

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed khider –Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie civil et d'Hydraulique  
Référence : ...../2020



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم الهندسة المدنية و الري  
المرجع ...../2020

## Mémoire de Master

Filière : Hydraulique

Spécialité : Hydrauliques Urbaine

Thème

**Etude expérimentale du déversoir en tôle fusible.**

Nom et Prénom de l'étudiant :

Ouardjak Aymen

Encadreurs :

Ouamane Ahmed  
Sekkour Ilyese

Année universitaire : 2019 - 2020

## **Résumé**

Dans la plupart des pays à climat aride ou semi-aride, les barrages sont affectés d'une part par un envasement précoce de leurs retenues et d'autre part une insuffisance de la capacité des évacuateurs de crues. Ces deux challenges engendrent simultanément une réduction de la capacité de stockage et affecte la sécurité du barrage (Ouamane, 2006).

L'une des solutions possibles pour ces deux problèmes correspond à la réhabilitation de l'évacuateur de crues en faisant surélever le seuil du déversoir par des dispositifs fusibles pour augmenter la capacité du stockage ou le débit à évacuer.

Plusieurs alternatives ont été inventées ces dernières années, parmi lesquelles les hausses fusibles et les blocs fusibles qui permettent de compenser la capacité de stockage perdue et d'augmenter le degré de sécurité des barrages existants.

Les tôles pliantes représentent une nouvelle solution économique des déversoirs auto-stables, Le principe de ce système est de fixer des tôles métalliques indépendantes les unes des autres, côte à côte sur le seuil du déversoir. Ces éléments ont des caractéristiques un peu différentes les unes des autres, ce qui entraîne le pliage total de chaque élément pour un niveau d'eau amont différent. Ainsi le débit aval augmente donc progressivement.

Le présent travail représente une contribution à l'étude théorique et expérimentale de ce type de solution dans le but de mieux comprendre le fonctionnement du déversoir en tôles pliantes et d'essayer de trouver une approche pour le pré-dimensionnement de ce type de déversoir.

**Mots clés :** Barrage, capacité de stockages, déversoir, dispositifs fusibles, tôles pliantes, déversoirs auto-stables.

## **Abstract**

In most countries with an arid or semi-arid climate, dams are affected by early siltation of their reservoirs and insufficient spillway capacity. These two challenges simultaneously lead to a reduction in storage capacity and affect dam safety (Ouamane, 2006).

One possible solution to these two problems is to rehabilitate the spillway by raising the spillway sill by means of fusible devices to increase the storage capacity or the flow to be discharged.

Several alternatives have been invented in recent years, including fusegates and fuse plugs, which make it possible to compensate for lost storage capacity and increase the degree of safety of existing dams.

Fuses metal plate are a new and economical solution for self-stable weirs. The principle of this system is to fix independent metal plates, side by side on the weir sill. These elements have slightly different characteristics from each other, which results in the total folding of each element for a different upstream water level. Thus the downstream flow increases progressively. The present work represents a contribution to the theoretical and experimental study of this type of solution in order to better understand the operation of the Fuses metal plate weir and to try to find an approach for the pre-dimensioning of this type of weir.

**Key words:** dam, storage capacity, weir, fuse devices, Fuses metal plate, self-stable weirs.

### ملخص

في معظم البلدان ذات المناخ الجاف أو شبه الجاف ، تتأثر السدود من ناحية بالتغير المبرر لخزاناتها ومن ناحية أخرى بسبب عدم كفاية سعة المفرغات المائية. يؤدي هذان التحديان في نفس الوقت إلى انخفاض في سعة التخزين ويؤثران على سلامة السد. (Ouamane 2006) ،

أحد الحلول الممكنة لهاتين المشكلتين هو إعادة تأهيل مفرغ الحملة عن طريق رفع عتبة السد بواسطة الأجهزة القابلة للانصهار لزيادة سعة التخزين أو التدفق الذي سيتم تفريغه.

تم اختراع العديد من البدائل في السنوات الأخيرة ، بما في ذلك حوامل الصمامات وكتل الصمامات التي تجعل من الممكن تعويض سعة التخزين المفقودة وزيادة درجة أمان السدود القائمة.

تمثل الصفائح المعدنية القابلة للطي حلاً اقتصادياً جديداً للسدود ذاتية الاستقرار ، ومبدأ هذا النظام هو تثبيت الصفائح المعدنية بشكل مستقل عن بعضها البعض جنباً إلى جنب على عتبة السد. تتميز هذه العناصر بخصائص مختلفة قليلاً عن بعضها البعض ، مما ينتج عنه طي إجمالي لكل عنصر لمستوى مياه مختلف في الخزان. وبالتالي فإن تدفق المصب يزيد تدريجياً.

يمثل هذا العمل مساهمة في الدراسة النظرية والتجريبية لهذا النوع من الحلول من أجل فهم أفضل لعملية طي الصفائح الفولاذية ومحاولة إيجاد نهج للأبعاد المسبقة لهذا النوع من المفرغات.

**الكلمات المفتاحية:** سد ، سعة التخزين ، مفرغ الحملة ، الأجهزة القابلة للانصهار ، الصفائح القابلة للطي ، المفرغات ذاتية الاستقرار.

## Remerciements

*Je remercie, et en premier lieu, Dieu tout puissant pour m'avoir donné la force, la volonté et le courage pour réaliser ce modeste travail.*

*Je tiens à adresser l'expression de mes vifs remerciements à mon promoteur du thème monsieur QUAMANE Ahmed professeur à l'université de Biskra pour le partage de sa riche expérience, ses précieux conseils, ses orientations et les qualités scientifiques et pédagogiques de son encadrement, qui ont grandement contribué à la rédaction de ce mémoire.*

*Mes sincères remerciements vont plus particulièrement à mon Co-encadreur Monsieur SEKKOUR Ilyese, Doctorant en hydraulique, Pour le suivi au cours de la réalisation de ce travail, sa disponibilité, son soutien et son extrême gentillesse.*

*Un remerciement très spécial à mon enseignant. Docteur en hydraulique, mon frère LAYADI Adil pour sa serviabilité et ses encouragements depuis notre première rencontre.*

*Je remercie mon professeur, LOUGHRAICHI Yazid, un homme que je respecte beaucoup et Je lui souhaite tout le meilleur pour l'avenir.*

*Je voudrais exprimer mes gratitude et respects aux membres du jury, et j'adresse un grand merci à mes enseignants, à mes collègues et à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.*

*Merci à tous*

*DÉDICACES*

*Avec l'aide et la protection d'ALLAH*

*s'est réalisé ce modeste travail*

*Je dédie ce travail à :*

*Toute ma famille*

*Mes amis*

*Mes camarades de promo d'hydraulique*

*Et tous ceux qui ont connu*

*OURDJAK Aymen*

## Table des matières

Introduction générale	01
-----------------------	----

### CHAPITRE I

#### **Etat des connaissances sur les déversoirs Auto stables**

I.1 Introduction	03
I.2 Déversoirs auto stables	03
I.2.1 Différents types des déversoirs auto-stables	03
I.2.2 Les hausses fusibles	04
I.2.2.1 définition	04
I.2.2.2 Description d'une hausse	04
I.2.2.3 La hausse	05
a. Les hausses fusibles à seuil labyrinthe	05
b. Les hausses fusibles à seuil droite	07
b.1 Les hausses destinées à supporter de très fortes lames d'eau	07
b.2 Les hausses spéciales dites "grand froid"	08
b.3 Les fusibles de sécurité	08
I.2.2.4 Le puits d'alimentation	10
I.2.2.6 La chambre de mise en pression	10
I.2.3 L'objectif des hausses fusibles	11
I.2.3.1 Augmentation de la capacité des barrages	11
I.2.3.2 Amélioration de la sécurité des évacuateurs de crues	11
I.2.3.3 Sécurisé un système vanné	12
I.2.3.4 Maitriser les crues de rivière	12
I.2.4 Le principe de fonctionnement	13
I.2.4.1 Caractéristiques du débit	13
I.2.4.2 Stabilité des hausses fusibles	15
I.2.4.3 Principes de dimensionnement	16
a. Dimensionnement hydraulique	16
b. Dimensionnement mécanique	16
I.2.4.4 Analyse de la stabilité	17
a. Stabilité au renversement	17

b. Stabilité au glissement	18
I.2.4.4 Analyse de la stabilité	
I.2.5 Les Blocs fusibles	21
I.2.5.1 Définition	21
I.2.5.2 Les blocs fusibles avec sous-pression	21
I.2.5.3 Construction des blocs fusibles	23
I.2.5.4 Méthode développés pour le dimensionnement du bloc fusible	26
I.2.5.5 La relation entre la hauteur de basculement et largeur du bloc	26
I.2.5.6 Effet de la disposition des blocs sur le seuil selon leur largeur	27
I.2.6 Autres dispositifs fusibles	29
I.2.6.1 Les hausses rabattables	30
I.2.6.2 Flashboard	30
I.2.6.3 Digues fusibles	31
I.2.6.4 Les vannes automatiques	32
I.2.6.5 Les boudins gonflables	33
I.2.6.6 Les Murs en « L »	35
I.2.7 CONCLUSION	36

## **CHAPITRE II**

### **Etude théorique pour le dimensionnement des tôles pliantes**

II.1 Introduction	37
II.2 Description des tôles pliantes	37
II.3 Objectif de conception des tôles pliantes	38
II.3.1 Augmentation de la capacité des barrages	38
II.3.2 Amélioration de la sécurité des évacuateurs de crues	39
II.4 Principe de fonctionnement des tôles pliantes	39
II.5 Pré-dimensionnement des tôles pliantes	41
II.5.1 Hauteur des tôles pliantes	41
II.5.2 Epaisseur des tôles pliantes	41
II.5.3 Calcul théorique pour le dimensionnement d'une tôle pliante	42
II.6 Conclusion	43

## CHAPITRE III

### Etude théorique et expérimentale sur modèles réduits des tôles pliantes

III.1 Introduction	44
III.2 Description de la station expérimentale	44
III.2.1 Appareillage de mesure du débit qui transite le canal	46
III.2.2 Appareillages de mesure des hauteurs d'eau	47
a) Les tubes piézomètres	47
b) Les capteurs des niveaux	48
III.3 Dispositif expérimental	49
III.3.1 Modèles réduits des tôles pliantes	49
III.3.2 Socle de pliage des tôles	49
III.4 Déroulement des essais	50
III.4.1 Préparation du modèle	50
III.4.2 Démarrage des essais	50
III.5 Résultats des essais et interpretation	51
III.5.1 La relation entre la charge d'eau et la hauteur plie	51
III.6 Conclusion	57
Conclusion générale	58
Références bibliographique	61

## Table des Figures

### CHAPITRE I

#### Etat des connaissances sur les déversoirs Auto stables

Figure I.1 vue amont d'une hausse labyrinthe	05
Figure I.2 Les hausses fusibles à seuil labyrinthe	05
Figure I.3 Hausse labyrinthe à faible lame déversante	06
Figure I.4 Hausse labyrinthe à lame déversante modérée	07
Figure I.5 Hausse labyrinthe à forte lame déversante	07
Figure I.6 vue amont des hausses à crête rectiligne	08
Figure I.7 vue aval des hausses grand froid	08
Figure I.8 type de hausses utilisées en fonction du rapport h/H	09
Figure I.9 puits d'alimentation solidaire de la hausse (en acier)	10
Figure I.10 Augmentation de la capacité des barrages	11
Figure I.11 Amélioration de la sécurité des évacuateurs de crues	12
Figure I.12 Hausse fusible avec déversement sur la crête pour une crue modérée	13
Figure I.13 Hausse fusible avec déversement est remplissage du puits pour une crue importante	13
Figure I.14 Hausse fusible avec mise en pression de la chambre et basculement	14
Figure I.15 Les moments appliqués sur la hausse fusible	15
Figure I.16 Forces agissant sur une hausse fusible	17
Figure I.17 Moments dans la hausse fusible Model WLH	18
Figure I.18 Vue en perspective d'un déversoir Blocs fusibles	21
Figure I.19 Les deux types de blocs fusibles	22
Figure I.20 Géométrie d'un bloc fusible avec sous-pression	23
Figure I.21 Disposition générale et murs séparateurs	23
Figure I.22 blocs fusibles sur un seuil avec des murs séparateurs	24
Figure I.23 Diagramme de stabilité	24
Figure I.24 bloc fusible placé sur un seuil après un arasement	25
Figure I.25 phases de placement du bloc sur un seuil	25
Figure I.26 Schéma de calcul de stabilité du bloc fusible (Sekkour.I)	26

Figure I.27 Courbe pratique de la variation de la charge de basculement en fonction de la largeur de bloc (Sekkour.I)	27
Figure I.28 Courbe théorique de la variation de la charge de basculement en fonction de la largeur de bloc (Sekkour.I)	27
Figure I.29 Variation de la hauteur de basculement en fonction de la variation du poids volumique (Sekkour.I)	28
Figure I.30 Comparaison entre la charge théorique et pratique (Sekkour.I)	28
Figure I.31 Schéma d'alignement d'une série de trois blocs sur le seuil	29
Figure I.32 Hausses rabattables (Hydroplus)	30
Figure I.33 Déversoir Flashboard (Etats-Unis)	31
Figure I.34 Déversoir digue fusible (France)	32
Figure I.35 Schéma d'une vanne automatique (Hydroplus – France)	32
Figure I.36 Barrage anti-sel de 1969 avec son boudin gonflable	33
Figure I.37 Barrage Milner avec les murs en L –USA	34

## **CHAPITRE II**

### **Etude théorique pour le dimensionnement des tôles pliantes**

Figure II.1 Schéma descriptif d'une tôle pliante	38
Figure II.2.a Tôle pliante fonctionne comme un barrage	39
Figure II.2.b Tôle pliante fonctionne comme un déversoir avant le déversement	40
Figure II.2.c Tôle pliante fonctionne comme un déversoir après le déversement	40
Figure II.2.d Tôle pliante effaçable	41
Figure II.3 Schéma de calcul du pliage de la tôle	42

## CHAPITRE III

### Etude théorique et expérimentale sur modèles réduits des tôles pliantes

Figure III.1 Vue d'ensemble de la station d'expérimentation	44
Figure III.2 Schéma de station d'expérimentation. (Vue en plan)	45
Figure III.3 Schéma du dispositif expérimental (Vue de profil)	45
Figure III.4 Vue aval du bassin des essais de la station d'expérimentation	46
Figure III.5 Débitmètre à ultrason Flowmeter 93W2	47
Figure III.6 Débitmètre électromagnétique	47
Figure III.7 Tableaux des manométriques de mesure des niveaux d'eau	48
Figure III.8 Capteur de niveau PROSONIC T	48
Figure III.9 Déversoir à seuil libre	49
Figure III.10 Vue aval du déversoir porté une tôle pliante	50
Figure III.11 Vue amont du déversoir porté une tôle pliante	50
Figure III.12 Tableau de lecture de charge et de hauteur de la tôle	51
Figure III.13 Pliage partiel de la tôle après le déversement	52
Figure III.14 Courbes pratiques de la variation de la charge d'eau et la hauteur plie en fonction de débit pour épaisseur $e=0,7(\text{mm})$	55
Figure III.15 Courbes pratiques de la variation de la charge d'eau et la hauteur plie en fonction de débit pour épaisseur $e=1,2\text{mm}$	57

## Liste des Tableaux

### CHAPITRE I

#### Etat des connaissances sur les déversoirs Auto stables

Tableau I.1 la marge de basculement en fonction du rapport largeur/hauteur	06
--	----

### CHAPITRE III

#### Etude théorique et expérimentale sur modèles réduits des tôles pliantes

Tableaux III.1 Charges d'eau et hauteurs de tôles avant le déversement	52
<b>Tableaux III.2</b> Charges d'eau et hauteurs de pliage pratiques obtenus pour une tôle d'épaisseur e=0,7mm	52
<b>Tableaux III.3</b> Charges d'eau et hauteurs plies pratiques obtenus pour une tôle d'épaisseur e=1,2mm	53

## NOTATIONS

A	: Demi-longueur des parois frontales (m)
$A_c$	: Surface de la chambre du fond (m <sup>2</sup> )
B	: Largeur de la crête (m)
b	: Largeur du déversoir (m)
b	: largeur du bloc (m)
B	: Longueur du mur latéral (m)
$C_d$	: Coefficient de débit
$C_e$	: Coefficient de correction
D	: Hauteur aval des parois(m)
e	: Epaisseur de la tôle (mm)
F <sub>g</sub>	: Force nette manifestée par le poids du godet et la base (N)
g	: Accélération de la pesanteur (m/s <sup>2</sup> )
G	: Poids propre du bloc (N)
$G_e$	: Poids de l'eau sur le sommet du bloc (N)
h	: Hauteur d'eau à l'amont du tôle par rapport au seuil du déversoir (m)
h	: Hauteur d'eau amont (m)
h	: Hauteur d'eau à l'amont par rapport au seuil du bloc (m)
h	: Différence entre le niveau d'eau dans le réservoir et le niveau de la crête (m)
h'	: Hauteur d'eau à l'aval par rapport au seuil du bloc (m)
$\bar{h}_{pr}$	: Hauteur moyenne calculée pour une série d'essais d'un bloc (m)
H	: Hauteur piézométrique en amont (m)
H	: Hauteur de la hausse fusible (m)
H	: Hauteur du bloc (m)
H	: Hauteur de la tôle (m)
H <sub>p</sub>	: Hauteur plie de la tôle (m)
H'	: Charge totale sur le déversoir à seuil porté des blocs (m)
H <sub>o</sub>	: Charge totale de chute (m)

## Notations

---

Hd	: Hauteur piézométrique en aval (m)
Hw	: Profondeur d'eau dans le puits (m)
Kr	: Coefficient de stabilité
L	: Longueur du bloc (m)
L	: Longueur d'un cycle de crête (m)
Lc	: Longueur de la crête de la hausse fusible (m)
Lw	: Longueur du puits (m)
M <sub>G</sub>	: Moment du Poids propre du bloc (N.m)
M <sub>Ge</sub>	: Moment du Poids de l'eau sur le sommet du bloc (N.m)
M <sub>P</sub>	: Moment de la Pression hydrostatique appliquée sur sa face amont du bloc (N.m)
M <sub>W<sub>∞</sub></sub>	: Moment de la Pression exercée par l'eau sur la base du bloc (N.m)
P	: Hauteur amont des parois (m)
P	: Pression hydrostatique appliquée sur sa face amont du bloc (N)
Q	: Débit qui transite sur le déversoir (m <sup>3</sup> /s)
Re	: Nombre de Reynolds,
T	: Epaisseur du mur (m)
v <sub>1</sub> , v <sub>2</sub>	: Vitesses d'écoulement dans le prototype et le modèle (m/s)
V <sub>b</sub>	: Volume d'eau dans le godet (m <sup>3</sup> )
V <sub>c</sub>	: Volume du matériau dans la base (m <sup>3</sup> )
V <sub>S</sub>	: Volume du matériau dans le godet (m <sup>3</sup> )
W	: Largeur de cycle (m)
w	: Hauteur de déversoir du fond du canal jusqu' à la crête (m)
W	: Largeur de la hausse fusible (m)
W <sub>w</sub>	: Largeur du puits (m)
W <sub>∞</sub>	: Pression exercée par l'eau sur la base du bloc (Sous-pression)
XG	: Bras de levier de la force de du poids de l'eau (m)
XG <sub>e</sub>	: Bras de levier de la force de du poids de bloc (m)
YP	: Bras de levier de la force hydrostatique (m)
XW	: Bras de levier de la force de sous pression (m)
X <sub>w<sub>∞</sub></sub>	: Bras de levier de la force de Pression exercée par l'eau sur la base du bloc
Y <sub>b</sub>	: Bras de levier de la force de l'eau dans le godet (m)

## Notations

---

- YC : Bras de levier du matériau dans la base (m)
- Yg : Bras de levier de la base et du godet (m)
- YS : Bras de levier du matériau dans le godet (m)
- Yu : Bras de levier au centre de gravité de la pression (m)
- Yw : Bras de levier de la force de l'eau dans le puits (m)
- $\gamma$  : Poids volumique d'eau (kg/m<sup>3</sup>)
- $\gamma_b$  : Poids volumique du béton (kg/m<sup>3</sup>)
- $\alpha$  : Angle du mur (°)
- $\rho_c$  : Densité du matériau dans la base (kg/m<sup>3</sup>)
- $\rho_s$  : Densité du matériau dans le godet (kg/m<sup>3</sup>)
- $\rho_w$  : Densité d'eau (kg/m<sup>3</sup>)

# Introduction Générale

## **Introduction générale**

Les barrages-réservoirs sont confrontés durant leur vie à deux problèmes fondamentaux, l'un est la difficulté de l'évacuation des eaux de crues extrêmes et l'autre est la perte de la capacité de stockage des retenues par l'envasement.

L'évacuateur de crue représente l'ouvrage principal de protection du barrage contre les effets des crues, il y a lieu de savoir que le bon fonctionnement hydraulique de cet ouvrage nécessite la construction d'évacuateur à dimensions importantes. Cependant, le coût de cet ouvrage reste une préoccupation majeure pour les concepteurs.

Il est possible d'optimiser les dimensions des évacuateurs de crues et la réhabilitation des ouvrages existants et de même réduire le coût de réalisation. Dans ce contexte, il existe plusieurs dispositifs auto-stables qui permettent l'évacuation à grand débit tel que les hausses fusibles et les blocs fusibles.

Parmi les nouvelles techniques utilisées dans le domaine de la sécurité des barrages, on distingue l'innovation des déversoirs auto-stables, cette technique constitue une solution appréciable et intéressante, car elle permet d'accroître la capacité de la retenue et/ou stocker une quantité supplémentaire d'eau avec une bonne gestion du transport solide et d'évacuation des crues.

Un nouveau dispositif a été mis au point récemment qui présente une nouvelle solution économique et simple de déversoir auto-stable baptisé tôle pliante ou tôle fusible, ce dispositif peut devenir une alternative efficace, en raison de la facilité de réalisation et le coût réduit des matériaux de fabrication.

La technique des tôles pliantes permet dans un premier temps l'augmentation de la capacité de stockage et dans un second temps l'évacuation d'un grand débit après le pliage partiel ou total des tôles pendant les crues exceptionnelles.

Le principe de ce système est de fixer des tôles sur le seuil du déversoir. Ce qui entraîne le pliage total de chaque élément pour un niveau d'eau amont différent. Ainsi le débit aval augmente donc progressivement.

L'objectif de cette étude est de mieux comprendre le fonctionnement du déversoir en tôles pliantes et d'essayer de trouver une approche pour le pré-dimensionnement de ce type de déversoir.

Pour atteindre l'objectif souligné, le présent travail a été divisé en trois chapitres présentés comme suit :

Le premier chapitre présente une étude bibliographique, concernant en particulier les déversoirs auto-stable. Cette première partie de l'étude a pour objectif de présenter une synthèse des principaux travaux effectués dans le domaine.

Le second chapitre représente une étude théorique prenant en compte les caractéristiques des tôles pour aboutir à une relation mathématique simple de dimensionnement des tôles fusibles.

Le troisième chapitre se rapporte à une étude expérimentale sur des modèles réduits de tôles métalliques pour faire une confrontation des résultats obtenus théoriquement avec ceux obtenus expérimentalement et finalement une conclusion générale sur le travail réalisé.

# Chapitre I

Etat des Connaissances sur Les  
Déversoirs Auto stables

## CHAPITRE I

### ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES DÉVERSOIRS AUTO STABLES

#### I.1 INTRODUCTION

Les déversoirs de barrages connus depuis de longues années des travaux d'élévation pour le but d'augmenter le volume d'eau stockée, dans lequel des différents dispositifs ont été utilisés comme des hausses effaçables lors des crues.

Ces systèmes ont été remplacés par des vannes rester dans la position fermée pour maintenir le niveau d'eau dans la retenue à la plus haute eau, dans le cas de crues ces vannes sont ouvert pour permettre le passage le débit requis, Cependant, une défaillance mécanique ou humaine peut entraîner la non ouverture des vannes et une submersion du barrage, ce qui conduit un risque sur la sécurité des barrages. De plus le fonctionnement des vannes nécessite de l'énergie et la maintenance doit être coûteuse.

Pour ces raisons la pensée était de trouver des dispositifs alternatives de surélévation qui peuvent résister les crues faibles et moyennes, d'une part, et pour garder la sécurité du barrage d'une autre part, ont conduit à inventer des déversoirs auto-stable, qui collecte les avantages des déversoirs vannés et les systèmes effaçables, ces déversoirs auto-stables ont rencontré une attention considérable depuis son apparition, tel que les hausses fusibles et les blocs fusibles sont actuellement en phase utilisation.

Dans cet axe on a fait une étude sur les déversoirs auto-stables d'une manière qui nous aide à la connaissance des tôles pliantes dont t'ils font l'objet de cette 'étude.

#### I.2 Déversoirs auto stables :

##### I.2.1 Différents types des déversoirs auto-stables

Les déversoirs auto-stables présentent une structure construite pour stocker ou évacuer un volume supplémentaire de l'eau et d'accroître la performance d'un déversoir existant.

Ces déversoirs sont classifiés, selon leur 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.

## **I.2.2 Les hausses fusibles :**

### **I.2.2.1 définition :**

Parmi les différents dispositifs d'élévation, les hausses fusibles ont pris une grande partie d'étude et de Sollicitude, ce système a été inventé par François Lempérière en 1989, puis a été breveté par Hydroplus aux Etats-Unis, en Europe et la plupart des autres pays, il a été en usage à ce jour au niveau de plus de 40 barrages dans plusieurs pays.

C'est un système simple, robuste et sûr, qui est équivalent d'un bouchon fusible, utilisé pour l'augmentation du volume de stockage dans les retenues et les barrages ou d'augmenter la capacité d'évacuation des déversoirs (Degoutte, 2012).

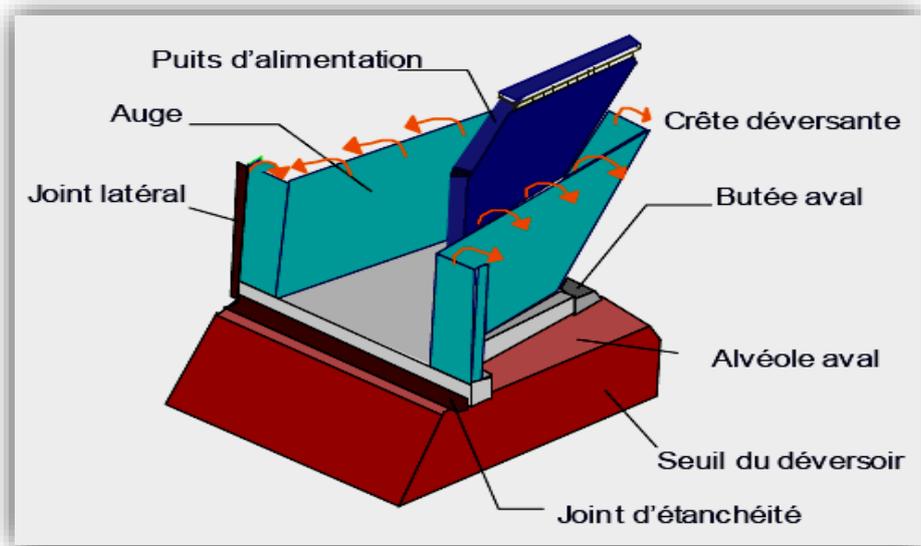
Les hausses fusibles sont des modules indépendants placés sur le seuil libre du déversoir de manière à former un rideau étanche, dont 'il permet de relever le niveau normal de la retenue. Les modules sont maintenus en place par gravité, l'étanchéité est assurée par des joints, d'une part entre les hausses et le seuil et, d'autre part, entre les faces verticales des hausses, Les hausses sont munies à des butées au rebord aval pour empêcher le glissement afin de rester stables sous la poussée de l'eau.

L'originalité du dispositif tient avant tout dans les conditions de basculement, ce dernier est provoqué automatiquement, à une cote précise, prédéterminée par la mise en charge d'une chambre aménagée à la base des éléments, Un puits d'entrée sur le côté amont de la crête hausses fusibles évacue de l'eau dans la chambre, des purges drainent leurs interfaces avec le seuil évitant ainsi une mise en pression accidentelle.

Dans des conditions normales de fonctionnement, les hausses fusibles agissent comme une barrière étanche. Pour des niveaux modérés de réservoir, l'eau coule simplement dessus de la crête hausses fusibles comme il le ferait sur un déversoir libre, si le niveau du réservoir dépasse une valeur prédéterminée, l'eau s'écoule dans le puits d'entrée et provoque une pression de soulèvement se développe dans la chambre qui déstabilise la hausse fusible et la fait basculer.

### **I.2.2.2 Description d'une hausse fusible :**

Chaque hausse fusible est constituée de quatre parties : l'auge (la hausse), l'entonnoir ou puits d'alimentation, la chambre de mise en pression au contact du seuil et le lest. Chacune de ces parties peut avoir une configuration différente en fonction des exigences demandées.



**Figure I.1** vue amont d'une hausse labyrinthe.

### I.2.2.3 La hausse :

Divers modèles de hausses sont spécifiques de chaque projet. Les hausses varient en dimensions, en formes, en poids et ainsi qu'en matériaux de fabrication.

Des hausses de deux types sont mises en œuvre, caractérisées par la forme de leur crête :

#### a Les hausses fusibles à seuil labyrinthe :



**Figure I.2** Les hausses fusibles à seuil labyrinthe.

Ces sont des hausses déversantes qui supportent des lames d'eau d'une hauteur comprise entre 30% et 150% de leur propre hauteur.

La hausse est constituée d'un caisson ouvert vers l'amont dont la crête a une forme de labyrinthe. Cette disposition permet l'écoulement des crues modérées sous une hauteur de lame déversante réduite. La longueur développée du labyrinthe est environ 3 fois celle du seuil.

La hauteur de la hausse est couramment fonction de l'objectif recherché. Cette hauteur est en général de l'ordre de 40% à 80% de la hauteur de la lame déversante en l'absence de hausse.

Trois configurations standard sont disponibles et sont fonction de la hauteur de la hausse, large (W : wide) ou étroite (N : narrow) et suivant la marge de basculement déterminé par un entonnoir bas (LH : low head), élevé (HH : high head). Les dispositifs de chacune de ses configurations sont donnés sur le tableau I.1, suivant :

Tableau (I.1) : la marge de basculement en fonction du rapport largeur/hauteur.

	la marge de basculement (en% de hauteur de la hausse)	Rapport largeur/hauteur
Etroite entonnoir bas (NLH)	entre 30% H et 70% H	1.0 (+/- 5%)
Large entonnoir bas (LLH)	entre 30% H et 70% H	1.5 (+/- 5%)
Large entonnoir élevé (LHH)	entre 70% H et 140% H	1.8 (+/- 5%)

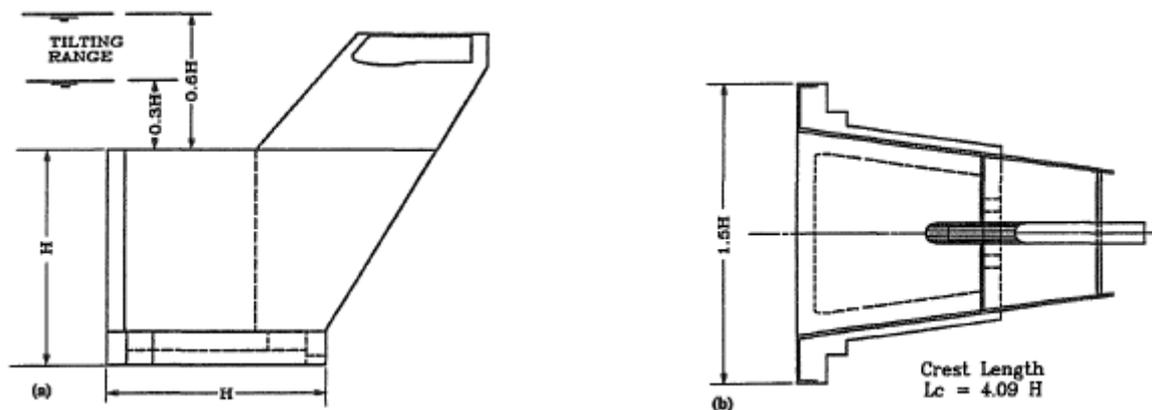
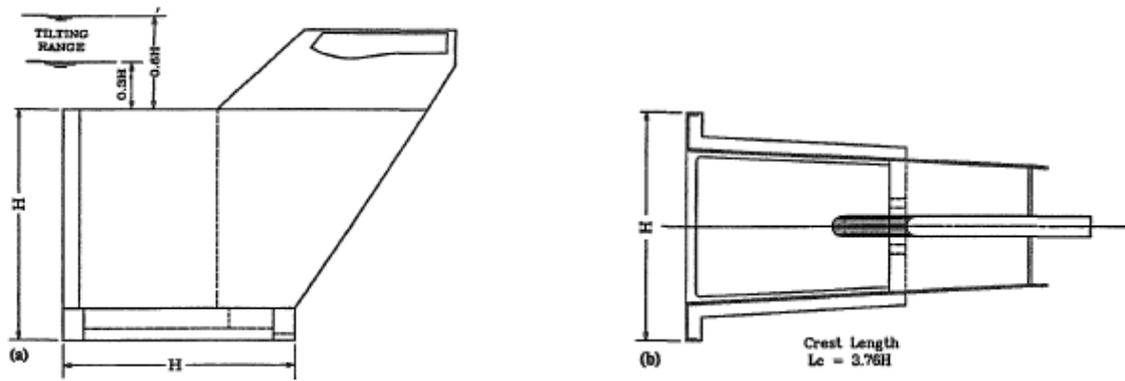
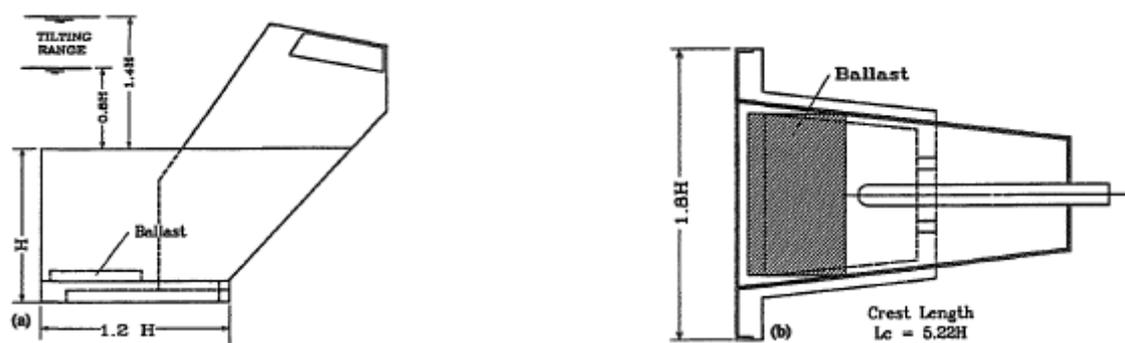


Figure I.3 Hausse labyrinthe à faible lame déversante (Falvey et al 1995) .



**Figure I.4** Hausse labyrinthe à lame déversante modérée (Falvey et al 1995).



**Figure I.5** Hausse labyrinthe à forte lame déversante (Falvey et al 1995).

Les hausses labyrinthe sont en acier ou en béton ; elles peuvent également être mixtes : auge en acier, chambre en béton. Les puits sont en acier. Toutes les parties en acier font l'objet d'un traitement anticorrosion.

Dans le cas de hausses très lourdes, ou en présence d'un accès difficile, les hausses et leurs chambres peuvent être réalisées en éléments préfabriqués assemblés sur le seuil.

#### **b. Les hausses fusibles à seuil droite :**

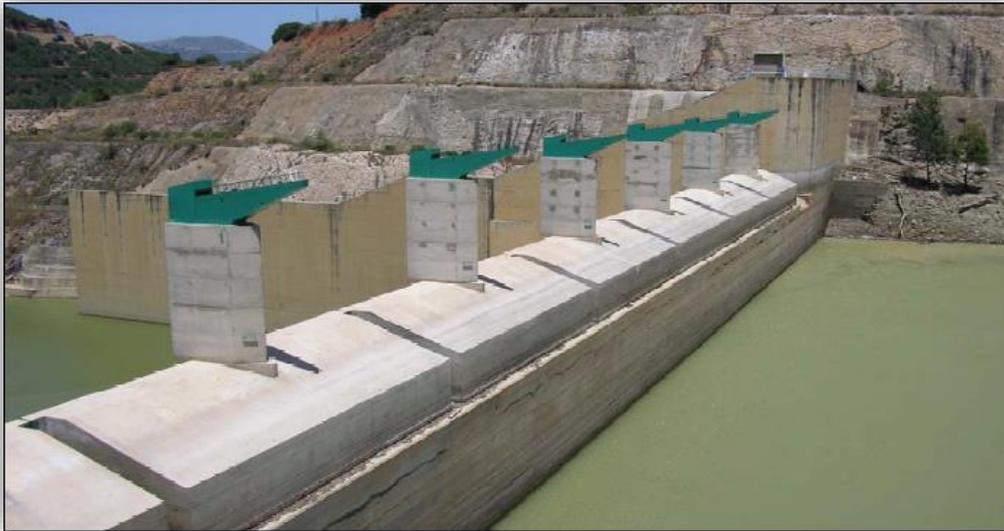
Elles sont de 3 types :

##### **b.1 Les hausses destinées à supporter de très fortes lames d'eau :**

Dans ce cas le labyrinthe perdrait une grande partie de son efficacité.

Ces hausses sont profilées de manière à obtenir le meilleur coefficient d'écoulement et sont en général construites en béton plein éventuellement coulé en place. Leur puits est en béton ou en acier. Elles peuvent être de grandes dimensions (20 m de large) et supporter des lames d'eau d'une hauteur allant jusqu'à 4 fois leur hauteur propre.

La figure (I.6), montre les hausses rectilignes du barrage de Béni Amrane en Algérie après leur construction.

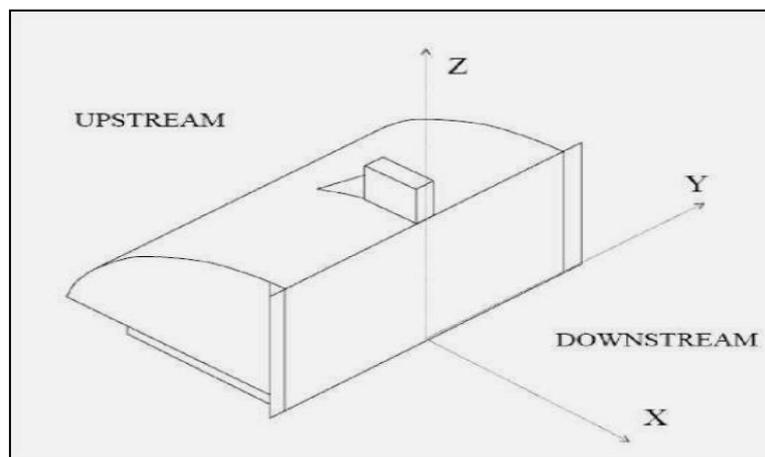


**Figure I.6** vue amont des hausses à crête rectiligne

### **b.2 Les hausses spéciales dites "grand froid" :**

Ces hausses sont conçues pour être utilisées dans des conditions de froid très sévères.

Leur face amont est profilée et spécialement revêtue de manière à réduire le frottement et l'abrasion de la glace. Très stables, ces hausses sont construites en acier ou en béton.



**Figure I.7** vue aval des hausses grand froid.

### **b.3 Les fusibles de sécurité :**

Ces hausses sont réglées pour basculer avant déversement ou à la suite d'un déversement annonceur très faible. Elles sont dans la plupart des cas associées à des vannes qu'elles assistent en cas de très fortes crues et dont elles peuvent pallier une défaillance éventuelle.

Elles peuvent être utilisées seules pour mettre automatiquement en service des bassins de stockage de crues disposés le long de grands fleuves. Leur hauteur peut varier entre un mètre et une dizaine de mètres. Elles sont généralement constituées de deux panneaux rectangulaires en acier ou en béton préfabriqué.



**Figure I.8** type de hausses utilisées en fonction du rapport h/H.

#### I.2.2.4 Le puits d'alimentation :

Le puits d'alimentation est généralement solidaire de la hausse et construit en acier. Sa partie supérieure est évasée, l'embouchure est protégée par des barreaux et surmontée d'un chapeau. Dans cette position le puits, par sa présence, participe à l'aération de la lame. Dans le cas de très fortes lames, le puits est doublé en aval par un évent d'aération. Son fût est alors construit en béton afin d'éviter les vibrations. La position du puits par rapport à la hausse et le profil de son embouchure sont adaptés à la forme des lignes d'eau.



**Figure I.9** puits d'alimentation solidaire de la hausse (en acier).

#### **I.2.2.5 Le lest:**

Par conception, l'équilibrage général des hausses est assuré, compte tenu de leur forme et de la nature des matériaux qui les constituent.

Le lest sert à compléter cet équilibrage et à ajuster la pression régnant dans la chambre au moment du basculement de chaque hausse. Il permet en particulier de différencier le comportement de chaque hausse. Il est constitué suivant les cas, de blocs de béton, d'acier, ou de fonte.

#### **I.2.2.6 La chambre de mise en pression:**

La chambre de mise en pression est solidaire à la hausse, sa base est construite en béton ou en acier. Elle est en contact en aval avec deux butées en béton ancrées dans le seuil et un dispositif d'étanchéité l'isole du réservoir amont.

Elle comporte des purges afin d'éviter la mise en pression accidentelle de la chambre due aux eaux de fuites à partir du réservoir. La section des purges est nettement inférieure à celle du puits d'alimentation de façon à provoquer à coup sûr la sous pression en cas de déversement dans le puits.

### **I.2.3 L'objectif des hausses fusibles :**

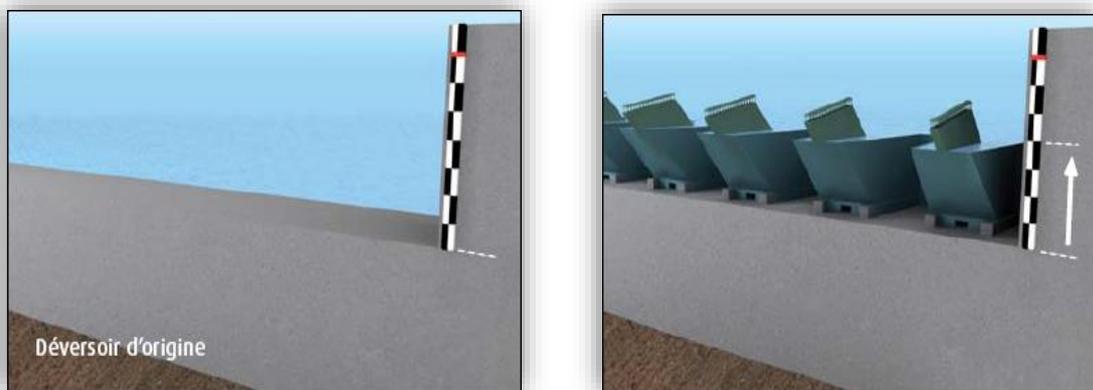
#### **I.2.3.1 Augmentation de la capacité des barrages :**

La majorité des barrages utilisés pour l'approvisionnement en eau potable et à l'irrigation sont équipés d'un évacuateur de crues à seuil libre, ce qui représente certainement la meilleure solution pour des ouvrages non gardés. En effet, le fonctionnement d'un seuil libre est fiable en toute circonstance, contrairement aux seuils vannés qui malgré la redondance des systèmes de manœuvre, ne sont jamais totalement à l'abri de pannes. L'absence de parties mécaniques limite les opérations de surveillance et d'entretien à celles portant sur le génie civil.

La contrepartie de cette sécurité est la perte d'une tranche importante de retenue comprise entre le niveau normal des eaux exceptionnelles, ce dernier servant au dimensionnement du barrage.

Cette tranche est généralement de l'ordre de 1 à 3 mètres. Elle représente un volume d'eau qui est couramment de 20 à 50% de la capacité de la retenue, et qui est d'autant plus important que le barrage est situé dans une vallée large.

Tout système permettant pour un coût raisonnable de valoriser une partie de cette tranche supérieure du plan d'eau, tout en maintenant le même niveau de sécurité de l'ouvrage, paraît donc très attractif.



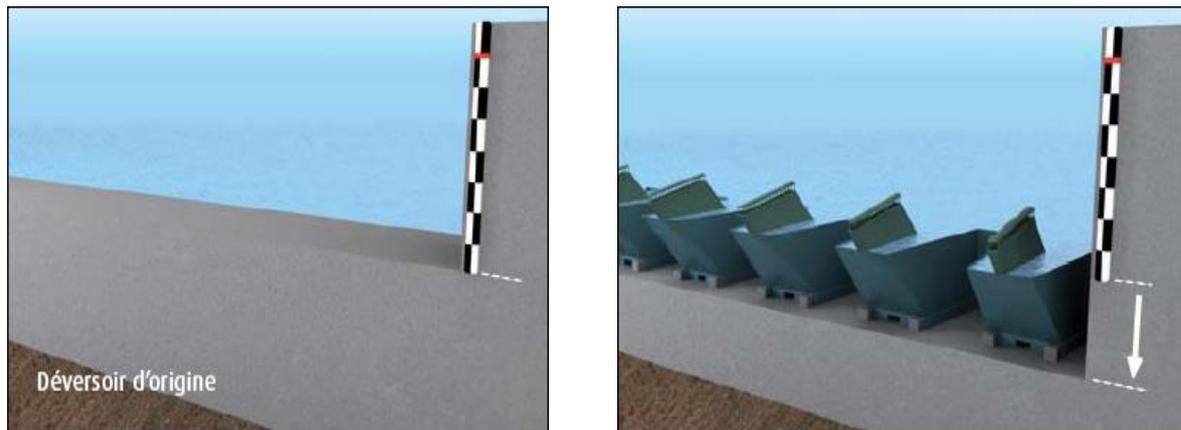
**Figure I.10** Augmentation de la capacité des barrages.

### **I.2.3.2 Amélioration de la sécurité des évacuateurs de crues :**

pour la plupart des barrages anciens, la révision de la crue de projet avec des données plus complètes et des méthodes modernes conduit souvent à augmenter la capacité de l'évacuateur de crues. de nombreuses solutions techniques sont envisageables.

lorsque le barrage est doté d'un évacuateur à seuil libre, on peut penser bien sûr à abaisser ce seuil pour augmenter la charge hydraulique et donc le débit évacué, pour autant que l'écoulement ne soit pas perturbé par l'aval. mais cet abaissement du niveau du seuil a une conséquence fâcheuse sur la capacité de la retenue qui est amputée de sa tranche supérieure.

tout dispositif permettant d'améliorer la capacité d'un évacuateur à seuil libre sans pour autant diminuer la capacité utile de la retenue est donc intéressant.



**Figure I.11** Amélioration de la sécurité des évacuateurs de crues.

### **I.2.3.3 Sécurisé un système vanné :**

Installées en complément d'un système vanné, les hausses fusibles permettent la mise en sécurité des barrages tant lors de crues exceptionnelles qu'en cas de défaillance humaine, technique ou énergétique lié au fonctionnement des vannes.

### **I.2.3.4 Maitriser les crues de rivière :**

En cas de crue exceptionnelle, les hausses fusibles installées sur un déversoir latéral de rivière, permettent de protéger des zones habitées en déviant une partie de la crue vers des bassins de stockage temporaire (polders).

### **I.2.4 Le principe de fonctionnement :**

Le procédé des hausses fusibles est d'obstruer le seuil sur une hauteur d'ordre de 1 à 3 mètres par les éléments :

Qui sont auto stables jusqu'à une certaine cote du plan d'eau amont.

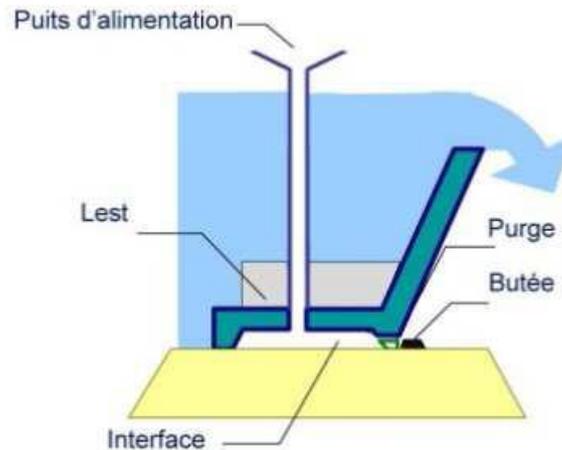
Qui s'effacent automatiquement en cas de forte crue sans intervention humaine ni alimentation en énergie.

En contrepartie, les éléments qui se sont effacés ne se relèvent pas après la crue et doivent être remplacés pour rétablir le déversoir dans son intégrité.

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

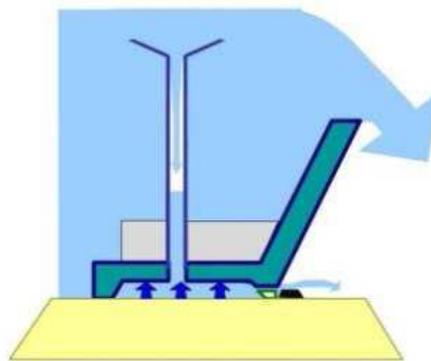
a) Lorsque le niveau de l'eau est inférieur ou égal au niveau d'arase des hausses, celles-ci fonctionnent comme un barrage.

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 de la hausse.



**Figure I.12** Hausse fusible avec déversement sur la crête pour une crue modérée.

b) Lorsque le niveau de l'eau s'élève au-dessus de la cote 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.



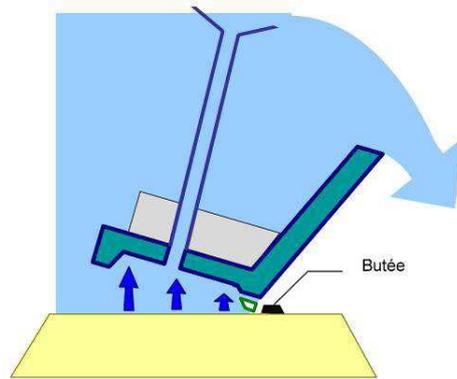
**Figure I.13** Hausse fusible avec déversement est remplissage du puits pour une crue importante.

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.

Lorsque le seuil est équipé de plusieurs hausses, les cotes d'entrée des puits sont décalées de quelques centimètres, de façon à ce que les éléments puissent, si nécessaire, basculer les uns

après les autres au fur et à mesure de la montée du plan d'eau. En cas de crue moyenne, un seul élément bascule, les autres restants en place.



**Figure I.14** Hausse fusible avec mise en pression de la chambre et basculement.

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 venir remplacer les éléments effacés afin de retrouver la pleine capacité de la retenue. Si l'accès au seuil est aisé, le remplacement des éléments basculés ne pose pas de problèmes particuliers, compte tenu de la standardisation des hausses.

#### I.2.4.1 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). Toutes les configurations des hausses ont été évaluées par le (LNH), tandis que seulement la largeur et la configuration à basse charge ont été évaluées par le (TVA). Les différences des résultats des deux laboratoires ont été de 4%. Les caractéristiques de débit sont exprimées employant le coefficient de débit ( $C_d$ ) pour les déversoirs définis par Rouse (1960):

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

Q : débit

g : accélération de l'apesanteur

$L_c$  = longueur de la crête de la hausse fusible

h = différence entre le niveau d'eau dans le réservoir et le niveau de la crête.

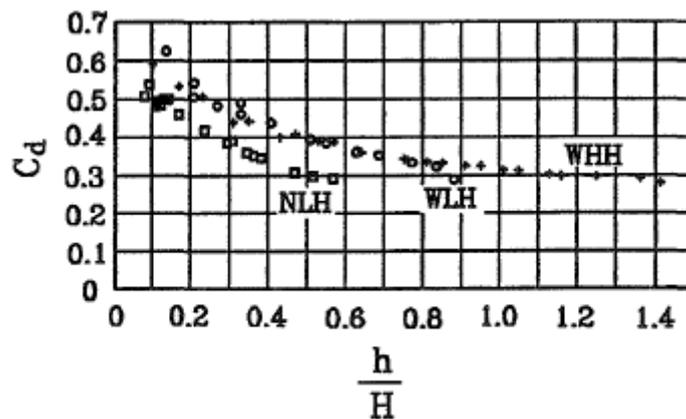
Le coefficient de débit est une fonction de la longueur de la crête de la hausse et la hauteur d'eau amont h rapportée à la profondeur totale de l'écoulement sur le seuil (Falvey, 1995).

Le coefficient de débit diminue quand la charge sur la hausse fusible augmente. La meilleure

équation convenable pour le coefficient de débit suit une loi de puissance donnée par :

$$C_d = C_1 \left( \left( \frac{h}{H} \right) - C_2 \right)^{C_3} \quad (\text{I.4})$$

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



**Figure I.15** Les moments appliqués sur la hausse fusible (Falvey et al, 1995).

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. Les effets de submersion et d'interaction de la nappe sur les coefficients de débit observés avec les déversoirs en labyrinthe ne sont pas significatifs avec les hausses fusibles. L'inclinaison de la face aval et la barre de renforcement au milieu de la hauteur de la vanne se combinent pour maintenir la crête aérée pour les hauts niveaux d'eau aval (Falvey, 1995).

#### **I.2.4.2 Stabilité des hausses fusibles :**

Afin de mettre en évidence les différentes sécurités de fonctionnement des hausses fusibles et d'assurer leurs fiabilités, il est nécessaire d'analyser la stabilité d'une hausse au glissement et au renversement dans les conditions normales et extrêmes de dysfonctionnement spécifique à chaque site.

### **I.2.4.3 Principes de dimensionnement :**

Les hausses fusibles s'installent à la construction d'un nouveau barrage ou sur un barrage existant. Elles s'adaptent à tous types de barrages et permettent d'optimiser son exploitation. L'installation des hausses fusibles sur un barrage ne doit en aucun cas mettre en péril le barrage et son entourage. Pour cela, la conception des hausses fusibles doit répondre à des critères qui évitent la submersion du barrage et la création de crues artificielles à l'aval.

#### **a. Dimensionnement hydraulique :**

Un barrage est un réservoir qui se remplit à la cote normale de retenue et pour lequel la crue de projet induit en pointe une montée du plan d'eau à la cote des plus hautes eaux.

Cette cote est la cote ultime de stabilité du barrage.

Mais pendant son exploitation, la vérification de l'étude hydrologique conduit, dans plusieurs cas, à la réactualisation de la crue du projet. Pour cela, l'utilisation des hausses fusibles sur le déversoir permet de conserver la stabilité du barrage en tenant compte de la révision de la crue du projet.

Suite à cette révision deux cas peuvent être distingués suivant les résultats de l'étude hydrologique:

a) Dans le cas où la vérification de l'étude hydrologique n'amène pas à modifier le débit de la crue de projet, l'installation de hausses fusibles permet de récupérer une tranche utile de retenue de l'ordre de 75% de la hauteur des plus hautes eaux. Cela résulte du fait que le niveau des plus hautes eaux pour la crue de projet n'est pas modifié par rapport à la situation antérieure, ce qui ne change pas les conditions de sécurité de l'ouvrage.

b) Dans le cas où la vérification de l'étude hydrologique amène à modifier le débit de la crue de projet, et afin de ne pas modifier le niveau des plus hautes eaux, on peut être conduit à dégrader significativement le seuil existant pour le passage de la crue du projet. La tranche disponible pour l'augmentation de capacité de la retenue par le système des hausses est donc légèrement diminuée par rapport à la situation précédente.

#### **b. Dimensionnement mécanique :**

Le principe des hausses est de passer brutalement, pour une cote d'eau déterminée, d'une situation de stabilité largement assurée à une situation de nette instabilité. Lors du remplissage du puits et de la chambre, on modifie rapidement le système de forces auxquelles est soumise la hausse, par application d'une sous pression sous sa base.

### **I.2.4.4 Analyse de la stabilité :**

Les hausses fusibles sont des éléments auto-stables jusqu'à une cote d'eau déterminée, qui

au-delà fonctionnent comme un fusible, c'est-à-dire qu'elles basculent sous la poussée de l'eau. La hausse, simplement posée sur le seuil, s'appuie à l'aval sur ses deux butées. Le système de forces auquel elle est soumise peut être décomposé de la façon suivante et exprimé en moment par rapport aux butées aval.

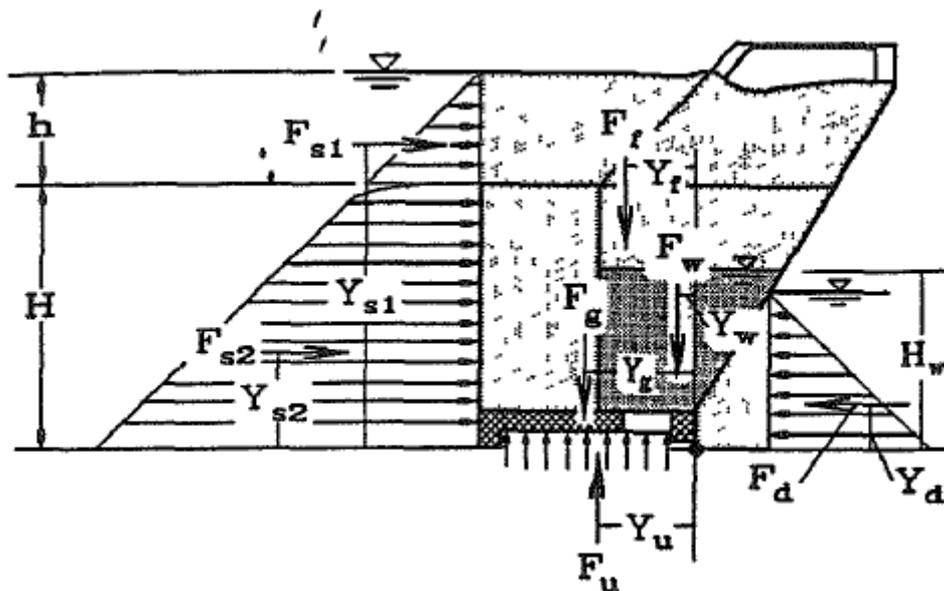
Les relations sur lesquelles repose l'analyse de stabilité sont récapitulées dans la figure (I.23).

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.



**Figure I.16** Forces agissant sur une hausse fusible.

#### a. Stabilité au renversement :

Le renversement de la hausse est déterminé en additionnant les moments par rapport à l'extrémité aval de la hausse comme indiqué dans la figure (I.23). 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). Avec cette supposition, la force sur le godet agit sur une surface qui est égale à la surface de la section transversale du godet (alvéole) comme vu de l'amont. Ainsi, le moment amont est égal à :

$$M_S = M_{S1} + M_{S2} \quad (\text{I.5})$$

$$M_{S1} = F_{S1} Y_{S1} = \frac{\rho_w g h}{2} (h W_w) \left( H + \frac{h}{3} \right) = \frac{\rho_w g W_w h^2 (3H + h)}{6} \quad (\text{I.6})$$

$$M_{S2} = F_{S2} Y_{S2} = (\rho_w g h) (H W_w) \frac{H}{2} + \frac{\rho_w g H}{2} (H W_w) \frac{H}{3} = \frac{\rho_w g W H^2 (H + 3h)}{6} \quad (\text{I.7})$$

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

$$M_u = \rho_w g A_c H_w Y_u \quad (\text{I.8})$$

$A_c$  : Surface de la chambre du fond;

$H_w$  : Profondeur d'eau dans le puits;

$Y_u$  : Bras de levier au centre de gravité de la pression;

$\rho_w$  : Densité d'eau.

A cause de la grande superficie de la chambre du fond, 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 (I.24) par la ligne continue presque verticale entre les hauteurs d'eau superficielles  $H_c$  et  $H_n$ .

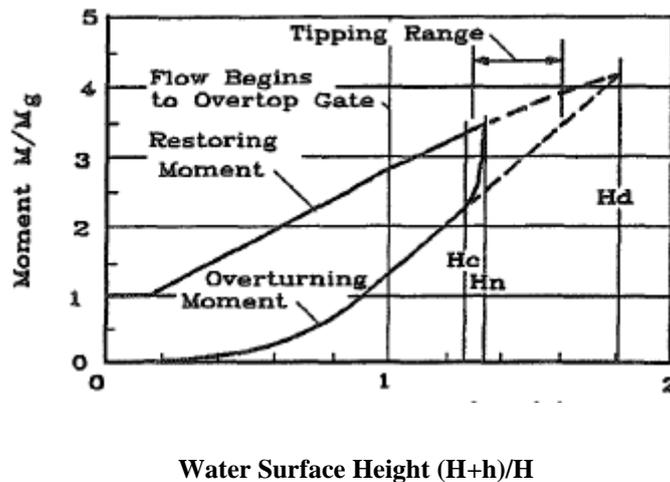


Figure I.17 Moments dans la hausse fusible Model WLH.

Quand la hausse commence à se renverser, le godet (alvéole) se déplace loin des joints placés dans le seuil du déversoir. Cela permet à la charge d'eau d'agir sur la chambre. Simultanément, la pression le long des côtés de la chambre baisse à une valeur équivalente au niveau d'eau sur le coté aval de la hausse. 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:

$$M_g = F_g Y_g = \rho_s V_s Y_s + \rho_c V_c Y_c \quad (I.9)$$

Où :

$F_g$  : la force nette manifestée par le poids du godet et la base;

$V_c$  : Volume du matériau dans la base;

$V_s$  : Volume du matériau dans le godet;

$\rho_c$  : Densité du matériau dans la base;

$\rho_s$  : Densité du matériau dans le godet ;

$Y_c$  : Bras de levier du matériau dans la base;

$Y_g$  : Bras de levier de la base et du godet;

$Y_s$  : Bras de levier du matériau dans le godet.

Le moment de la hausse est ajusté en changeant le volume de lest dans le godet jusqu'au renversement qui se produit à une profondeur d'eau dans le puits d'environ la moitié de la profondeur d'eau à l'amont. Ces critères assurent que le niveau pour lequel la hausse fusible s'incline est bien défini.

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 :

$$M_w = \rho_w g (V_b Y_b + W_w H_w L_w Y_w) \quad (I.10)$$

$H_w$  : Profondeur d'eau dans le puits ;

$L_w$  : Longueur du puits;

$V_b$  : Volume d'eau dans le godet;

$Y_b$  : Bras de levier de la force de l'eau dans le godet;

$Y_w$  : Bras de levier de la force de l'eau dans le puits.

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. Ainsi le moment aval est donné approximativement par :

$$M_d \approx \frac{\rho g [(H+h)/3]}{2} [(H+h)/3] W_w \frac{(H+h)/3}{3} \approx \frac{\rho g (H+h)^3 W_w}{182} \quad (\text{I.11})$$

La somme des moments de restauration et de renversement de la hausse fusible est montrée dans la figure (I.24). Les moments sont considérés sans dimensions en les divisant par le moment de la hausse. La figure montre les moments sur une hausse fusible quand le niveau de réservoir augmente à partir du seuil de la hausse fusible. Le déversement de la hausse fusible commence pour une profondeur de réservoir de  $(h + H)/H$  égal à 1. A une profondeur correspondant à  $(H_C)$ , l'eau commence à couler dans le puits. Le renversement ne se produit pas à cette profondeur parce que l'eau sort aussi des trous du drain qui sont connectés à la chambre dans la base.

Lorsque la profondeur augmente, le moment de renversement augmente avant que la profondeur  $(H_C)$  ne soit atteinte. A cette profondeur, les hausses se renversent. L'augmentation rapide du moment de renversement de  $(H_C)$  à  $(H_n)$  produit une relation précise entre le point de renversement et la hauteur de la surface d'eau. Si le puits d'admission est colmaté pour quelques raisons, le moment de renversement continu à augmenter à un taux plus lent avant que la profondeur  $(H_d)$  ne soit atteint. A la profondeur  $(H_d)$ . La hausse se renverse même sans le moment de la chambre.

### b. Stabilité au glissement :

La stabilité au glissement est assurée par des butées dans le bord aval du déversoir qui sont ancrées dans le seuil comme indiqué sur la figure (I-1). L'ampleur de la force exercée sur la butée peut être estimée en calculant la force hydrostatique amont appliquée sur la hausse. Comme approximation, la force qui provoque le glissement est donnée par :

$$F_s = F_{s1} + F_{s2} = \frac{\rho_w g h^2 W_w}{2} + \frac{\rho_w g (H + 2h) H W}{2} = \frac{\rho_w g H^2}{2} \left( \frac{h^2}{H^2} W_w + W + \frac{2h}{H} W \right) \quad (\text{I.12})$$

Où :

$W$  : Largeur de la hausse fusible

$W_w$  : Largeur du puits

$\rho_w$  : Densité de l'eau

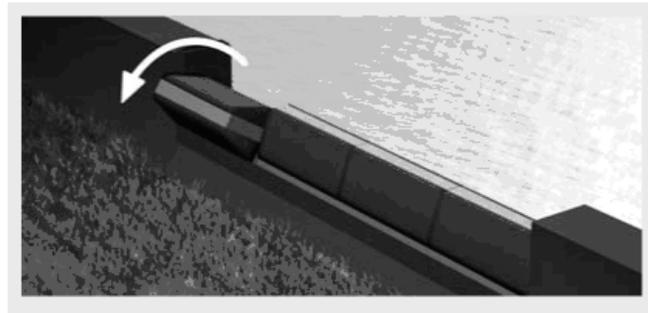
Les forces  $F_{s1}$  et  $F_{s2}$  sont montrées dans la figure (I.23), cette équation est conservatrice dans laquelle on ignore les forces de frottement entre la hausse et le bord du déversoir.

### I.2.5 Les Blocs fusibles :

### I.2.5.1 Définition :

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

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



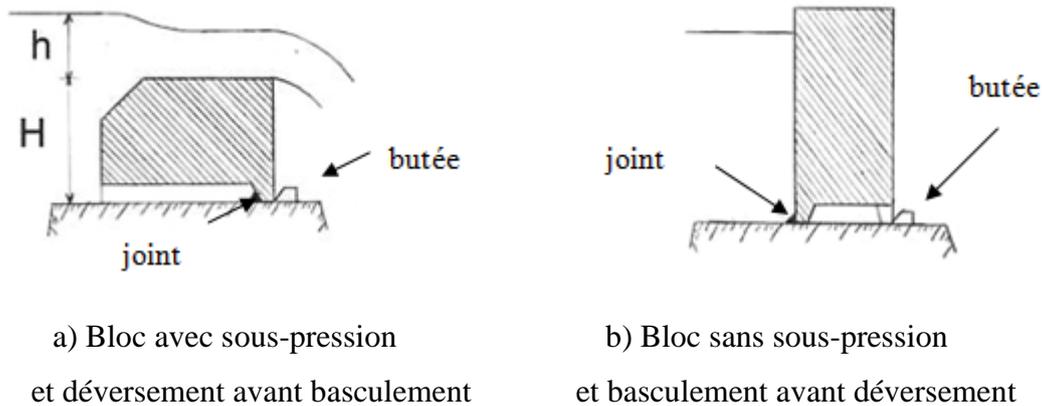
**Figure I.18** Vue en perspective d'un déversoir Blocs fusibles.

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

Les blocs peuvent au contraire être prévus pour être submergés par une nappe d'eau  $h$  importante (jusqu'à deux fois la hauteur  $H$  du bloc) avant de basculer. Ils sont alors relativement longs et épais par rapport à leur hauteur ( $L/H$  jusqu'à 10 ;  $E/H$  jusqu'à 3) et peuvent présenter un profilage à l'amont pour faciliter l'écoulement. La solution (sous-pression totale), bien que consommant plus de béton, paraît plus intéressante dans ce cas car elle donne une meilleure précision quant au niveau d'eau assurant le basculement (les courbes représentatives du moment stabilisateur et du moment de renversement se coupent avec un angle maximum). En outre, cette solution n'exige pas une grande précision pour la position exacte du joint d'étanchéité, celui-ci étant situé à l'aval, c'est-à-dire proche de l'axe de rotation

du bloc quand il bascule. Il convient simplement de veiller à une aération suffisante de la nappe, ce qui est facile à réaliser.

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



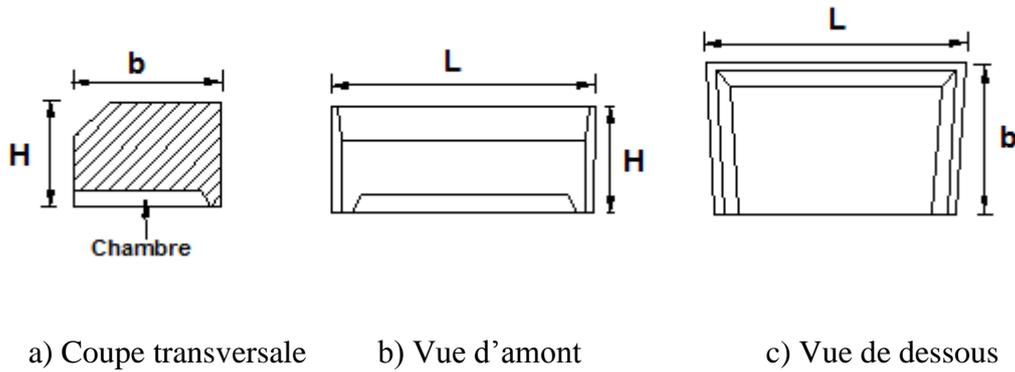
**Figure I.19** Les deux types de blocs fusibles.

### I.2.5.2 Les blocs fusibles avec sous-pression :

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

Des dispositions doivent être prises aux extrémités des blocs pour éviter que les irrégularités ou les défauts de verticalité toujours possibles lors de leur fabrication, n'entraînent des frottements entre blocs ou entre un bloc et un mur séparateur lors du basculement.

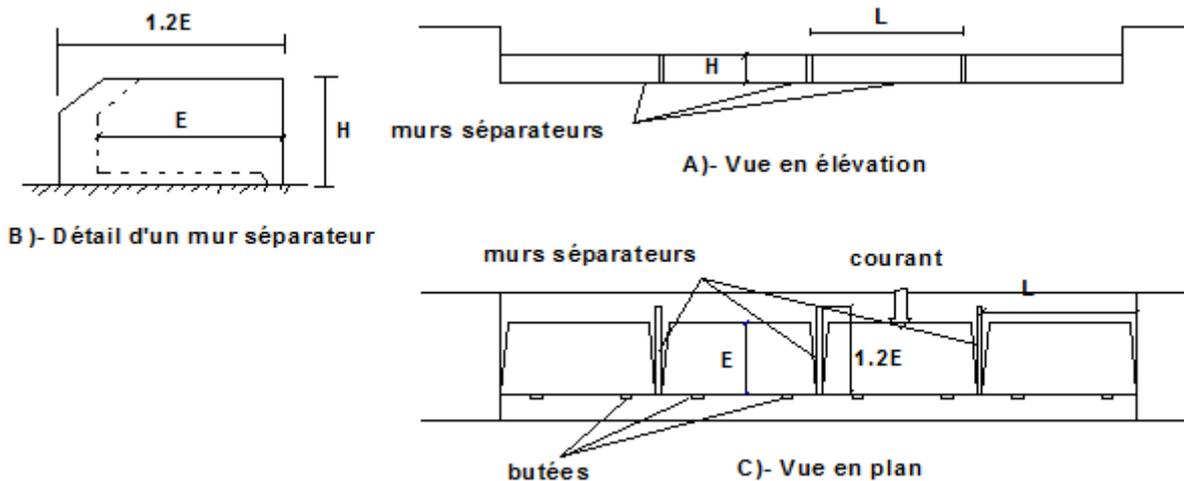
Une solution possible consiste à réduire légèrement la longueur de la face aval du bloc pour donner à celui-ci une forme trapézoïdale.



**Figure I.20** Géométrie d'un bloc fusible avec sous-pression.

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

Les essais ont également montré que ces murs n'avaient pas besoin d'avoir de grandes dimensions pour être efficaces (voir figure I.24).



**Figure I.21** Disposition générale et murs séparateurs.

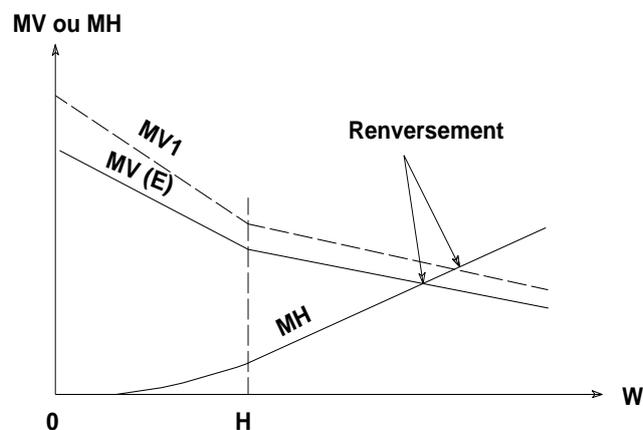


**Figure I.22** blocs fusibles sur un seuil avec des murs séparateurs.

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

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

La figure (I.25) montre les courbes théoriques de stabilité. La lignes brisée MV représente le moment des forces verticales et la courbe MH le moment des forces horizontales (les moments sont calculés par rapport à la butée aval) en fonction d'une charge d'eau totale  $W$  à l'amont d'un bloc d'épaisseur  $E$  et de hauteur  $H$ . Le renversement du bloc correspond au point de rencontre de ces deux courbes. La ligne brisée MV1 en pointillée correspond à une épaisseur de bloc augmentée de 10 %.



**Figure I.23** Diagramme de stabilité.

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

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

$$h = E - 0,4 H \quad (I.13)$$

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 ( $h = H$ ).

Dans la plupart des cas, il faut environ  $1 \text{ m}^3$  de bloc de béton pour augmenter le débit de  $1 \text{ m}^3/\text{sec}$ . L'utilisation de blocs fusibles à la place d'un seuil classique permet à la fois de réduire la quantité de béton à mettre en œuvre et d'accroître la capacité de l'évacuateur d'environ  $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Figure I.24 bloc fusible placé sur un seuil après un arasement.

### I.2.5.3 Construction des blocs fusibles :

La construction des blocs peut être réalisée très simplement, par exemple en coulant le béton sur une couche de matériaux tout venant facile à enlever après coulage du béton, recouverte d'une membrane plastique comme indiqué sur la figure (I.28). Si les extrémités latérales restent ouvertes, quelques supports sont nécessaires pour assurer la stabilité du bloc.

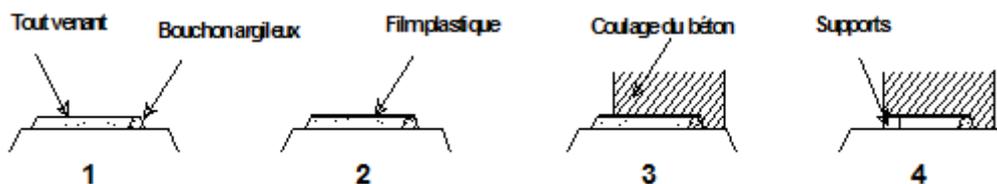


Figure I.25 phases de placement du bloc sur un seuil.

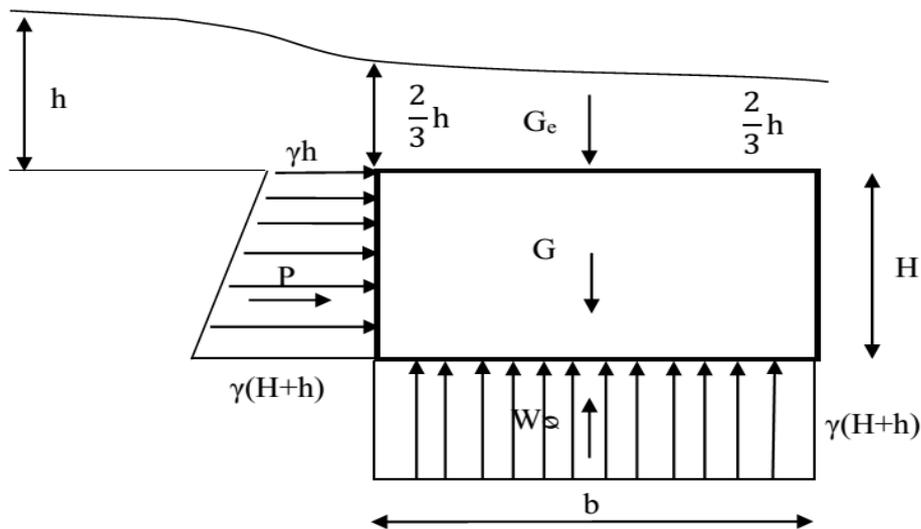
### I.2.5.4 Méthode développés pour le dimensionnement du bloc fusible

Le laboratoire Aménagements Hydrauliques et Environnement de l'université de Biskra a pris en charge des études détaillées sur ce type de déversoir qui a permis d'aboutir à une méthode

théorique développée de dimensionnement des blocs fusibles.

Le principe de base de la méthode théorique dépend de la stabilité limite du bloc fusible repose sur le seuil d'un déversoir, qui soumit à la force de pression hydrostatique, à la force des sous-pressions, au poids de l'eau et son poids propre.

Le calcul de la stabilité d'un bloc auto stable permet de déterminer la largeur pour laquelle cette dernière bascule pour une hauteur d'eau prédéterminée sur le bloc. La hauteur et la longueur du bloc ainsi que la hauteur d'eau sur le bloc qui provoque son basculement sont fixées préalablement.



**Figure I.26** Schéma de calcul de stabilité du bloc fusible (Sekkour.I)

La relation aboutie exprime la largeur  $b$  du bloc en fonction de sa hauteur, de la hauteur d'eau sur le bloc et du poids volumique du matériau et de l'eau.

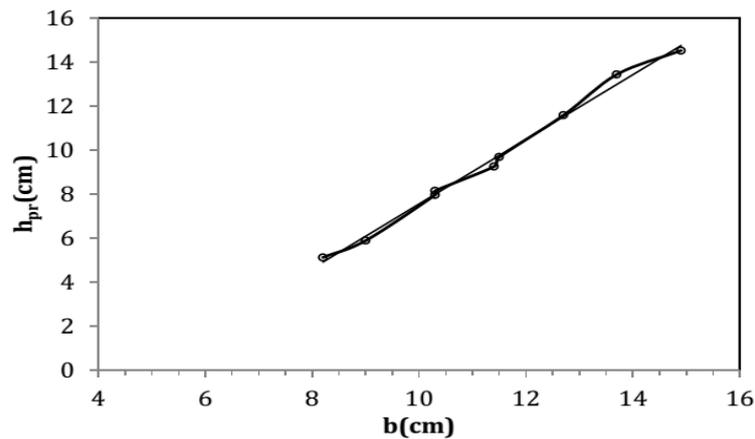
$$b = H \sqrt{\frac{(H + 3h)}{3 \frac{\gamma b}{\gamma} H - 3H - h}} \quad (1.12)$$

Pour valider cette relation, des essais expérimentaux ont été réalisés au niveau de la station d'expérimentation sur des modèles réduits de blocs fusibles.

### I.2.5.5 La relation entre la hauteur de basculement et largeur du bloc

Pour vérifier de la relation entre la largeur du bloc et la hauteur d'eau sur le bloc qui provoque son basculement, une série des essais a été faite sur des blocs fusibles de largeur différente.

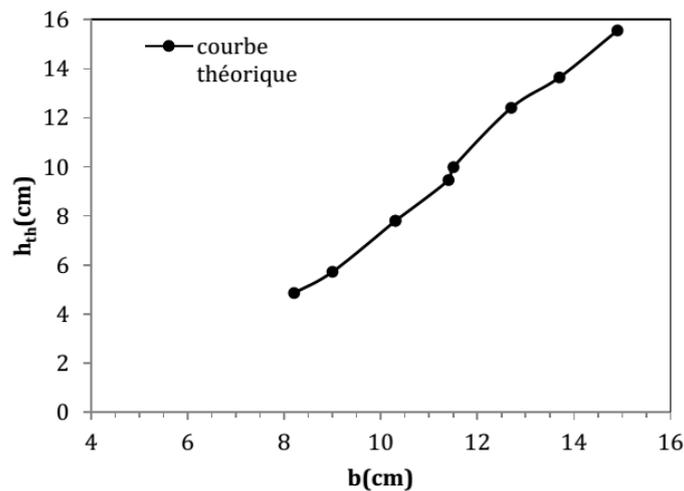
Le graphe suivant (fig.I.33) représente la variation de la largeur  $b$  en fonction de la lame d'eau écoulee qui provoque le basculement du bloc (théorique et expérimentale) (Sekkour. I), on remarque que la tendance de la courbe se rapproche d'une droite.



**Figure I.27** Courbe pratique de la variation de la charge de basculement en fonction de la largeur de bloc (Sekkour.I)

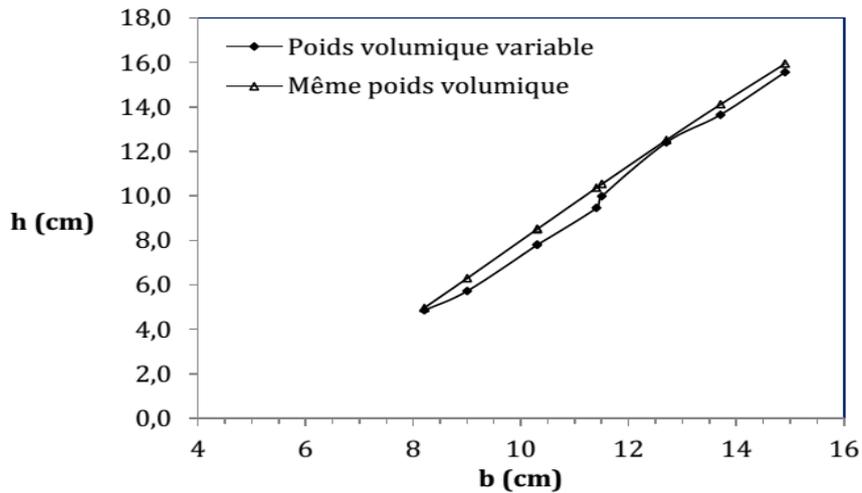
On remarque que la hauteur de basculement dépend de la largeur du bloc. Pour basculer un bloc par une faible hauteur d'eau, il suffit juste de réduire sa largeur, ceci montre que les blocs fusibles sont plus adaptés aux faibles crues que pour les fortes crues. La représentation graphique (fig.I.34) des résultats théoriques obtenue par la relation théorique (I.12) montre la même allure que celle obtenue dans des résultats expérimentaux pour les mêmes poids volumiques que les blocs testés qui sont variables d'un bloc à l'autre.

$$H = \frac{3H \left( \frac{\gamma b - \gamma}{\gamma} \right) b^2 - H^3}{b^2 + 3H^2} \quad (1.13)$$



**Figure I.28** Courbe théorique de la variation de la charge de basculement en fonction de la largeur de bloc (Sekkour.I)

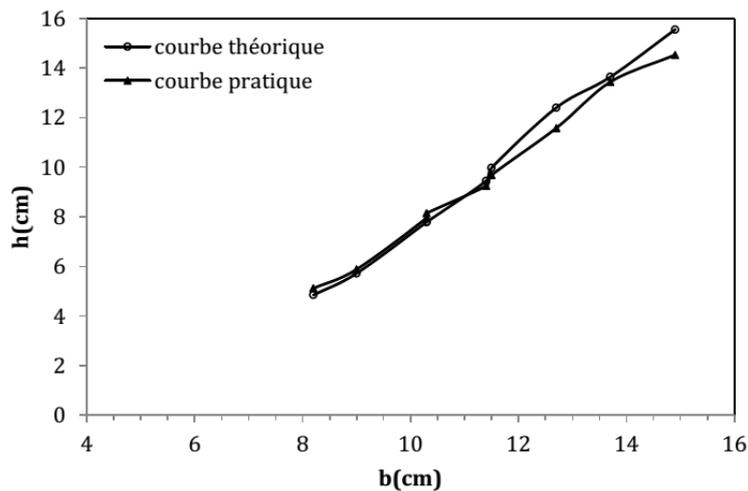
La courbe (Fig.I.35) illustre la variation de la hauteur de basculement en fonction de la variation du poids volumique, cette dernière se varie d'une façon linéaire à condition que le poids volumique est le même pour tous les blocs. (Sekkour.I)



**Figure I.29** Variation de la hauteur de basculement en fonction de la variation du poids volumique (Sekkour.I)

Le graphique (Fig.I.36) représente une comparaison entre les deux courbes théorique et expérimentale afin de vérifier la validité de la relation (I.12)

La lecture de ce graphe montre un bon accord entre les valeurs théoriques et ceux obtenues expérimentalement. La différence maximale entre les valeurs théoriques et pratiques ne dépasse pas 8% sur toute la gamme de la charge. Il est à remarquer que l'écart le plus grand est enregistré pour des valeurs de la hauteur de basculement supérieures à la hauteur des blocs, c'est-à-dire des valeurs en dehors de l'intervalle d'utilisation des blocs fusibles.



**Figure I.30** Comparaison entre la charge théorique et pratique (Sekkour.I)

Cependant, pour les valeurs de la hauteur de basculement inférieure à la hauteur des blocs la différence n'est que d'environ 4%. Ainsi. Les faibles différences entre les valeurs théoriques et expérimentales peuvent être justifiées par le frottement du contact du bloc avec les murs de séparation qui a été négligé dans le développement théorique. (Sekkour.I)

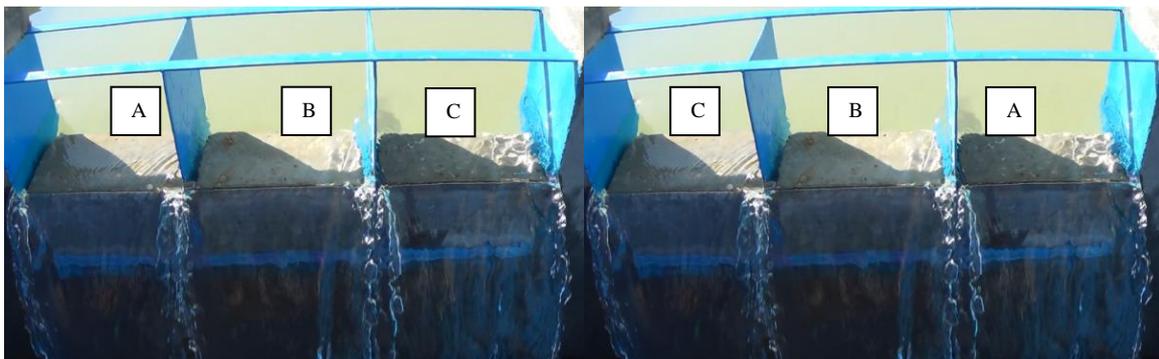
Les résultats des essais ont montré qu'effectivement quand le niveau d'eau dans le réservoir atteint le sommet du bloc, ce dernier bascule. Ce résultat confirme directement la bonne conformité de la relation (I.12) avec la pratique. (Sekkour.I)

### I.2.5.6 Effet de la disposition des blocs sur le seuil selon leur largeur

La disposition des blocs sur le seuil peut avoir ou non une influence sur leur basculement, ainsi, il est intéressant de vérifier ce critère, afin de connaître par exemple l'effet du bord sur la hauteur de basculement des blocs.

Les essais effectués sur un déversoir composé de trois blocs ont donné les mêmes remarques que le déversoir constitué par un seul bloc, c'est-à-dire que les résultats expérimentaux confirment la validité du développement théorique.

Pour vérifier l'effet de l'alignement trois séries de trois blocs chacune ont été expérimentés. Les résultats obtenus ont montré que le basculement du bloc ne dépend pas de sa position sur le seuil du déversoir mais de l'importance de la largeur du bloc. (Fig. I.37).



**Figure I.31** Schéma d'alignement d'une série de trois blocs sur le seuil

### I.2.6 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 (Lempérière et Al, 2006), et les murs en « L fusibles » lors de la rénovation du barrage Milner (Etats Unis - Central Idaho).

Ils présentent des solutions nouvelles plus fiables et plus précises ont été récemment étudiées, testées, et, pour certaines, mises en œuvre et utilisées avec succès depuis une dizaine d'années.

#### I.2.6.1 Les hausses rabattables

Hydroplus a récemment mis au point un nouveau système à vu le jour après quelque perfectionnement : les hausses rabattables.

Les hausses fusibles rabattables ne remplacent pas les hausses actuellement sur le marché, elles sont basées sur les mêmes principes de déclenchement que la version originale, mais leur conception plus raffinée tient compte d'une réaction qui est mieux adaptée aux projets où l'hydrologie locale exige un abaissement fréquent des hausses afin de protéger la structure.

Ces hausses ne sont pas emportées par la crue mais s'effacent vers le bas comme un clapet, elles rabattent progressivement pour permettre le passage de crues exceptionnelles et peuvent être remises manuellement en place, une fois l'événement passé, puis il suffit de remettre les hausses à leur position originale.

Ce dispositif fusible présente une solution idéale pour les projets dont la période de retour de premiers basculements est élevée. Après avoir réalisé de nombreux essais sur modèle en laboratoire, une première installation a eu lieu en juillet 2004 sur le barrage de Khorobrovksaya en Russie.



**Figure I.32** Hausses rabattables (Hydroplus)

### **I.2.6.2 Flashboard**

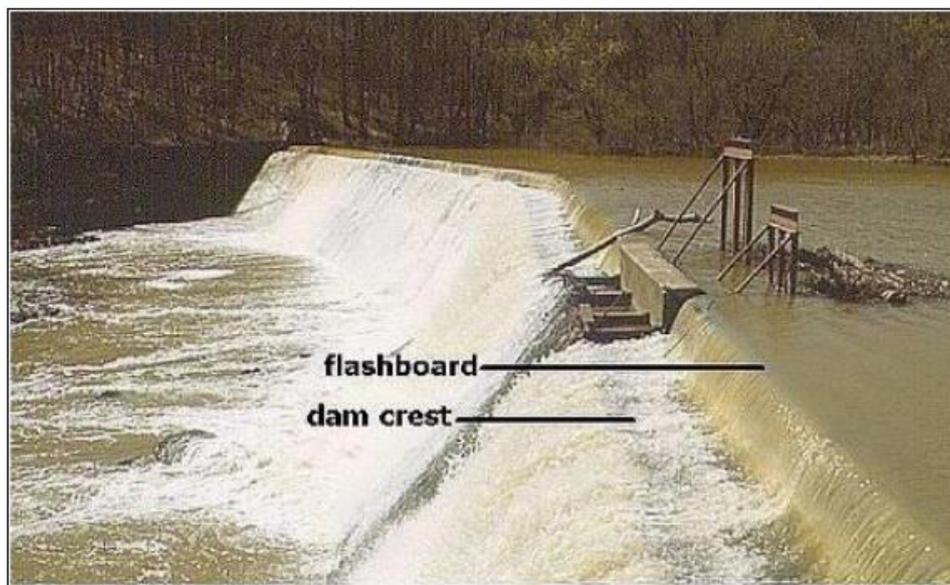
Une masse de bois, en béton ou en acier placée sur la crête d'un déversoir pour élever le niveau d'eau de retenue mais qui peuvent être rapidement éliminée dans le cas d'une crue par un dispositif de déclenchement, ou par l'échec délibérément conçu de la Flashboard ou de ses supports. Des milliers de petits barrages aux Etats Unis ont utilisé des « flashboards » depuis plus de 100 ans. Il s'agit de plaques dressées verticalement contre des poteaux encastrés (et scellés ou non) dans un seuil en béton. Les plaques sont démontées à la main avant la saison des crues ou bien les poteaux plient sous la poussée de l'eau pour une hauteur de lame déversante donnée. Les plaques sont en général en bois et les poteaux sont des tubes

métalliques. Ceux-ci, pour de très faibles hauteurs, peuvent probablement être remplacés par de simples fers à béton.

Ce dispositif, valable pour de faibles hauteurs, est très économique mais reste peu précis et nécessite quelques précautions. On veillera par exemple à ce que les plaques ne soient mises en place qu'à la fin de la saison des crues et à vérifier que les poteaux n'ont pas été renforcés par les usagers et qu'ils pourront plier librement bien avant que l'eau n'atteigne la crête du barrage. Il paraît également prudent de limiter leur hauteur à environ 1/3 de la différence entre le niveau du seuil et celui de la crête du barrage.

Les flashboards sont bien adaptés pour augmenter le stockage des petits barrages d'irrigation avec des éléments de 0,50 m ou 1 m de hauteur. On peut aussi envisager leur utilisation

provisoire dans l'attente d'une solution définitive plus précise et plus performante



**Figure I.33** Déversoir Flashboard (Etats-Unis)

### I.2.6.3 Digues fusibles

Utilisées en Chine comme évacuateurs de sécurité pour des débits parfois très importants, leur coût est très réduit. Il semble que la grande longueur et le site d'implantation de beaucoup de barrages au Burkina Faso pourrait permettre l'utilisation de digues fusibles là où les remblais atteignent 2 à 3 m de hauteur. Il reste que ce dispositif, surtout s'il est mal ou peu entretenu, peut poser des problèmes de précision et de fiabilité.

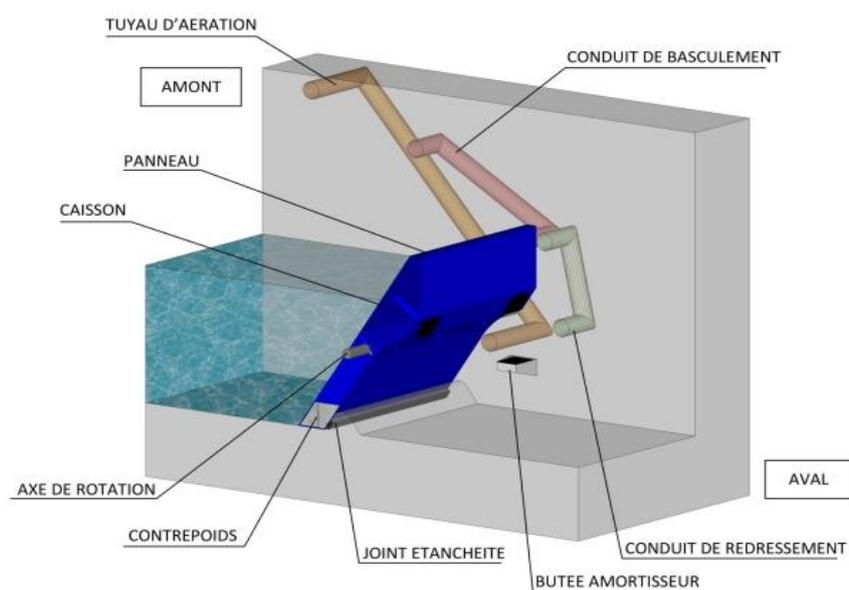
Au fil des années, une certaine cohésion peut apparaître progressivement dans les matériaux constitutifs de la digue (sans parler de la végétation qui peut pousser sur sa surface) de sorte que la charge d'eau nécessaire pour entraîner la rupture de la digue tend à augmenter, la digue devenant de moins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



**Figure I.34** Déversoir digue fusible (France)

#### I.2.6.4 Les vannes automatiques

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. (Hydroplus)



**Figure I.35** Schéma d'une vanne automatique (Hydroplus – France)

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.

Lors d'épisodes de crues exceptionnelles, le niveau du réservoir atteint la cote de basculement de la vanne automatique (Hydroplus).

### **I.2.6.5 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. Les conduites d'alimentation en air des boudins sont, le cas échéant, noyées dans cette poutre.

Lors de l'annonce de la crue, et s'il y a risque de dépassement du niveau du seuil fixe, on vient enlever la couverture des caniveaux et gonfler les boudins avec des groupes moto-compresseurs (procédure à prévoir dans le plan d'alerte). Puis, en fonction de la montée du niveau de crue, on déclenche. On peut éventuellement prévoir la possibilité de venir, en cours de décrue, regonfler les boudins pour stopper l'inondation.

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 I.36** Barrage anti-sel de 1969 avec son boudin gonflable

### I.2.6.6 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 I.37** Barrage Milner avec les murs en L –USA

### **I.2.7 CONCLUSION :**

L'étude bibliographique développée dans ce travail, a eu pour objectif d'identifier les différents travaux de recherche effectués dans le domaine des déversoirs auto stables, en particulier les hausses fusibles, les blocs fusibles et les tôles pliantes (Flashboard). Cette étude nous a permis de définir la géométrie, le principe de fonctionnement et le but de l'utilisation de ce système.

Les dispositifs auto stables est considéré comme un déversoir supplémentaire, placé sur le standard original de type rectiligne pour l'élévation du niveau d'eau dans le réservoir, l'origine de fonctionnement est de rester stable pendant une certaine hauteur d'eau, avant de basculer successivement.

La combinaison de l'étude théorique et expérimentale est la base des recherches effectués pour le dimensionnement des déversoirs auto stables, où les essais sur des modèles réduits avec des dimensions géométriques ont été calculés en suivant la voie théorique qui dépend de la stabilité des éléments sur le seuil du déversoir. Ces essais ont eu pour but d'examiner le comportement des éléments sous l'influence d'écoulement.

les hausses fusibles ont été inventées par François Lempérière en 1989, se sont des éléments indépendants, sous forme labyrinthe ou droite, placé sur le seuil de déversoirs existants, pour augmenter la capacité de stockage et d'améliorer l'évacuation du déversoir, peut également être combinés entre les deux fonctions, tel qu'il est utilisé dans plusieurs anciens barrages, afin de réduire le coût de la construction et de réduire la longueur du seuil et hauteur du barrage.

Pendant les faibles et moyennes crues, les hausses agissent comme une barrière étanche, permet la décharge d'eau comme un déversoir libre, mais au forte crue, le niveau du réservoir dépasse une valeur prédéterminée, l'eau s'écoule dans le puits d'entrée et provoque une pression de soulèvement associé à la pression hydrostatique qui déséquilibre la hausse afin de basculer.

Chaque hausse fusible a un niveau de basculement différent déterminée par la hauteur de l'entrée d'eau et sa propre stabilité unique.

Les blocs fusibles représentent un nouveau dispositif de déversoir auto stable, il peut être une alternative de surélévation économique et efficace, en raison de sa facilité de réalisation et le coût faible des matériaux utilisés.

Les blocs fusibles sont des masses en béton placés côte à côte sur le bord de déversoir qui restent stable jusqu'à ce que l'eau atteint un certain niveau dans le réservoir et commence à basculer quand l'eau dépasse ce niveau.

Ce dispositif permet l'augmentation de la capacité de stockage des barrages en direct ou l'amélioration de la capacité d'évacuation du déversoir, il est possible de combiner ces deux avantages.

Les tôles pliantes peuvent être un nouveau système économique des déversoirs auto-stables, le principe de ce système est de fixer des tôles métalliques indépendantes les unes des autres, côte à côte sur le seuil du déversoir. Ces éléments ont des caractéristiques un peu différentes les unes aux autres, ce qui entraîne le pliage total de chaque élément pour un niveau d'eau amont différent. Ainsi le débit aval augmente donc progressivement.

Des études très préliminaires qui ont été effectués sur des modèles réduit, effectuées dans le but d'aboutir à une équation approchée pour calculer l'épaisseur et la hauteur de la tôle.

# Chapitre II

Etude théorique pour le  
dimensionnement des tôles  
fusibles

## CHAPITRE II

### Etude théorique pour le dimensionnement des tôles fusibles

#### II.1 Introduction

Les tôles dites fusibles ou pliantes (Flashboard) est un type des déversoirs auto-stables qui a été utilisé depuis plus de 100 ans pour élever le niveau d'eau de retenue, Mais ses études n'ont commencé que récemment.

Les tôles pliantes sont particulièrement intéressantes pour la surélévation et l'amélioration d'évacuation des seuils libres qui semblent très bien adaptés aux nombreux petits barrages.

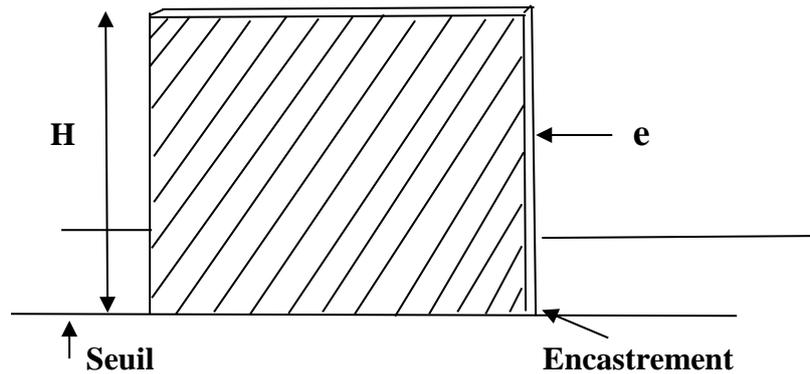
Ces tôles sont des éléments en acier s'appliquent aux déversoirs construits transversalement à la direction de l'écoulement, que ces derniers soient existants ou en phase de conception, où la mise en place des tôles sur le seuil augmente le niveau d'eau dans le réservoir.

Le but de ce chapitre est de déterminer une méthode de dimensionnement de la géométrie des tôles pliantes, qui permet le pliage de ces éléments successivement lorsque l'eau atteint un certain niveau sans mettre le barrage en danger.

#### II.2 Description des tôles pliantes

Le principe des tôles pliantes est de mettre en place des éléments en acier indépendants les uns à côté des autres sur le seuil d'un déversoir existant ou sur le sommet d'un nouveau barrage poids. Ces éléments sont fixés et restent auto-stables jusqu'à ce que l'eau de la retenue atteigne un certain niveau puis ils plient progressivement lorsque ce niveau est arrivé la charge maximale pour le pliage totale de la tôle.

Ces tôles se caractérisent par une forme géométrique simple, ils sont fabriqués en acier avec des épaisseurs et des hauteurs étudiées. Ces éléments sont fixés au long de la crête du déversoir existant, sous forme d'un rideau qui assure l'obturation de l'écoulement, L'étanchéité entre les tôles pliantes adjacents est assurée par des joints.



**Figure II.1** Schéma descriptif d'une tôle pliante

### II.3 Objectif de conception des tôles pliantes

Les tôles pliantes peuvent être utilisés aux déversoirs existants ou pour des barrages nouveaux. Ces éléments sont fixés transversalement à la direction de l'écoulement.

Dans le cas d'un déversoir existant, le but des tôles pliantes est d'augmenter la capacité de stockage d'une retenue suite au phénomène d'envasement ou autre, ils permettent aussi d'accroître le débit évacué d'un déversoir déjà construit, par l'abaissement du seuil soit en augmentant le débit maximum admissible, soit en augmentant le volume stocké, ou bien la combinaison des deux avantages, comme ils peuvent d'améliorer la sécurité du barrage moyennant qu'on recoupe le seuil existant pour abaisser la côte de calage.

Dans le cas des nouveaux barrages, on peut doubler la valeur de l'écoulement passant par le déversoir lors des averses et d'augmenter le volume stocké dans la retenue sans diminuer la sécurité avec la même quantité de béton et également avec le même coût que pour un seuil Creager.

#### II.3.1 Augmentation de la capacité des barrages

L'envasement des barrages limite drastiquement leur capacité et donc la durée d'exploitation, cet envasement provoque en conséquence un manque en eau de consommation domestique, d'irrigation et d'industrie. Pour cette raison les gestionnaires des barrages cherchent des solutions pour accroître la capacité de stockage.

Généralement, les barrages sont équipés d'un évacuateur de crues à seuil libre (Creager), ce type fonctionne sous une charge d'eau maximale fixe. Une partie de cette tranche peut être récupérée pour faire augmenter le niveau normal de la retenue par l'emplacement des tôles pliantes sur le seuil du déversoir existant sans pour autant affecté la sécurité du barrage.

Les tôles pliantes représentent une solution efficace et économique, pour le recouvrement de la

tranche perdue de l'eau, en augmentant la hauteur du seuil, tout en conservant la capacité d'évacuation par un seuil à surface libre.

### II.3.2 Amélioration de la sécurité des évacuateurs de crues

Avec les problèmes de l'augmentation de la température de la terre ainsi que le changement climatique. Il est devenu nécessaire de trouver des solutions et également de faire une révision de la crue de projet des barrages existants (au fort débit de crues, par rapport à la crue de projet) afin d'éviter les dangers probables.

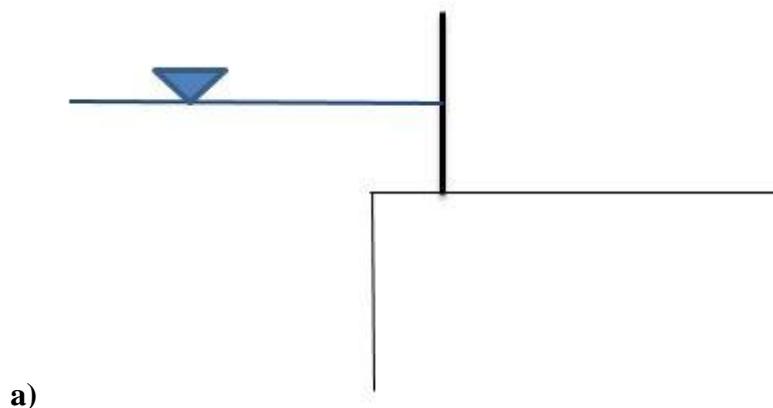
Parmi les solutions efficaces pour augmenter la capacité de l'évacuateur de crues, est de placer des tôles pliantes, ces dernières abaissent le seuil, afin d'obtenir une charge plus grande que l'initiale et par conséquent, d'augmenter le débit évacué lors d'une crue exceptionnelle. La fixation de ces tôles sur le seuil, permet de conserver le volume d'eau dans le bassin, tandis que le passage des crues est assuré.

### II.4 Principe de fonctionnement des tôles pliantes

Les tôles pliantes obturent le seuil sur une certaine hauteur par des tôles qui sont fixes jusqu'à une certaine cote du plan d'eau amont.

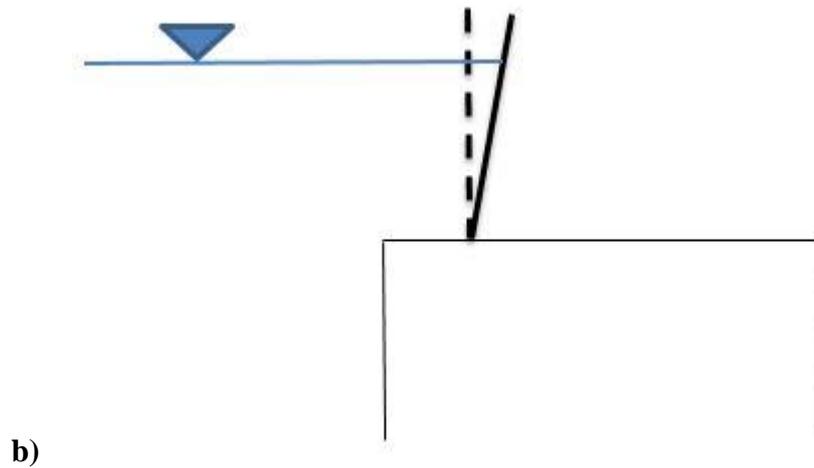
Selon le niveau d'eau dans la retenue, les tôles fonctionnent comme un barrage, un déversoir à large seuil ou un effaçable.

a) Au moment où le niveau de l'eau est inférieur ou égal le niveau du seuil, ces dernières se comportent comme un barrage. Chaque tôle est largement fixe et résiste à la poussée hydrostatique grâce à son élasticité propre.

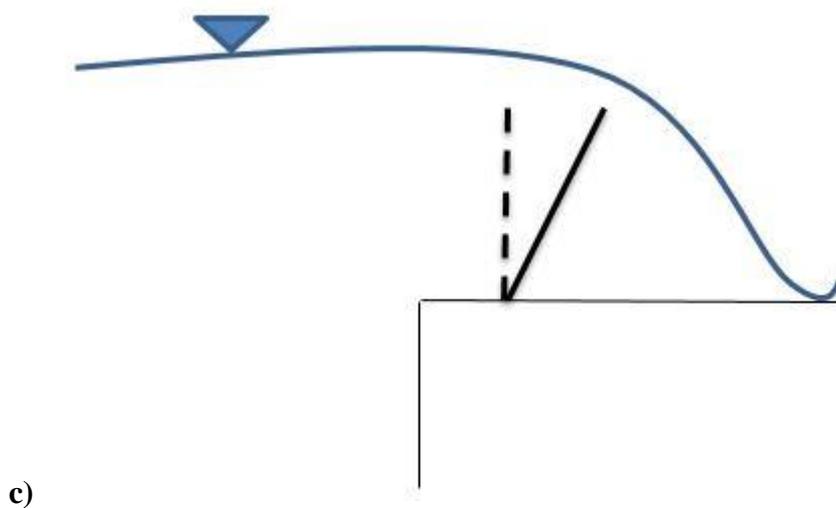


**Figure II.5.a** Tôle pliante fonctionne comme un barrage

b) Au moment où le niveau de l'eau s'élève au-dessus de la cote du seuil, ces dernières se comportent comme un déversoir mince, jusqu'à une certaine hauteur d'eau. Au cours de cette phase de fonctionnement chaque élément reste fixe comme dans la phase précédente, Après cette hauteur, la plaque commence à se plier progressivement jusqu'à le déversement.

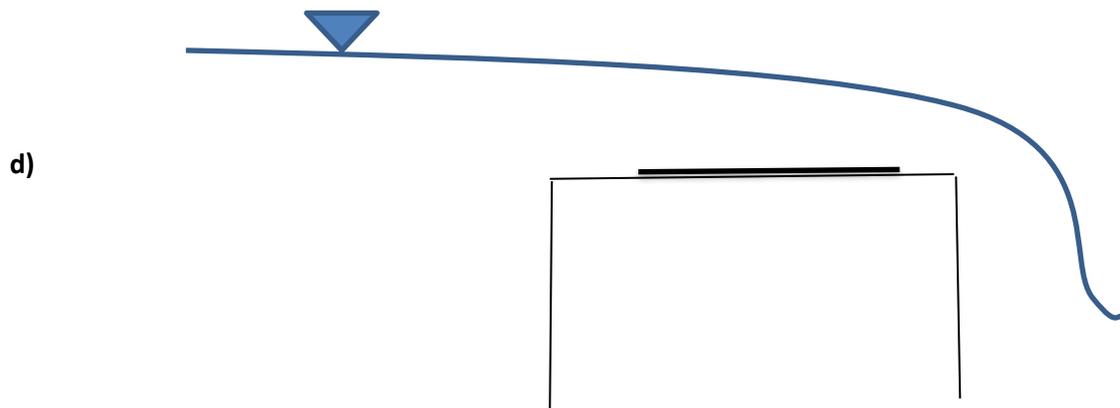


**Figure II.5.b** Tôle pliante fonctionne comme un déversoir avant le déversement



**Figure II.5.c** Tôle pliante fonctionne comme un déversoir après le déversement

c) Au moment où le débit est très grand, le niveau de l'eau augmente au-dessus de la tôle, la force hydrostatique ainsi introduite sur l'élément modifie radicalement ses conditions de stabilité et provoque brutalement son pliage.



**Figure II.5.d** Tôle pliante effaçable

## II.5 Pré-dimensionnement des tôles pliantes

Le dimensionnement des tôles pliantes signifie la méthode de calcul de ses dimensions d'une façon qui assure son bon fonctionnement. La hauteur des tôles est censée d'être la même au long du déversoir, elle est déterminée en fonction de la lame déversante et la surélévation choisie.

L'épaisseur de la tôle varie d'une tôle à l'autre dans le cas où chaque tôle est dimensionnée pour plier pour une charge d'eau donnée. Ainsi on peut dire que l'épaisseur est étroitement liée à la charge d'eau derrière la tôle.

L'installation des tôles pliantes sur un déversoir ne doit en aucun cas mettre en péril le barrage et son entourage. Pour cela, la conception des tôles pliantes doit répondre à des critères qui évitent la submersion du barrage et la création de crues artificielles à l'aval.

### II.5.1 Hauteur des tôles pliantes

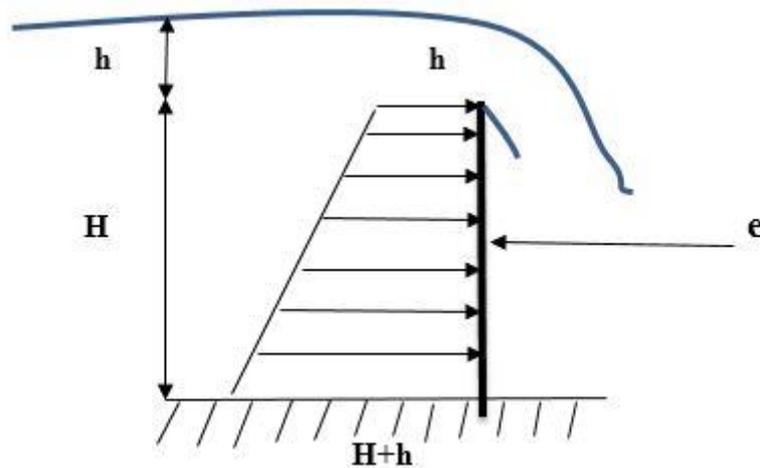
La hauteur des tôles pliantes dépend de la hauteur de surélévation désirée et de l'importance de débit à évacuer après le pliage de l'ensemble des tôles.

### II.5.2 Epaisseur des tôles pliantes

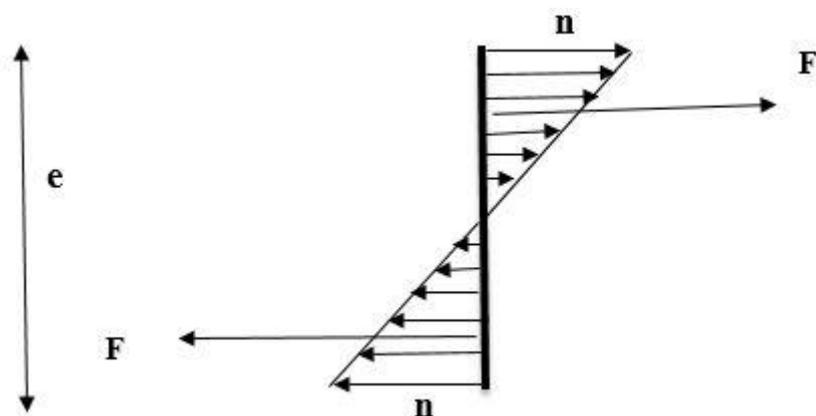
L'épaisseur de la tôle pliante dépend essentiellement de la charge d'eau choisie pour laquelle la tôle plie.

### II.5.3 Calcul théorique pour le dimensionnement d'une tôle pliante

Le principe de base de l'étude théorique repose sur le calcul de la stabilité d'une tôle afin de déterminer l'épaisseur de la tôle pour le quel cette dernière plie pour une hauteur d'eau prédéterminée sur la tôle. La hauteur et la longueur de la tôle ainsi que la hauteur d'eau sur la tôle qui provoque son basculement sont fixées préalablement.



Efforts contre la tôle



Contraintes dans la tôle due à la flexion

**Figure II.6** Schéma de calcul du pliage de la tôle

$h$  : Hauteur d'eau à l'amont de la tôle.

$H$  : Hauteur de tôle.

e : Epaisseur de la tôle.

n : Contrainte maximale.

F : Force de compression et de traction.

Moment d'encastrement à la base :

$$\mathbf{M = h H^2 / 2 + H^3 / 6 = (H + 3h) H^2 / 6}$$

(H et h en mètre et M en tonne-mètre par mètre linéaire)

Moment résistant dans la tôle d'épaisseur e et de largeur b entraînant des contraintes maxi de compression et de traction n aux extrémités:  $\mathbf{M = 2Fe/3}$  avec  $\mathbf{F = ebn/4}$  soit  $\mathbf{M = nbe^2/6}$ .

Si l'on admet que la tôle plie lorsque la contrainte n atteint la valeur de la limite élastique de l'acier (estimée ici à 24 kg/mm<sup>2</sup>), le moment résistant maximum est donc

$\mathbf{M = 4 be^2}$ , soit, par mètre linéaire de tôle :  $\mathbf{M = 4000 e^2}$  (e en mm et M en Kg- mm) ou  $\mathbf{M = 0,004 e^2}$  (e en mm et M en tonne-mètre par mètre linéaire).

La tôle pliera donc pour une hauteur de lame h telle que

$$\mathbf{(H + 3h) H^2 = 0,024 e^2}$$
 (e en mm et H et h en m) .

## II.6 Conclusion

Cette étude théorique, qui a été effectuée sur une tôle pliante a eu pour objectif d'aboutir une relation mathématique simple, qui permet de calculer l'épaisseur d'une tôle qui plie pour une charge d'eau fixée précédemment.

D'après cette base, le développement théorique a permis d'arriver à une relation mathématique qui permet le calcul de l'épaisseur de la tôle en fonction de la charge sur cette dernière, et sa hauteur propre.

# Chapitre III

Etude expérimentale des  
déversoirs en tôles fusibles

## Chapitre III

### Etude expérimentale des déversoirs en tôles fusibles

#### III.1 Introduction

L'expérimentation sur modèle réduit physique représente le moyen le plus efficace pour valider un résultat théorique ou une modélisation numérique. A cet effet, ce chapitre traite une étude expérimentale qui a été réalisée sur plusieurs tôles fusibles dans le but de valoriser la méthode théorique de pré-dimensionnement des blocs d'un déversoir fusible.

Ce présent chapitre représente une étude expérimentale qui a été réalisée sur une série de tôles fusibles.

#### III.2 Description de la station expérimentale

Cette étude expérimentale a été réalisée au niveau de la station d'expérimentation des modèles réduits du Laboratoire d'Aménagement Hydraulique et Environnement du département d'hydraulique à l'université de Biskra. La 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.



**Figure III.1** Vue d'ensemble de la station d'expérimentation.

La station expérimentale contient une unité de pompage équipée de deux pompes qui débitent 180 l/s, raccordées par l'intermédiaire de deux conduites de refoulement de diamètre 200mm à un bassin de tranquillisation de l'écoulement. Ces deux conduites sont équipées de vannes de réglage de débit. A l'aval du bassin de tranquillisation, un canal de longueur 12m, de hauteur 1.2m au début puis 0,7 m et de largeur 1m qui joue le rôle d'un cours d'eau et le rôle d'un coursier selon l'objectif des expérimentations. L'une des parois de ce canal est vitrée pour permettre la visualisation de l'écoulement. Le canal est équipé par des prises de pression raccordées à un tableau manométrique qui permet la lecture des profondeurs d'eau à différents endroits du canal. Le débit restitué 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.

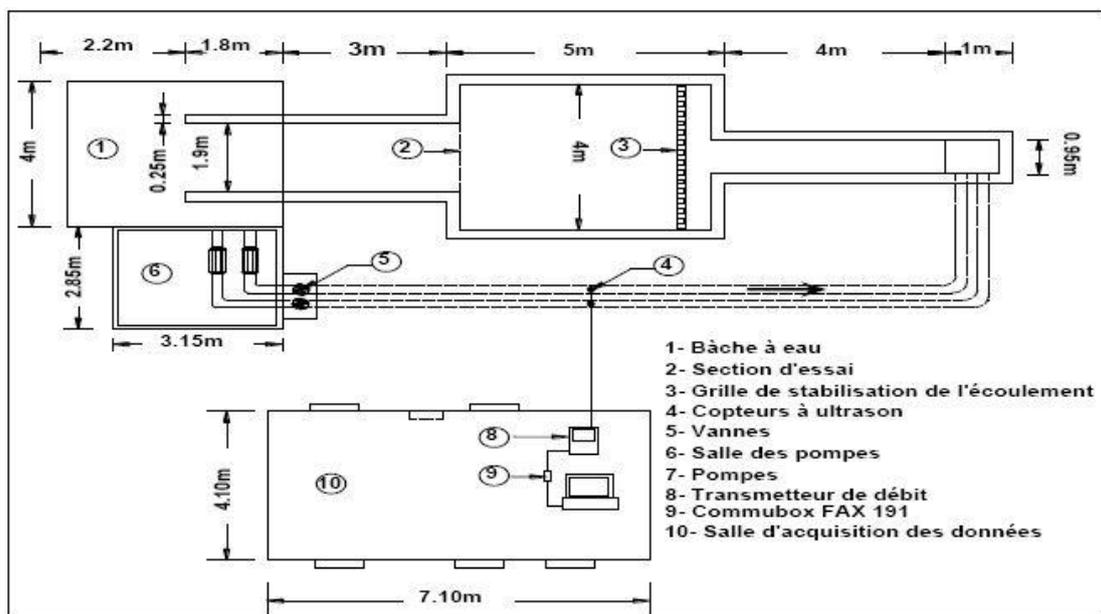
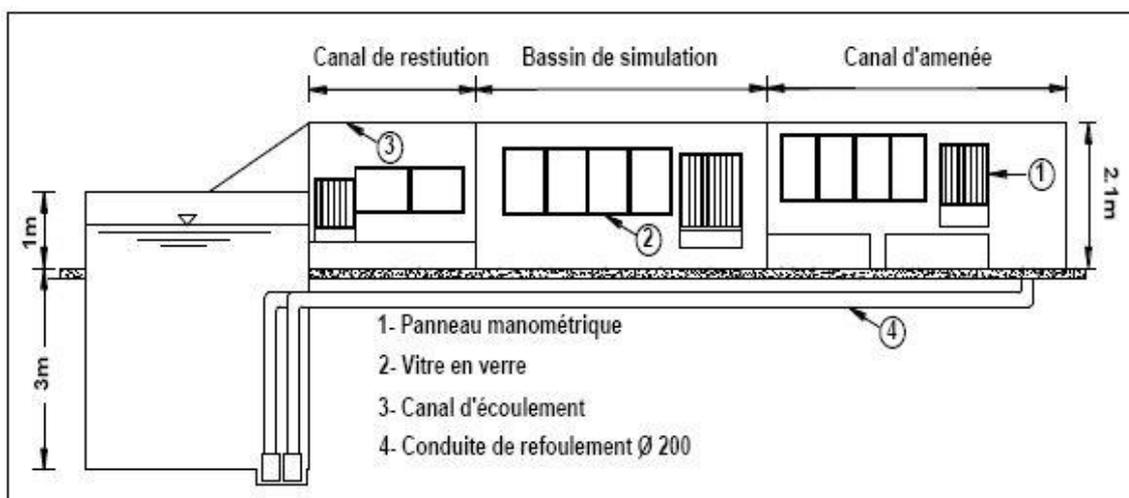


Figure III.2 Schéma de station d'expérimentation. (Vue en plan)



III.3 Schéma du dispositif expérimental (Vue de profil)



**Figure III.4** Vue aval du bassin des essais de la station d'expérimentation.

### III.2.1 Appareillage de mesure du débit qui transite le canal

Pour avoir des résultats fiables il est nécessaire de choisir des instruments de mesure de précision, ainsi, les débits qui transitent par le modèle sont mesurés par un débitmètre à ultrason de type Flowmeter de grande sensibilité. Ce débitmètre est raccordé à un PC par le biais de Commubox FXA 191, le logiciel Commuwin II permet l'enregistrement et le traitement des données des débits mesurés.

Le débitmètre à ultrason est constitué de deux parties distinctes :

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



### III.5 Débitmètre à ultrason Flowmeter 93W2

Le principe de débitmètre électromagnétique est : le liquide traversant le capteur qui correspond au conducteur. La tension induite, proportionnelle à la vitesse de passage est transmise à l'amplificateur par deux électrodes de mesure. Le débit volumique est calculé par le biais de la section de tube. Le champ magnétique est engendré par un courant continu alterné.



### III.6 Débitmètre électromagnétique

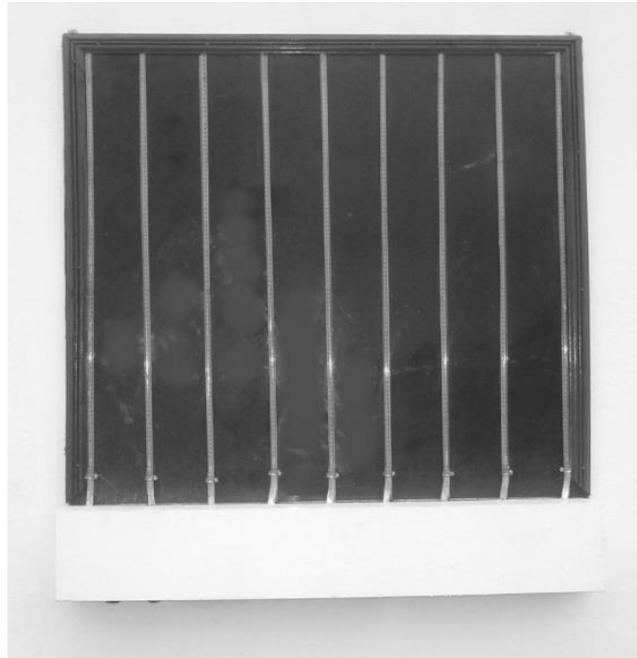
#### III.2.2 Appareillages de mesure des hauteurs d'eau :

##### a) Les tubes piézomètres :

Les charges piézométriques aux différents endroits du système sont mesurées par l'intermédiaire d'un réseau de prises de pression inséré au fond des canaux et liés à des tableaux

manométriques équipés de tubes transparents indiquant les profondeurs d'eau dans les différents endroits du système expérimental.

On a 23 piézomètres implantés d'une manière régulière le long du système expérimental ce qu'en appelle le réseau piézométrique.



**Figure III.7** Tableaux des manométriques de mesure des niveaux d'eau.

#### b) Les capteurs des niveaux

Les profondeurs d'eau sont mesurées par le biais du détecteur de niveau Prosonic T qui est un transmetteur de niveau compact destiné à la mesure de niveau continue et sans contact. Selon le capteur, la gamme de mesure s'étend jusqu'à 8 m pour les liquides. Grâce à la fonction de linéarisation, le capteur Prosonic T peut également être utilisé pour la mesure de débit en canal ouvert ou déversoir.



a- capteur du niveau



b-enregistreur du niveau

**Figure III.8** Capteur de niveau PROSONIC T

### III.3 Dispositif expérimental

L'objectif principal de ce travail est d'étudier la performance des tôles métalliques (acier) caractérisé par des épaisseurs différentes.

Le dispositif a été établi pour réaliser des essais sur des tôles en acier soumise à une force hydrostatique due à la pression de l'eau en amont et qu'elles se plient totalement après le déversement.

#### III.3.1 Modèles réduits des tôles pliantes

Pour commencer l'étude expérimentale, deux tôles en acier ont été préparé avec d'épaisseur  $e_1=0,7\text{mm}$  et  $e_2=1,2\text{mm}$ , et des hauteurs initiales  $H_1=35,4\text{cm}$  et  $H_2=47,9\text{cm}$ .

#### III.3.2 Modèle de déversoir de base

Dans la partie contractée du bassin de simulation, un mur en maçonnerie a été construit pour permettre la fixation des tôles métalliques, il joue le rôle d'un seuil déversant. La longueur du socle est de 0,4m, sa hauteur 0.20m, et sa largeur 0.15m.

Une rainure transversale le long du seuil d'une largeur un peu grande que l'épaisseur des tôles testées a été créé pour assurer l'encastrement de la tôle. Deux plaques en forex tracées verticalement et horizontalement ont été fixée sur les deux extrémités du déversoir de hauteur  $H_T=50\text{cm}$ , ceci permet à la fois d'orienté l'écoulement et de lire la hauteur de l'eau et la hauteur de la tôle durant le moment de chaque essai.



**Figure III.9** Déversoir à seuil libre

### III.4 Déroulement des essais

#### III.4.1 Préparation du modèle de déversoir en tôles fusibles

Pour réaliser les essais avec une précision satisfaisante, la tôle métallique doit être fixée sur le seuil tout en assurant sa verticalité. (Fig. III.10).



**Figure III.10** Vue aval du déversoir portant une tôle pliante

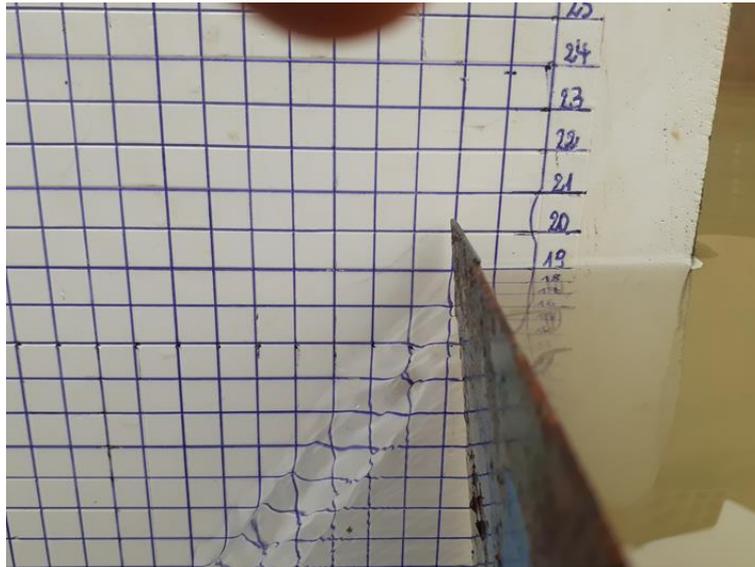
#### III.4.2 Déroulement des essais

Après l'amorçage de la pompe en laisse l'eau s'écouler dans le bassin, le niveau d'eau s'élève graduellement jusqu'à ce qu'il arrive au seuil du socle et continue à augmenter jusqu'à ce qu'il atteigne une certaine hauteur, la tôle perd alors son équilibre et commence à s'incliner progressivement vers l'aval. L'eau continue à monter jusqu'au déversement par-dessus du modèle, lorsqu'il atteint une charge d'eau spécifiée la tôle se plie. Le déroulement des essais est filmé simultanément avec une caméra pour permettre la lecture de la hauteur d'eau sur la tôle instantanément et par conséquent déterminer avec précision la hauteur de pliage de la tôle.



**Figure III.11** Vue amont du déversoir portant une tôle pliante

Après le pliage de la tôle, le niveau d'eau diminue rapidement dans le bassin, on enlève la tôle de déversoir et on prépare un autre essai avec une tôle plus courte en découpant la tôle pliée, puis on répète l'essai avec la même procédure. Dans le cas où la tôle a été pliée totalement par le premier débit on arrête la pompe, si le contraire où le pliage est partiel on augmente le débit qui transite par le déversoir jusqu'à un niveau qui provoque le pliage total.



**Figure III.12** Tableau de lecture de charge et de hauteur de la tôle

### III.5 Résultats des essais et interpretation

Les valeurs ( $Q$ ,  $h$  et  $H_p$ ) obtenus pour le modèle réduit testé sont traités pour déterminer la performance de chacun des modèles.

#### III.5.1 Relation entre la charge d'eau et la hauteur de pliage

Les essais expérimentaux ont été effectués sur deux modèles de tôles en acier d'épaisseurs  $e_1=0,7\text{mm}$ ,  $e_2=1,2\text{mm}$  et deux séries de hauteurs proposées.

La différence d'épaisseurs implique une hauteur de pliage différente pour chaque tôle. Ainsi, la diminution de la hauteur de la tôle elle-même après chaque essai a donnée des charges de déversement et des hauteurs de pliages différentes. Les valeurs obtenues de la charge d'eau sur la tôle et la hauteur pliage sont mentionnées dans les tableaux suivants.



**Figure III.13** Pliage partiel de la tôle après le déversement

**Tableaux III.1** Charges d'eau et hauteurs de tôles avant le déversement

e(mm)	H(cm)	Q(l/s)	h(cm)	e(mm)	H(cm)	Q(l/s)	h(cm)
0,7	35,8	23	27	1,2	47,9	23	37
0,7	28	25	25	1,2	43	23	36
0,7	26,8	26	26	1,2	39,5	25	36

Les premiers essais sur les deux tôles des hauteurs proposées ont donné un pliage total de chaque tôle avant le déversement pour des faibles débit, donc ces hauteurs ont été exclu.

Les résultats expérimentaux obtenus dans les tableaux suivants pour les deux modèles montrent que l'inclinaison d'une tôle d'une hauteur donnée se fait progressivement en fonction de l'augmentation du débit et s'arrête quand le débit se stabilise.

**Tableaux III.2** Charges d'eau et hauteurs de pliage pratiques obtenus pour une tôle d'épaisseur e=0,7mm

H(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Hp(cm)	H(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Hp(cm)
25,3	0	0	25,3	22,9	0	0	22,9
25,3	26	24,5	15,8	22,9	25	25,5	18
25,3	45	26,5	13,8	22,9	52	25,5	11,7
25,3	69	28,5	11,3	22,9	68	25,5	10,1
25,3	83	29	10,5	22,9	83	27	7,9
25,3	110	32	5,4	22,9	107	31,5	7,3
25,3	134	34	0	22,9	134	34	0

H(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Hp(cm)
21,4	0	0	21,4
21,4	25	29	20,7
21,4	51	29,5	17
21,4	67	30,5	13,4
21,4	83	31,5	11,8
21,4	108	34	10
21,4	134	35,5	/
21,4	150	37	0

H(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Hp(cm)
20	0	0	20
20	25	28,5	19,3
20	51	32,5	17,4
20	69	33,5	14,7
20	83	34	12,2
20	107	36,5	10,4
20	134	38	8,1
20	150	38,5	5,8

H(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Hp(cm)
18,4	0	0	18,4
18,4	24	27	18,4
18,4	52	33,5	17,4
18,4	69	36	16,2
18,4	83	37,5	15,5
18,4	108	40	12,7
18,4	134	42,5	10,3
18,4	150	44	9,6

**Tableaux III.3** Charges d'eau et hauteurs plis pratiques obtenus pour une tôle d'épaisseur  $e=1,2\text{mm}$

H(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Hp(cm)
37,8	0	0	37,8
37,8	25	36,5	34,5
37,8	25	24,5	12
37,8	53	26	12,5
37,8	70	30	11,6
37,8	133	38	6,4
37,8	150	40	4,5

H(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Hp(cm)
36	0	0	36
36	24	36	32,5
36	24	29	18,7
36	52	32,5	17,9
36	70	34	16,6
36	134	40	6,8
36	150	42,5	6,5

H(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Hp(cm)
35	0	0	35
35	24	38	33,5
35	24	37	28,8
35	52	34	19,7
35	69	35	19,2
35	134	42	11,3
35	150	43	8,9

H(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Hp(cm)
33	0	0	37,8
33	25	37,5	34
33	25	37	29,2
33	52	38	23,3
33	69	38,5	20,6
33	105	40	15,7
33	134	42,5	12,6
33	150	44,5	11,2

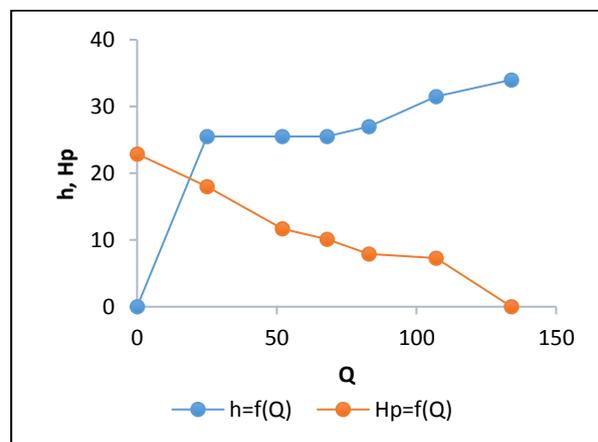
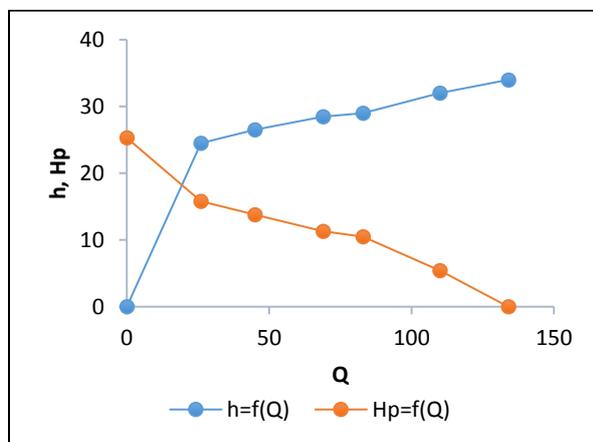
H(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Hp(cm)
31,5	0	0	31,5
31,5	22	38	30,1
31,5	52	41	26,3
31,5	69	41	23,2
31,5	105	42,5	18
31,5	134	44,5	14,6
31,5	150	46	13,9

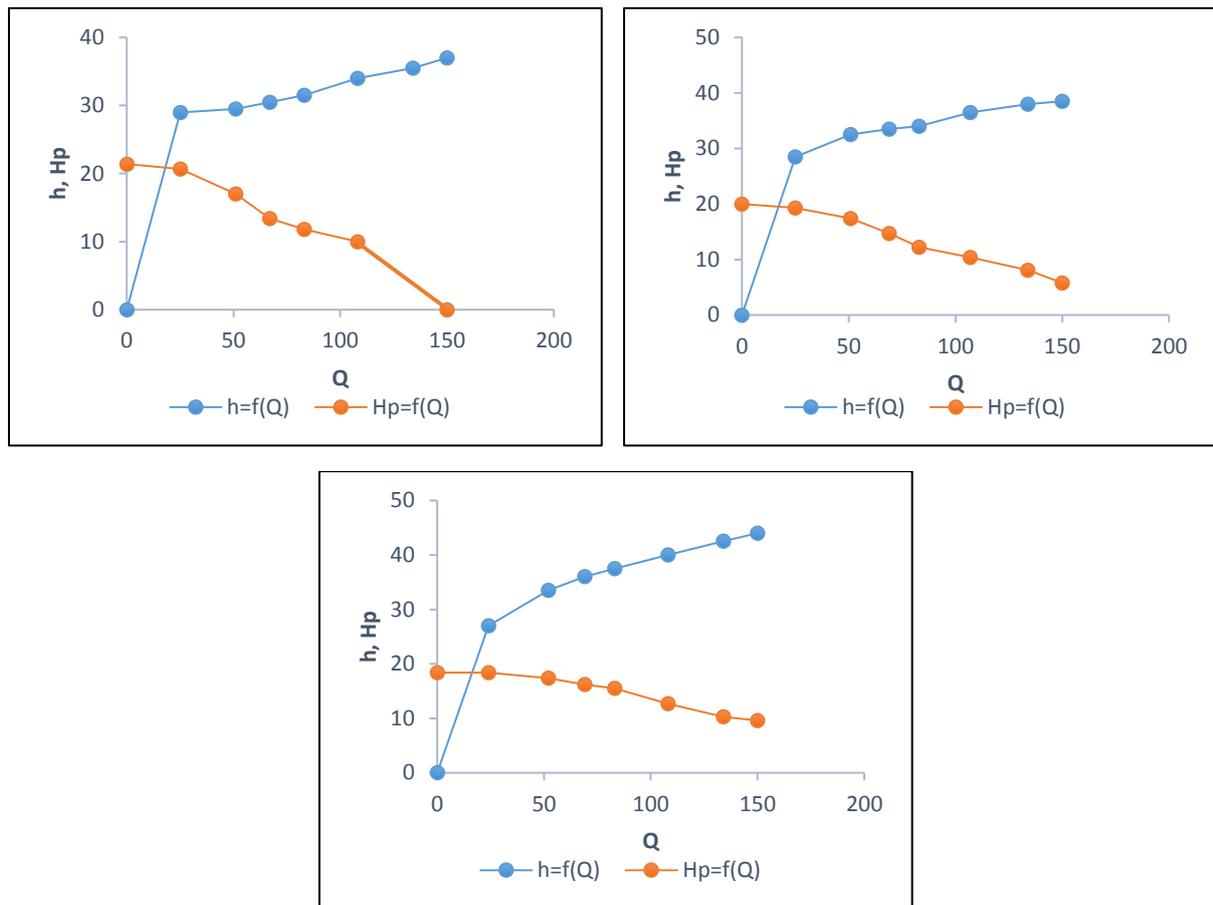
H(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Hp(cm)
29,9	0	0	29,9
29,9	25	37,5	29,1
29,9	51	42	27,7
29,9	67	44	26,2
29,9	108	46	21,2
29,9	134	47,5	19
29,9	150	50	17,2

H(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Hp(cm)
27,5	0	0	27,5
27,5	24	36	27
27,5	51	41,5	26,4
27,5	67	44	25,6
27,5	107	48	22,4
27,5	133	51	20,2

La représentation graphique des résultats obtenus sur les cinq hauteurs de la tôle d'épaisseur  $e=0,7\text{mm}$  montre que la charge d'eau et la hauteur de pliage sont inversement proportionnelles. Alors qu'aux trois premières hauteurs, la tôle se plie progressivement après le déversement suivant l'augmentation du débit jusqu'au pliage total, Contrairement aux trois hauteurs initiales le pliage se produit rapidement et en continue.

Pour les deux dernières hauteurs, on observe que la tôle n'atteint pas le pliage total, pourtant la charge d'eau atteint le maximum.

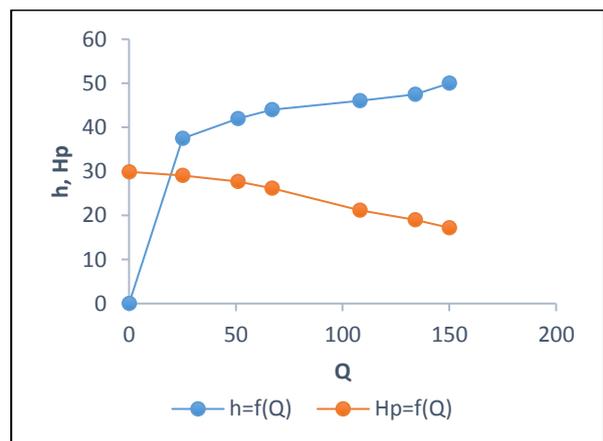
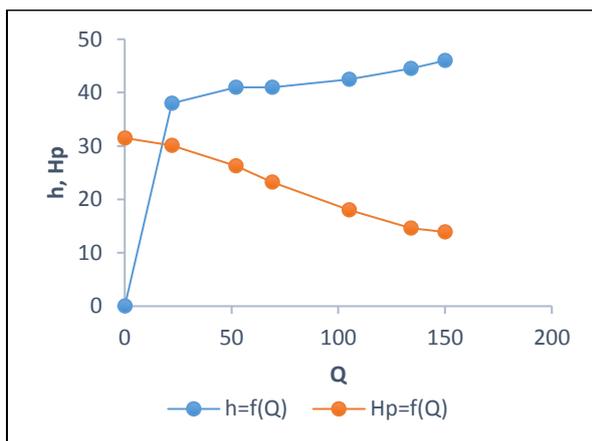
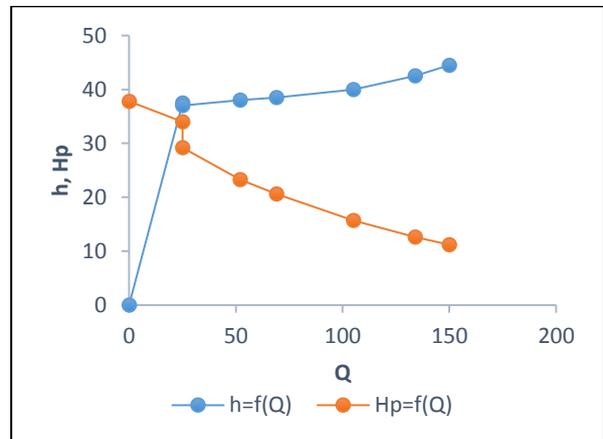
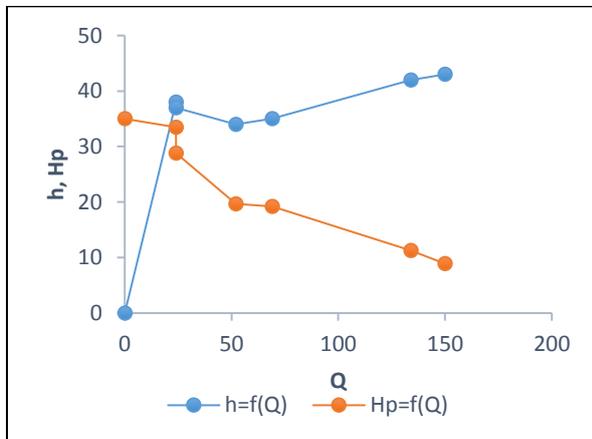
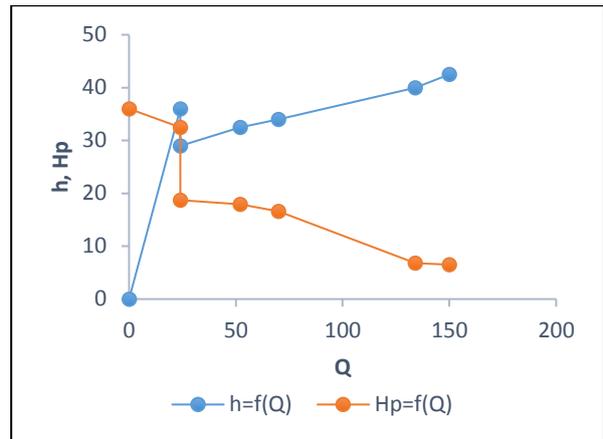
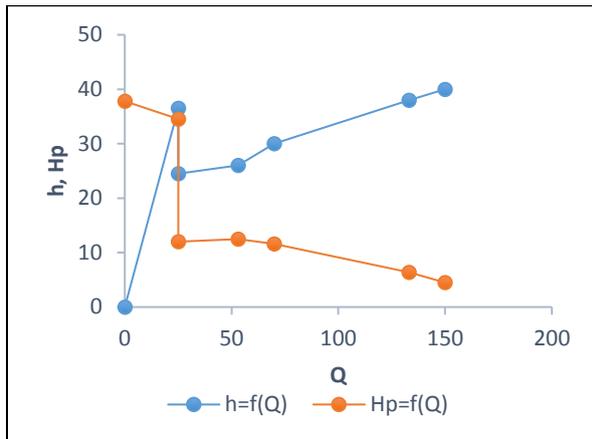


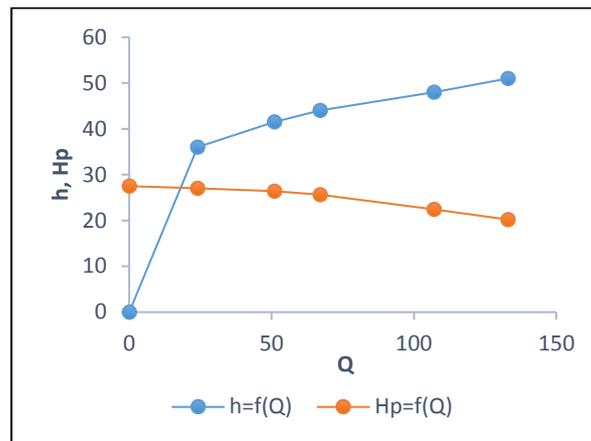


**Figure III.14** Courbes pratiques de la variation de la charge d'eau et la hauteur plie en fonction de débit pour épaisseur  $e=0,7(\text{mm})$

Les graphes des résultats obtenus de la tôle d'épaisseur  $e=1,2(\text{mm})$  semble plus clair, on remarque comment la charge monte jusqu'au début de déversement, et avec le premier pliage de la tôle, une descente rapide de la charge se produit, puis elle revient à monter avec l'augmentation du débit.

Selon les sept graphes on montre que la tôle n'a pas atteint pliage total, pourtant la hauteurs choisis sont inférieure à l'égale à la charge de pliage des initiales exclus.





**Figure III.15** Courbes pratiques de la variation de la charge d'eau et la hauteur pliée en fonction de débit pour épaisseur  $e=1,2\text{mm}$

De la comparaison entre les résultats de ces modèles de tôles, on obtient que la hauteur et l'épaisseur sont directement proportionnelles. Ce qui signifie que le pliage de la tôle fonction d'une relation de la forme  $(e)=f(H)$ .

Par exemple si on compare la tôle d'épaisseur  $e=1,2$  (mm), et de hauteur  $H=27,5$ (cm) avec la tôle d'épaisseur  $e=0,7$ (mm) et de hauteur  $H=25,3$ (cm), on remarque que la première se plie totalement à une charge d'eau  $h=34$ (cm), mais la deuxième se plie partiellement à une hauteur max  $H_p=20,2$ (cm). Alors que l'on remarque que l'épaisseur de la deuxième tôle est presque le double de l'épaisseur de la première, ce qui montre la grande influence de l'épaisseur sur le pliage.

### III.6 Conclusion

L'étude expérimentale qui a été effectuée sur les différents modèles des tôles pliantes, avec des épaisseurs différentes a été menée sur un déversoir qui comporte une seule tôle.

Les premiers résultats ont fait remarquer que la charge d'eau et la hauteur pliage sont inversement proportionnelles.

De la comparaison entre les résultats des modèles de tôles, on obtient que la hauteur et l'épaisseur sont directement proportionnelles. Ce qui signifie que le pliage de la tôle suit une loi de la forme  $e=f(H)$ .

La comparaison entre les résultats pratiques et théoriques montre qu'il y a peu de convergence entre la charge théorique et la première charge pratique de pliage, Ensuite, la différence commence à augmenter à mesure que la charge requise pour le pliage augmente.

# Conclusion Générale

## Conclusion générale

Les tôles pliantes peuvent être l'une des solutions efficace pour résoudre le problème de la réduction de la capacité de stockage des retenues d'un grand nombre de barrages équipés par des déversoirs rectilignes à seuil libre.

L'objectif fixé par ce travail, est d'aboutir à une méthode pour déterminer les dimensions des tôles pliantes, afin de permettre leur pliage successif lors des crues exceptionnelles, quand la hauteur de l'eau atteint une certaine valeur au-dessus de la tôle, qui correspond à une lame d'eau d'une forte crue.

L'étude bibliographique, dont l'objectif est de passer en revue les différents travaux de recherche, qui ont été effectués dans le domaine des déversoirs auto-stables a montré qu'il n'y a que peu des travaux à ce sujet.

Les déversoirs auto-stables sont devenus comme une alternative plus efficace que les vannes, en raison de leur principe de fonctionnement qui ne nécessite pas d'intervention humaine et d'énergie.

Les hausses fusibles représentent un dispositif de surélévation qui a été inventé en 1989 par François Lempérière, Ce système est l'équivalent d'un tampon fusible, semblable à des hausses multiples placées sur la crête du déversoir.

Les hausses fusibles représentent une méthode simple, sûre et robuste pour augmenter la capacité de stockage des barrages existants, et améliorer la capacité d'évacuation du déversoir, il est possible de combiner ces deux avantages.

Ce système peut être utilisé sur l'ensemble des nouveaux barrages, de sorte qu'il réduit le coût de la construction, et d'augmenter la sécurité, il peut être utilisé pour réduire la longueur du seuil du déversoir et la hauteur du barrage.

Les blocs fusibles représentent une autre alternative économique pour l'augmentation de la capacité de stockage et/ou l'augmentation la capacité d'évacuation des déversoirs, en particulier pour les petits barrages.

Les blocs fusibles représentent une solution économique pour les barrages des retenues existantes qui représentent des problèmes d'envasement provoquant la réduction de leur capacité de stockage, ou l'insuffisance de capacité de leurs déversoirs.

Les tôles fusibles ou pliantes sont des éléments en acier fixés côte à côte sur un seuil de déversoir, ces éléments sont de même hauteur mais d'épaisseurs différentes, ces tôles restent stables, jusqu'à ce que le niveau d'eau à l'amont atteinte une certaine hauteur, lorsque celle-ci dépasse cette hauteur, les tôles commencent à se plier jusqu'à être effacées successivement, en fonction de l'épaisseur du plus mince à la plus épaisse.

L'étude théorique du présent travail a permis de déterminer la relation approchée entre les paramètres géométriques des tôles fusibles.

Ainsi, Une méthode de dimensionnement théorique, a été développée pour déterminer les premières dimensions des tôles, cette méthode est basée sur le principe de l'élasticité limite, lorsque la tôle est fixée sur le seuil du déversoir et exposée à l'influence de la force hydrostatique. Le résultat de ce développement théorique a permis de présenter une relation mathématique qui permet de calculer l'épaisseur des tôles fusibles pour une hauteur d'eau donnée au-dessus de la tôle.

$$(H + 3h) H^2 = 0,024 e^2 \text{ (e en mm et H et h en m)}$$

Les résultats des calculs théoriques ont montré que :

- La charge d'eau nécessaire pour le pliage de la tôle varie légèrement par rapport à la diminution de la hauteur pour une épaisseur fixe.

Les essais ont été effectués pour vérifier les valeurs théoriques de la hauteur, qui a été calculée pour chaque tôle d'une épaisseur donnée, dont elle est censée de plier quand l'eau atteint une certaine hauteur calculée.

L'étude expérimentale effectuée sur une série de modèles de déversoir en tôles pliantes, avec des épaisseurs et hauteurs différentes a montré que :

- Les premiers résultats ont fait remarquer que la charge d'eau et la hauteur de pliage sont inversement proportionnelles.
- La comparaison entre les résultats des modèles de tôles montre que la hauteur et l'épaisseur sont directement proportionnelles. Ce qui signifie que le pliage de la tôle est soumis à la relation entre (e) et (H).
- La comparaison entre les résultats pratiques et théoriques montre qu'il y a peu de convergence entre la charge théorique et la première charge pratique de pliage, par contre, la différence commence à augmenter à mesure que la charge requise pour le pliage augmente.

Ces résultats peuvent être considérés comme un début dans le domaine de dimensionnement des tôles pliantes surtout qu'on connaît qu'il n'y a pas de méthode de dimensionnement de ce type de déversoir. Ce sujet nécessite d'autres travaux futurs pour aboutir à une méthode simple de dimensionnement des déversoirs en tôles fusibles.

# Références Bibliographiques

## Références bibliographiques

- Barcouda M., Cazaillet O., Cochet P., Jones B. A., Lacroix S., Laugier F., Odeyer C. et Vigny J. P., (2006), « Cost effective increase in storage and safety of most dams using fusegates or PK-Weirs". Vingt Deuxième Congrès des Grands Barrages, Barcelona.
- Bessière. C., S.E.E.E. (France), (1992), Submersible fusegates for surface spillway, 60ème Réunion Exécutive Symposium - GRENADE
- Carlier M., (1980), Hydraulique générale et appliqué, Eyrolles, pp. 189-215.
- Goutx D., Tourment R., Mériaux P., (2005), Eléments de conception hydraulique des déversoirs des endiguements de protection contre les inondations, Ingénieries n° Spécial, p 169-178.
- Hasan T. Kocahan, (2006), Hydraulic and design of fusegates. Business Development Manager, Hydroplus, Inc.
- Falvey H, and Treille P., (1995). "Hydraulics and design of fusegates", Journal of Hydraulic Engineering, 512-518.
- Falvey H.T., (2003). Hydraulic design of labyrinth weirs, Virginia, ASCE Press.
- Ghernouti I., (2012). La surélévation des barrages par le système des hausses fusibles (cas du barrage de Beni Amrane), Mémoire de fin d'études, ENSH (Blida).
- Ho Ta Khanh M., (2009) VNCOLD (Vietnam), Increasing the capacity of Small reservoirs by concrete fuseplugs : The Saloun Dam, ICOLD Congress Brasilia.
- Lempérière F., Vigny J.P., (2006). Economie et sécurité des déversoirs du Burkina Faso. 1er congrès national des barrages Burkina Faso.
- Le Blanc M., (2006). Raising a silted reservoir as an alternative to dredging: The example of Ghrib dam, Algeria Hydroplus, France.
- Monteil E. S., Piedrahita de Leon R, Le Blanc M., (2009), Maximizing the benefits of urra dam, Colombia. Hydropower & Dams, Issue Three.
- Ouamane A., Lempérière F., 2006. Design of a new economic shape of weir, International Symposium on Dams in the Societies of the XXI Century. Barcelona.

- Royet P., Degoutte G., (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.
- Sekkour I., Contribution à l'étude des déversoirs auto-stables, Memoire de Magistère 2016.
- Vigny J.P., (2006), Performance, coût, et limites d'emplois de divers déversoirs fusibles ou labyrinthes, Vingt Deuxième Congrès des Grands Barrages, Barcelona, Q84.