
131.27	30.05	10.75	0.0828	10.83	0.72	0.807
139.87	30.8	11.50	0.0887	11.59	0.77	0.777
147.89	31.65	12.35	0.0931	12.44	0.83	0.739
154.7	32.15	12.85	0.0983	12.95	0.86	0.728
161.84	32.85	13.55	0.1024	13.65	0.91	0.703
170.59	33.55	14.25	0.1084	14.36	0.96	0.687

**Tableau 01: Exemple de présentation de résultats des essais sur modèles réduits**

