

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

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



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

## Mémoire de Master

Filière : Hydraulique

Spécialité : Ouvrages Hydrauliques

Thème

**Contribution à l'étude des déversoirs auto-stables**

Nom et Prénom de l'étudiante :  
KHEZZAR Sara

Encadreur : Pr. OUAMANE Ahmed

Co-encadreur : SEKKOUR Ilyese

Promotion Juillet 2019

## Remerciement

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 OUAMANE 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.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Professeure BENMEBAREK Naima pour son aide, sa générosité et ses conseils judicieux.

Un remerciement très spécial à mon enseignante, Doctorante en hydraulique, ma sœur DEBABECHE Bouthaina pour sa serviabilité et ses encouragements depuis notre première rencontre.

Je voudrais exprimer mes gratitude et respects aux membres du jury, pour m'avoir honoré en acceptant de lire, juger ce travail et leur contribution scientifique lors de l'évaluation de ce travail.

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

## Dédicace

Avec profonde gratitude et sincères mots, Je dédie ce modeste travail à mes parents, ma raison de vivre et ma source de bonheur, aucune dédicace ne pourrait exprimer mon amour et mon respect envers vous. Ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous avez consentis pour mon éducation et mon bien-être.

- ✚ A Ma tendre Mère Saida : Ma reine et Le support de ma vie.
- ✚ A mon très cher père Abdelaziz : Mon roi et l'homme Le plus parfait du monde.
- ✚ A mon très cher frère Ahmed Amir : Mon abri, Merci d'être toujours là à mes côtés.
- ✚ A ma très chère sœur Amira : Ma petite maman, Tu es mon exemple de la vie.
- ✚ A mon cher beau-frère Fateh : Notre talentueux médecin, Que dieu te protège.
- ✚ A ma plus belle étoile qui puisse exister dans l'univers, mon très cher neveu : Taïm Errahmane.
- ✚ A mes plus chères et aimables copines (the5) : Dounia ; Kenza ; Manel ; Noujoud ; Salma vous êtes toujours uniques et indéniables mes symboles d'amitié.

**KHEZZAR Sara**

## Résumé

La réhabilitation de l'évacuateur de crues par l'abaissement du seuil du déversoir existant puis le surélever par des blocs fusibles est l'une des techniques possibles pour l'amélioration de la sécurité des évacuateurs de crues ou pour l'augmentation de la capacité des retenues. Le principe de ce système est de placer des blocs en béton indépendants les uns des autres, côte à côte sur le seuil du déversoir. Ces éléments ont des caractéristiques un peu différentes les uns des autres, ce qui entraîne le basculement de chaque élément pour un niveau d'eau amont différent. Ainsi le débit aval augmente donc progressivement. Les études effectuées au laboratoire Aménagements Hydrauliques et Environnement de l'université de Biskra ont permis d'aboutir à une approche de pré-dimensionnement du déversoir en blocs fusibles avec sous-pression totale. Le présent travail entre dans le cadre des études qui doivent être entrepris pour aboutir à une approche de dimensionnement des blocs fusibles sans sous-pression (sous-pression inexistante)

**Mots clés.** Barrage, capacité de stockages, déversoir, système fusibles, blocs fusibles sans sous-pression, systèmes auto-stables.

## Abstract

The rehabilitation of the spillway by lowering the threshold of the existing weir and then raising it with fuse plugs is one of the possible techniques for improving the safety of spillways or for increasing the capacity withholding. The principle of this system is to place concrete plugs independent of each other, side by side on the threshold of the spillway. These elements have characteristics a little different from each other, which causes the tipping of each element for a different upstream water level. Thus, the downstream flow increases gradually. The studies carried out at the Laboratory of Hydraulic and Environmental Installations at the University of Biskra led to a pre-sizing approach of the weir in fuse plugs with total under-pressure. The present work is part of the studies that must be undertaken to achieve an approach to dimensioning the fuse blocks without under-pressure (under-pressure does not exist)

**Keywords.** Dam, storage capacity, weir, fuse system, fuse plugs without under-pressure, self-stable systems.

## ملخص

تعتبر تقنية إعادة تأهيل مصرف الفيضانات عن طريق خفض عتبة الهدار الحالي ثم رفعه بكتل من الصمامات، واحدة من التقنيات المستعملة لتحسين أمان المصرف أو لزيادة سعة الخزانات. مبدأ عمل هذا النظام يكون عن طريق وضع كتل خرسانية مستقلة بعضها عن البعض، جنباً إلى جنب على عتبة الهدار. تتميز هذه العناصر بخصائص مختلفة قليلاً عن بعضها البعض، مما يؤدي إلى إمالة كل عنصر لمستوى مياه أعلى في الخلف وبالتالي يزداد تدفق المصب تدريجياً. الدراسات التي أجريت في مختبر المنشآت الهيدروليكية والبيئة في جامعة بسكرة أدت إلى مقارنة لتحجيم كتل الصمامات تحت ضغط كامل. العمل الحالي هو جزء من الدراسات التي يجب القيام بها لتحسين هذه المقاربة والوصول إلى طريقة بسيطة لتحجيم كتل الصمامات مع عدم وجود ضغط.

**كلمات مفتاحية.** السد، سعة التخزين، الهدار، نظام الصمامات، كتل الصمامات دون ضغط، أنظمة الاستقرار الذاتي.

---

## Table de matières

Introduction générale.....	1
<b>CHAPITRE I</b>	
<b>Etat des connaissances sur les déversoirs auto-stables</b>	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Les déversoirs auto-stables.....	3
I.2.1 Définition des déversoirs auto-stables .....	3
I.2.2 Classification des déversoirs auto-stables.....	3
I.2.3 Les hausses fusibles.....	4
I.2.3.1 Définition.....	4
I.2.3.2 Types des hausses fusibles.....	5
I.2.3.2.1 Les hausses fusibles à seuil labyrinthe.....	5
I.2.3.2.2 Les hausses fusibles à crête rectiligne.....	7
I.2.3.3 Puits d'alimentation.....	9
I.2.3.4 Lest d'équilibrage des hausses.....	10
I.2.3.5 Chambre de mise en pression.....	10
I.2.3.6 Domaines d'application des hausses fusibles.....	11
I.2.3.6.1 Augmentation de la capacité de stockage des barrages.....	11
I.2.3.6.2 Amélioration de la sécurité des évacuateurs de crues.....	12
I.2.3.6.3 Moyen de sécurisé un système vanné.....	12
I.2.3.6.4 Régulation de l'écoulement dans les rivières.....	12
I.2.3.7 Principe de fonctionnement des hausses fusibles.....	12
I.2.3.8 Caractéristiques du débit.....	15
I.2.3.9 Stabilité des hausses fusibles.....	16
I.2.3.10 Principes de dimensionnement.....	20
I.2.3.11 Effet de la glace.....	21
I.2.3.12 Effet des séismes.....	22
I.2.4 Les blocs fusibles.....	22
I.2.4.1 Définition des blocs fusibles.....	22
I.2.4.2 Blocs fusibles sans sous-pression.....	23
I.2.4.3 Blocs fusibles avec sous-pression.....	24

---

I.2.4.4 Emplacement des Blocs fusibles.....	26
I.2.4.5 Dimensionnement des blocs fusibles.....	27
I.2.4.6 Construction des blocs fusibles.....	28
I.2.4.7 Des essais développés pour le dimensionnement du bloc fusible.....	29
I.2.4.8 La relation entre la hauteur de basculement et largeur du bloc.....	30
I.2.4.9 Effet de la disposition des blocs sur le seuil selon leur largeur.....	33
I.2.4.9 Effet de la forme d'arête amont (chanfreinée et arrondie).....	33
I.2.5 Autres dispositifs fusibles.....	35
I.2.5.1 Les hausses rabattables.....	36
I.2.5.2 Flashboard.....	37
I.2.5.3 Dignes fusibles.....	38
I.2.5.4 Les vannes automatiques.....	39
I.2.5.5 Les boudins gonflables.....	40
I.2.5.6 Les Murs en « L ».....	41
I.3 Conclusion.....	41

## CHAPITRE II

### Etude théorique pour le dimensionnement des blocs fusibles

#### (Blocs fusibles sans sous-pression)

II.1 Introduction.....	42
II.2 Description des blocs fusibles.....	42
II.3 Objectif de conception des blocs fusibles.....	43
II.3.1 Augmentation de la capacité des barrages.....	44
II.3.2 Amélioration de la sécurité des évacuateurs de crues.....	44
II.4 Principe de fonctionnement des blocs fusibles.....	45
II.5 Pré-dimensionnement des blocs fusibles.....	46
II.5.1 Dimensionnement hydraulique.....	47
II.5.2 Dimensionnement mécanique.....	47
II.5.3 Hauteur des blocs fusibles.....	47
II.5.4 Largeur des blocs.....	48
II.5.5 Développement théorique pour le dimensionnement d'un bloc fusible sans sous pression.....	48
II.5.5.1 Stabilité au glissement.....	50
II.6 Conclusion.....	50

---

## CHAPITRE III

### Etude expérimentale sur modèles réduits des blocs fusibles

#### (Blocs fusibles sans sous-pression)

III.1 Introduction.....	51
III.2 Description de la station expérimentale.....	51
III.2.1 Appareillage de mesure du débit qui transite le canal.....	53
III.2.2 Appareillages de mesure des hauteurs d'eau .....	55
III.3 Dispositif expérimental .....	57
III.3.1 Modèles réduits des blocs fusibles .....	57
III.3.2 Mur de séparation .....	59
III.3.3 Socle de basculement des blocs .....	59
III.4 Déroulement des essais.....	60
III.4.1 Préparation du modèle.....	60
III.4.2 Démarrage des essais.....	60
III.5 Résultats et discussion.....	61
III.5.1 Description d'écoulement.....	61
III.5.2 Comparaison entre la charge de basculement théorique et pratique .....	62
III.5.3 Comparaison entre les blocs fusibles avec et sans sous-pression .....	66
III.6 Conclusion.....	66
Conclusion générale.....	67
Références bibliographiques.....	69

## Liste des figures

### CHAPITRE I

#### Etat des connaissances sur les déversoirs auto-stables

<b>Figure I.1</b> Vue 3D d'une hausse fusible, (Lacroix. S, Spinazzola.U, Hydroplus).....	4
<b>Figure I.2</b> vue aval d'une hausse labyrinthe.....	5
<b>Figure I.3</b> Hausses fusibles à seuil labyrinthe sur le barrage Ghrib en Algérie (Hydroplus, France).....	6
<b>Figure I.4</b> Hausse labyrinthe à faible lame déversante (Falvey et al 1995).....	6
<b>Figure I.5</b> Hausse labyrinthe à lame déversante modérée (Falvey et al 1995) .....	7
<b>Figure I.6</b> Hausse labyrinthe à forte lame déversante (Falvey et al 1995).....	5
<b>Figure I.7</b> Vue amont des hausses à crête rectiligne (Hydroplus).....	7
<b>Figure I.8</b> Vue aval des hausses « grand froid ».....	8
<b>Figure I.9</b> Type de hausses en fonction du rapport h/H (Hasan T. Kocahan, 2006).....	8
<b>Figure I.10</b> Puits d'alimentation solidaire de la hausse (en acier).....	9
<b>Figure I.11</b> vue d'en bas d'une hausse labyrinthe.....	10
<b>Figure I.12</b> Augmentation de la capacité des barrages (Hydroplus).....	11
<b>Figure I.13</b> Amélioration de la sécurité des évacuateurs de crues à seuil libre (Hydroplus).	12
<b>Figure I.14</b> Principe de fonctionnement des hausses fusibles (hydroplus, 2006).....	13
<b>Figure I.15</b> Hausse fusible avec déversement sur la crête pour une crue modérée.....	13
<b>Figure I.16</b> Fonctionnement d'une hausse fusible lors de dépassement de l'eau le sommet de puits.....	14
<b>Figure I.17</b> Hausse fusible avec mise en pression de la chambre et basculement.....	14
<b>Figure I.18</b> Coefficient de débit pour les trois configurations des hausses fusibles en fonction de la charge relative h/H (Falvey et al, 1995).....	16
<b>Figure I.19</b> Système des forces agissant sur une hausse fusible.....	17
<b>Figure I.20</b> Moments dans la hausse fusible Model WLH (Falvey et al, 1995).....	19
<b>Figure I.21</b> Effet de glace sur la hausse fusible (Hydroplus).....	22
<b>Figure I.22</b> Vue en perspective d'un déversoir Blocs fusibles (Hydroplus).....	23
<b>Figure I.23</b> Blocs réalisés sur la retenue de Wedbila (Burkina Faso).....	23
<b>Figure I.24</b> Blocs sans sous-pression et basculement avant déversement.....	24
<b>Figure I.25</b> Bloc avec sous-pression et déversement avant basculement.....	25



<b>Figure I.26</b> Géométrie d'un bloc fusible avec sous-pression.....	25
<b>Figure I.27</b> Emplacement des Blocs fusibles.....	26
<b>Figure I.28</b> Blocs fusibles sur un seuil avec des murs séparateurs.....	27
<b>Figure I.29</b> Diagramme de stabilité des blocs fusibles.....	28
<b>Figure I.30</b> Bloc fusible placé sur un seuil après un arasement.....	28
<b>Figure I.31</b> Différentes phases de construction du bloc sur un seuil.....	29
<b>Figure I.32</b> Schéma de calcul de stabilité du bloc fusible (Sekkour.I).....	29
<b>Figure I.33</b> Courbe pratique de la variation de la charge de basculement en fonction de la largeur de bloc (Sekkour.I).....	30
<b>Figure I.34</b> Courbe théorique de la variation de la charge de basculement en fonction de la largeur de bloc (Sekkour.I).....	31
<b>Figure I.35</b> Variation de la hauteur de basculement en fonction de la variation du poids volumique (Sekkour.I).....	31
<b>Figure I.36</b> Comparaison entre la charge théorique et pratique (Sekkour.I).....	32
<b>Figure I.37</b> Schéma d'alignement d'une série de trois blocs sur le seuil.....	33
<b>Figure I.38</b> Schéma de calcul de stabilité de deux formes des blocs fusibles.....	33
<b>Figure I.39</b> Blocs fusibles à arête amont chanfreinée .....	34
<b>Figure I.40</b> Blocs fusibles à arête amont arrondie .....	34
<b>Figure I.41</b> Comparaison entre la charge théorique et pratique de la forme chanfreinée....	34
<b>Figure I.42</b> Comparaison entre la charge théorique et pratique de la forme arrondie.....	35
<b>Figure I.43</b> Hausses rabattables (Hydroplus).....	36
<b>Figure I.44</b> Déversoir Flashboard (Etats-Unis).....	37
<b>Figure I.45</b> Déversoir digue fusible (France).....	38
<b>Figure I.46</b> Schéma d'une vanne automatique (Hydroplus – France).....	38
<b>Figure I.47</b> Barrage anti-sel de 1969 avec son boudin gonflable.....	39
<b>Figure I.48</b> Barrage Milner avec les murs en L –USA.....	40

## CHAPITRE II

### Etude théorique pour le dimensionnement des blocs fusibles

#### (Blocs fusibles sans sous-pression)

<b>Figure II.1</b> Schéma descriptif d'un bloc fusible.....	43
<b>Figure II.2</b> Arasement du seuil pour l'emplacement des blocs fusible.....	43
<b>Figure II.3</b> Blocs fusibles pour augmenter la capacité des barrages.....	44
<b>Figure II.4</b> Blocs fusibles pour améliorer la sécurité des évacuateurs de crues.....	45

<b>Figure II.5.a</b> Bloc fusible fonctionne comme un barrage.....	45
<b>Figure II.5.b</b> Bloc fusible fonctionne comme un déversoir .....	46
<b>Figure II.5.c</b> Bloc fusible fonctionne comme un fusible.....	46
<b>Figure II.6</b> Schéma de calcul de stabilité du bloc fusible.....	48

### CHAPITRE III

#### Etude expérimentale sur modèles réduits des blocs fusibles

##### (Blocs fusibles sans sous-pression)

<b>Figure III.1</b> Vue d'ensemble de la station d'expérimentation.....	51
<b>Figure III.2</b> Vue aval du canal des essais de la station d'expérimentation.....	52
<b>Figure III.3</b> Schéma de la station d'expérimentation.....	53
<b>Figure III.4</b> Schéma du principe de mesure du débit par débitmètre à ultrason.....	54
<b>Figure III.5</b> Débitmètre à ultrason Flowmeter 93W2.....	54
<b>Figure III.6</b> Tableaux des manométriques de mesure des niveaux d'eau.....	55
<b>Figure III.7</b> Capteur de niveau PROSONIC T.....	56
<b>Figure III.8</b> Schéma d'installation du Capteur de niveau dans un canal à écoulement libre..	56
<b>Figure III.9</b> Détecteur de niveau à ultrason au niveau du canal.....	57
<b>Figure III.10</b> Blocs fusibles testés.....	58
<b>Figure III.12</b> Support métallique.....	59
<b>Figure III.11</b> Socle de basculement des blocs.....	60
<b>Figure III.12</b> Vue aval des blocs posés sur les pertuis.....	61
<b>Figure III.13</b> Déversoir à seuil épais en écoulement dénoyé.....	62
<b>Figure III.14</b> Déversoir avant et après le basculement d'un bloc fusible.....	63
<b>Figure III.15</b> Courbe pratique de la variation de la charge de basculement en fonction de la largeur de bloc.....	64
<b>Figure III.16</b> Courbe théorique de la variation de la charge de basculement en fonction de la largeur de bloc.....	65
<b>Figure III.17</b> Comparaison entre la charge théorique et pratique.....	66

## Liste des tableaux

### CHAPITRE I

#### État des connaissances sur les déversoirs auto-stables

<b>Tableau I.1</b> la Charge de basculement en fonction du rapport largeur/hauteur.....	6
---	---

### CHAPITRE III

#### Etude expérimentale sur modèles réduits des blocs fusibles

##### (Blocs fusibles sans sous-pression)

<b>Tableau III.1</b> Caractéristiques initiales des modèles réduits des blocs.....	58
<b>Tableau III.2</b> Caractéristiques réelles des modèles réduits après leur fabrication.....	59
<b>Tableau III.3</b> Hauteurs d'eau expérimentale de basculement obtenu pour chaque bloc...	63
<b>Tableau III.4</b> Caractéristiques géométriques et résultats théoriques et pratiques obtenus pour chaque bloc fusible .....	63

## Notations

$A_c$  : Surface de la chambre du fond ( $m^2$ )

$b$  : Largeur du bloc

$C_1, C_2$  et  $C_3$  : Constantes pour les valeurs de  $h / H$  supérieures à 0.1.

$C_d$  : Coefficient de débit

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

$F_{S1}$  Et  $F_{S2}$  : forces motrices (newton)

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

$Ge$  : Poids de l'eau sur le bloc

$G$  : Poids du bloc

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

$H$  : la hauteur de la hausse

$H$  : Hauteur du bloc

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

$L_w$  : Longueur du puits (m)

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

$P$  : Pression hydrostatique exercée par l'eau sur le bloc.

$Q$  : Débit ( $m^3/s$ )

$V_b$  : Volume d'eau dans le godet ( $m^3$ )

$V_c$  : Volume du matériau dans la base ( $m^3$ )

$V_S$  : Volume du matériau dans le godet ( $m^3$ )

$W$  : Largeur de la hausse fusible (m)

$W_w$  : Largeur du puits (m)

$X_G$  : Bras de levier de la force de du poids de l'eau (m)

$X_{Ge}$  : Bras de levier de la force de du poids de bloc (m)

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

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

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

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

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

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

$\rho_c$  : Densité du matériau dans la base ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_s$  : Densité du matériau dans le godet ( $\text{kg/m}^3$ )

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

$\gamma$  : Poids volumique de l'eau.

$\gamma_b$  : Poids volumique du béton.



## **Introduction générale**

La sécurité des barrages est un souci permanent des responsables, à toutes les phases du projet, de la construction, de l'exploitation. Mais la notion de sécurité est difficile à préciser objectivement. Pour assurer la stabilité des barrages, le choix du type de déversoir est très important car ce dernier représente un élément capital. Son rôle est d'assurer le passage des eaux en surplus dans des conditions favorables à la sécurité du barrage et sans créer de risque d'érosion ou d'inondation en aval.

Les changements climatiques et l'allongement des périodes de données statistiques disponibles font revoir continuellement les critères de sécurité des ouvrages hydrauliques (Millet et al., 1988). La révision des débits de crues extrêmes des grands ouvrages existants a amené à devoir réhabiliter bon nombre de structures d'évacuation (Machiels et al., 2009), c'est pourquoi, afin de palier ce problème de déficit de capacité d'évacuation des crues, il est nécessaire de développer et d'étudier de nouveaux types de seuil.

Parmi les nouvelles techniques utilisées dans le domaine de la sécurité des barrages, on distingue l'innovation des déversoirs auto-stables, ces techniques constituent une solution appréciable et intéressante, car elles permettent 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 en blocs fusibles, ce dispositif peut devenir une alternative efficace, en raison de la facilité de réalisation et le coût réduit des matériaux de construction.

Le principe des blocs fusibles consiste à mettre en place des blocs en béton indépendants les uns des autres, côte à côte sur le seuil d'un déversoir existant ou sur le sommet d'un barrage nouveau. Ces éléments en béton ont des caractéristiques géométriques un peu différentes les uns des autres ce qui entraîne le basculement de chacun de ces éléments pour un niveau d'eau amont différent.

La présente étude a été opérée par le biais d'étude théorique basée sur le principe de la stabilité limite qui est validée par une étude expérimentale menée sur plusieurs modèles réduits de blocs fusibles différents pour parvenir à déterminer les dimensions appropriées de chaque bloc.

L'objectif de cette étude est donc d'aboutir une nouvelle approche de prédimensionnement du déversoir en blocs fusibles sans sous pression (sans sous-pression inexistante) et la comparer avec les travaux réalisés au niveau de Laboratoire d'Aménagements Hydrauliques et Environnement à l'université de Biskra précédemment.

Pour atteindre l'objectif assigné, le travail s'articule autour d'une structure à trois chapitres :

Le premier chapitre présente une étude bibliographique sur les déversoirs auto-stables à travers une recherche approfondie sur ces déversoirs, en particulier le système des hausses fusibles, blocs fusibles et d'autres dispositifs fusibles, afin de mieux comprendre leurs caractéristiques géométriques, leurs dimensionnements, leurs principes de fonctionnement et leurs utilités.

Le second chapitre, décrit l'étude théorique de l'identification de la méthode développée de prédimensionnement des blocs fusibles sans sous pression.

Le troisième chapitre se rapporte à une étude expérimentale qui permettra l'expérimentation des blocs qui ont été dimensionnés par la méthode développée dans la partie théorique. L'interprétation et la confrontation des résultats expérimentaux avec la méthode théorique permettent de vérifier et de corriger la théorie par rapport au cas réel.



## CHAPITRE I

### Etat des connaissances sur les déversoirs auto-stables

#### I.1 Introduction

Le présent chapitre consiste à la description des différents types des déversoirs auto-stables (fusibles), qui présentent des nouvelles techniques utilisées dans le domaine de la sécurité des barrages pour but d'améliorer leur efficacité hydraulique, d'augmenter le volume de stockage de la retenue, et également de lutter contre l'insuffisance de la capacité d'évacuation des évacuateurs de crues.

Ce chapitre vise à mieux comprendre les caractéristiques géométriques des déversoirs auto-stables, leurs dimensionnements, leurs modes de fonctionnement hydrauliques et leurs avantages.

#### I.2 Les déversoirs auto-stables

##### I.2.1 Définition des déversoirs auto-stables

Les déversoirs auto-stables (fusibles) sont considérés comme un système d'accroissement très efficace. Le but principal de ce système est d'améliorer l'efficacité hydraulique des déversoirs, d'élever la capacité de stockage d'une retenue et donc de compenser la valeur envasée.

Les fusibles présentent un ouvrage supplémentaire qui s'ajoute au-dessus du seuil d'un déversoir déjà existé à fin d'augmenter la capacité utile du réservoir, tout en conservant des capacités d'évacuation satisfaisantes.

##### I.2.2 Classification des déversoirs auto-stables

Les déversoirs auto-stables présentent une structure construite pour dériver 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.

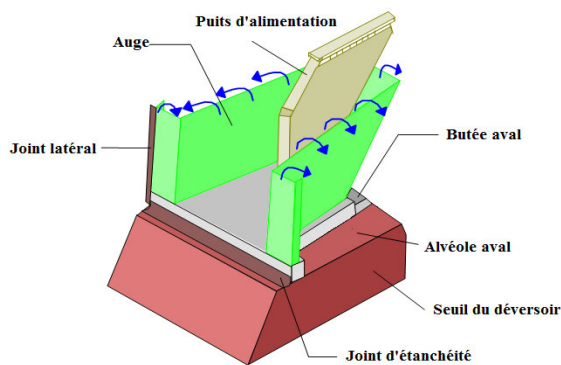
### I.2.3 Les hausses fusibles

#### I.2.3.1 Définition

Les hausses fusibles sont des éléments constitués en béton ou en acier qui permettent d'accroître la performance d'un déversoir existant. Elles peuvent être installées sur un nouveau ou un ancien barrage pour augmenter la capacité du stockage et l'évacuation du déversoir. Ces hausses fusibles ont été inventées en 1989 par François Lempérière, puis il a été breveté par Hydroplus aux Etats-Unis, en Europe et la plupart des autres pays (Falvey et al, 1995).

Ce système est l'équivalent d'un tampon fusible, semblable à des hausses multiples placées sur la crête de déversoir. Elles ont la forme d'un déversoir en labyrinthe dans lequel chaque hausse représente un cycle du labyrinthe (Degoutte, 2012).

Le dimensionnement et la géométrie des hausses fusibles, spécifiques à chaque projet, leur permettent de rester stables et de résister à certaines charges exceptionnelles (vagues, corps flottants, poussées de glace, séismes, etc.). Ce dispositif est composé par des éléments sous forme de vannes, chacune d'elles se compose de trois parties fondamentales, un godet fabriqué en métal ou en béton armé, une base et un puits d'admission qui est connectée à une chambre dans la base. L'accumulation d'eau de suintement dans la chambre de fond est évitée en prévoyant deux drains pour chaque chambre (Falvey, 1995).



**Figure I.1** Vue 3D d'une hausse fusible, (Lacroix. S, Spinazzola.U, Hydroplus)

Chaque hausse est équipée d'un puits calé pour coïncider avec un niveau de retenue prédéterminé. Lorsque ce niveau est atteint dans la retenue, l'eau pénètre dans un puits et s'accumule dans une chambre située sous la base de la hausse, ce qui crée une sous-pression qui déstabilise la hausse fusible et la fait basculer. À mesure que les hausses fusibles basculent, la brèche par laquelle l'eau peut s'échapper s'accroît, soulageant le barrage de la pression ou d'un déversement excessif qui pourrait l'endommager (Degoutte ; 1992)

### I.2.3.2 Types des hausses fusibles

Plusieurs modèles de hausse sont progressés pour répondre aux exigences spécifiques de chaque projet. Les hausses se différencient en dimensions, formes, poids et ainsi qu'en matériaux de fabrication.

Toutes les hausses fusibles possèdent la même composition, chacune se compose de quatre parties principales qui sont nécessaires pour acquitter sa fonction. Ces parties sont : la hausse, le puits d'alimentation, la chambre de mise en pression au contact du seuil et le lest. Chaque partie peut être caractérisée par une différente configuration selon les besoins demandés.

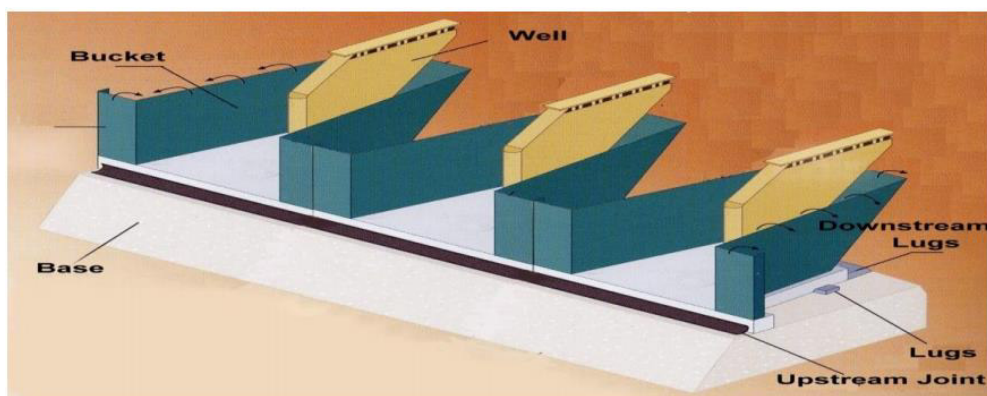
Jusqu'à maintenant, la taille des hausses peut être adaptée aux besoins du client ; Les projets mis en application jusqu'ici montrent que la taille des hausses fusibles est échelonnée entre 1,3 m et 6,6 m. (Ouamane. A. cours. Barrage.2007).

Il existe deux types de hausses fusibles qui sont utilisées dans le domaine, elles sont caractérisées par la forme de leur crête :

#### I.2.3.2.1 Les hausses fusibles à seuil labyrinthe

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, elle permet d'augmenter les capacités de déversement du seuil et de retarder ainsi le basculement des hausses.

Les hausses labyrinthe sont construites en acier ou en béton, elles peuvent également être mixtes : auge en acier, chambre en béton, tandis que le puits doit être en acier, ce qui nécessite la protection des parties métalliques par des interventions périodiques de traitement anticorrosion.



**Figure I.2** vue aval d'une hausse labyrinthe

Les hausses fusibles à seuil labyrinthe supportent des lames d'eau d'une hauteur comprise entre 30% et 150% de leur propre hauteur. Ces hausses possèdent une hauteur comprise entre 1 m et

3 m, cette dernière varie en fonction de l'objectif recherché. Elle est en général de l'ordre de 40% à 80% de la hauteur de la lame déversante en l'absence de hausse.

Ainsi, trois configurations standard sont disponibles et sont en fonction de la hauteur de la hausse (Hasan T. Kocahan, 2006) : large (W : Wide) ou étroite (N : Narrow) et suivant la charge de basculement, basse charge (LH : Low Head) et charge élevée (HH : High Head).

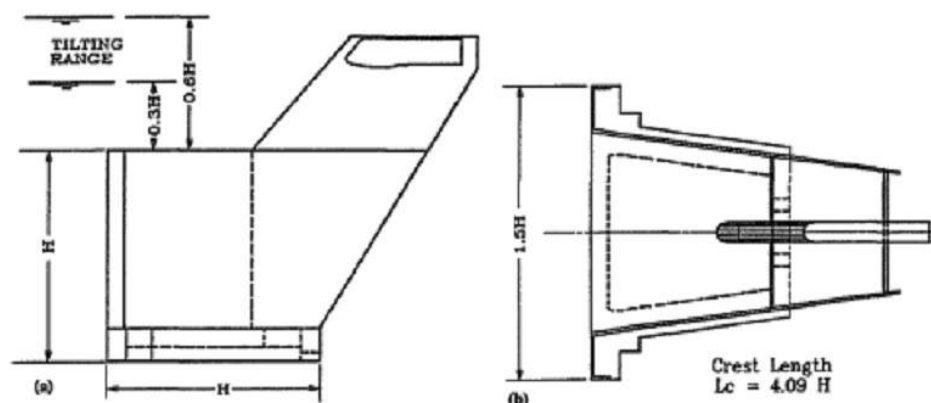


**Figure I.3** Hausses fusibles à seuil labyrinthe sur le barrage Ghrib en Algérie  
(Hydroplus, France)

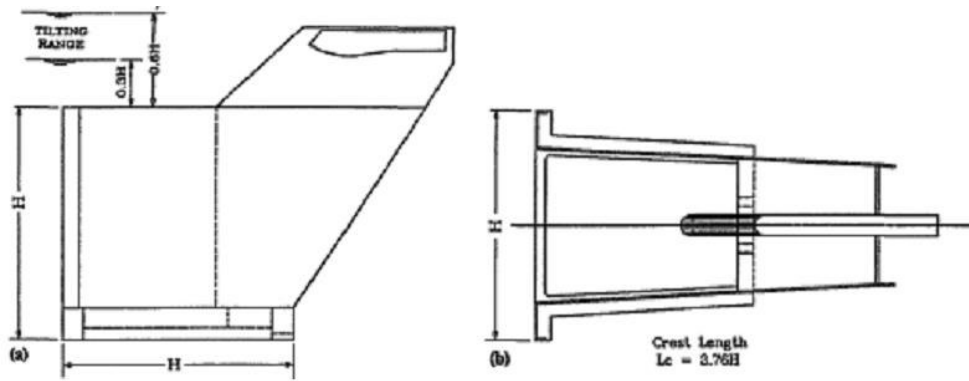
Les dispositifs de chacune de ses configurations sont donnés sur le tableau I.1, suivant :

**Tableau I.1** la Charge de basculement en fonction du rapport largeur/hauteur

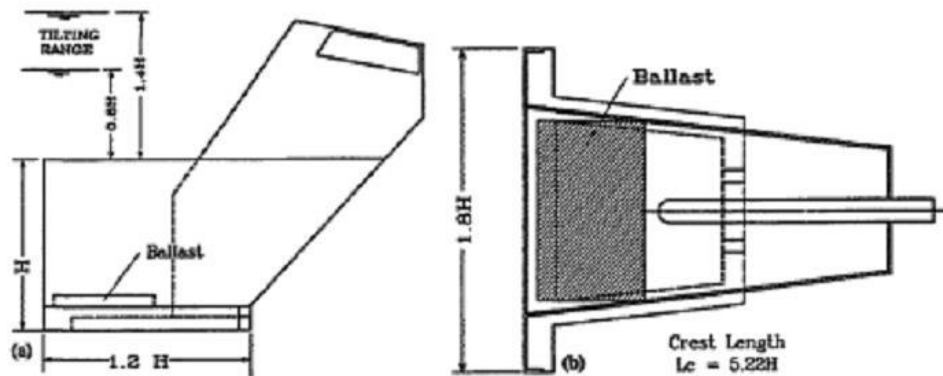
	la marge de basculement (en % de hauteur de la hausse)	Rapport largeur/hauteur
Etroite entonnoir bas (NLH)	entre 30% H et 70% H	1.0 (+/- 5%)
Large entonnoir bas (LLH)	entre 30% H et 70% H	1.5 (+/- 5%)
Large entonnoir élevé (LHH)	entre 70% H et 140% H	1.8 (+/- 5%)



**Figure I.4** Hausse labyrinthique à faible lame déversante (Falvey et al 1995)



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



**Figure I.6** Hausse labyrinthe à forte lame déversante (Falvey et al 1995)

### I.2.3.2.2 Les Hausses fusibles à crête rectiligne

Il existe trois types des hausses à seuil rectiligne :

- Hausses destinées aux très fortes lames d'eau :

Ces hausses sont profilées d'une façon à obtenir le meilleur coefficient d'écoulement et sont couramment construites en béton plein éventuellement coulé en place.

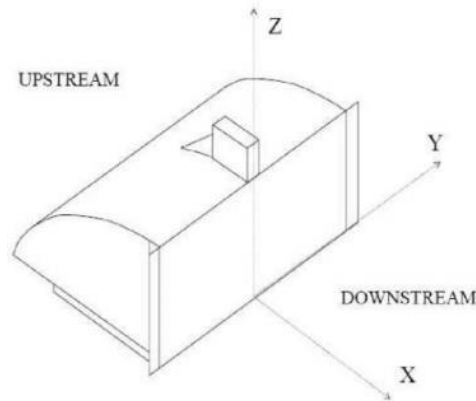
Ces hausses sont utilisées pour supporter des lames d'eau arrivant jusqu'à quatre fois sa hauteur propre. Leur puits est en béton ou en acier, elles peuvent être de grandes dimensions (20 m de large). Dans ce cas le labyrinthe perdrait une grande partie de son efficacité.



**Figure I.7** Vue amont des hausses à crête rectiligne (Hydroplus)

➤ Les hausses spéciales dites « grand froid » :

Ces hausses sont créées pour être utilisées dans des zones caractérisées par un froid extrême tels que les pays Scandinaves ou le Canada. Elles sont construites en acier ou en béton. Leur face amont est profilée et spécialement revêtue d'une façon à réduire le frottement et l'abrasion de la glace.



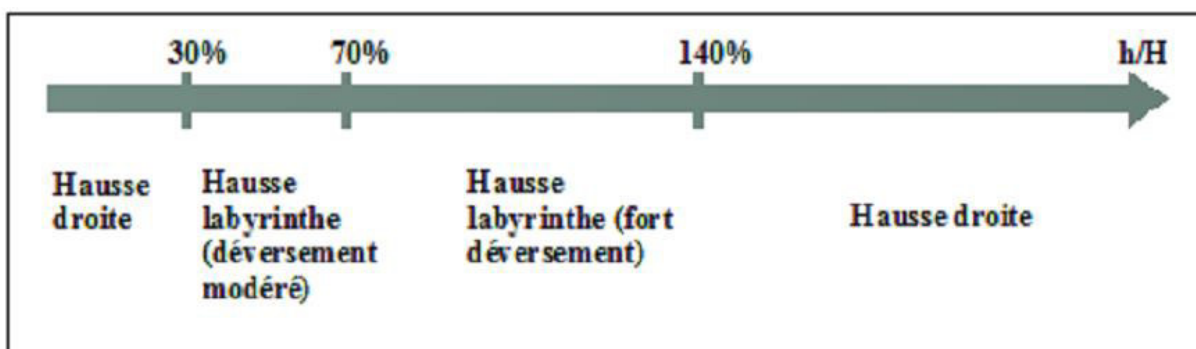
**Figure I.8** Vue aval des hausses « grand froid »

➤ Hausses 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 éventuelle défaillance.

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.

Le poids moyen de ces hausses est : 40 t pour 5 m de hauteur ; 100 t pour 8 m de hauteur ; 250 t pour 12 m de hauteur.



**Figure I.9** Type de hausses en fonction du rapport  $h/H$  (Hasan T. Kocahan, 2006)

### I.2.3.3 Puits d'alimentation

Le puits d'alimentation est couramment 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 pour empêcher le passage des corps flottants qui pourraient entraver le passage de l'eau. 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.10** Puits d'alimentation solidaire de la hausse (en acier)

Ces puits peuvent être regroupés dans des chambres aménagées dans les bajoyers. Le puits est alors relié à la chambre de mise en pression par une conduite noyée dans le seuil. Cette disposition permet de laisser le seuil libre de tout obstacle ; elle permet également un réglage encore plus précis et facilement ajustable des cotes de basculement.

Le basculement d'une hausse peut commander le basculement d'une hausse voisine par l'intermédiaire d'une conduite noyée dans le seuil et reliée à la chambre de celle-ci. (Deux hausses qui se partagent le même puits).

Le seuil peut être disposé en marches d'escalier, les premières hausses à basculer étant posées sur les marches les plus hautes. Cette disposition permet de limiter les pertes d'eau dans le cas où le maître d'ouvrage aurait fait le choix d'une période de basculement courte.

Les hausses peuvent être posées en corolle sur un déversoir en tulipe, moyennant des dispositions particulières.

#### I.2.3.4 Lest d'équilibrage des hausses

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 (Royet et Degoutte, 1992).

#### I.2.3.5 Chambre de mise en pression

La chambre de mise en pression est l'endroit où se forme la force de sous pression, qui participe au déséquilibre de la hausse et puis à son basculement. La chambre est fabriquée en acier ou en béton, elle est reliée directement avec le puits d'alimentation, qui fournit de l'eau lorsque sa hauteur dans le réservoir arrive au niveau de la cote d'ouverture du puits.

La chambre s'appuie à l'aval sur deux butées en béton pour empêcher le glissement de la hausse sur le seuil, l'étanchéité est assurée par un dispositif qui l'isole de la retenue.

Pour éviter la pression qui peut être formée par une fuite d'eau à partir du réservoir, la chambre est équipée de purges à des dimensions nettement inférieures à celle du puits d'alimentation de façon de provoquer la sous pression en cas de déversement d'eau dans le puits. (Royet et Degoutte, 1992).

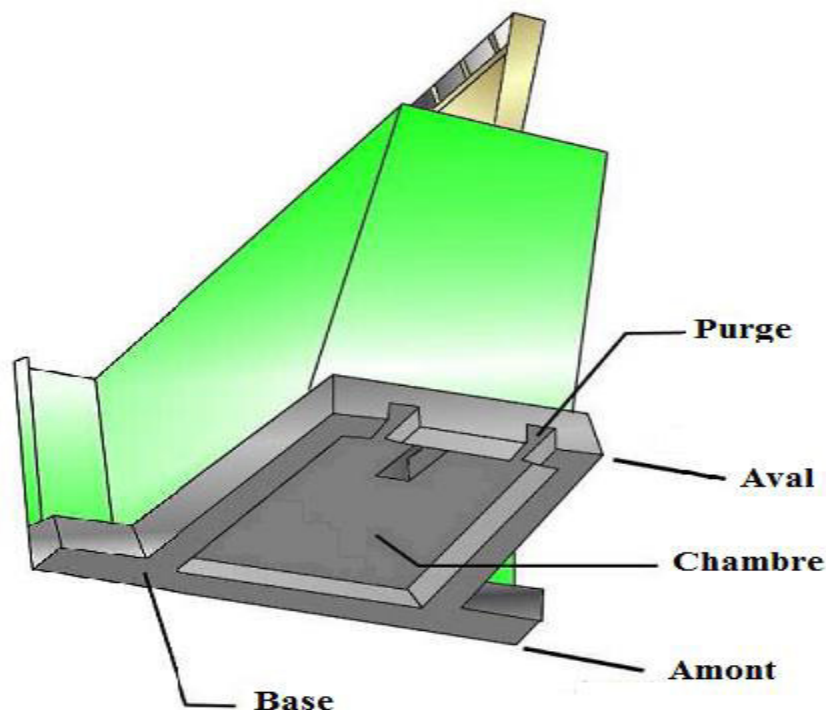


Figure I.11 vue d'en bas d'une hausse labyrinthe

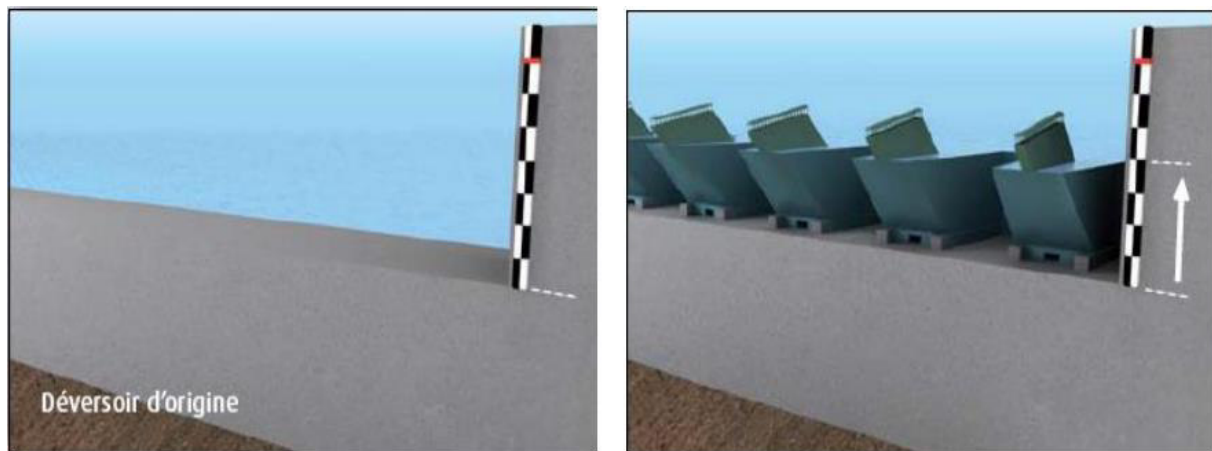


### I.2.3.6 Domaines d'application des hausses fusibles

#### I.2.3.6.1 Augmentation de la capacité de stockage des barrages

La rehausse du niveau de la retenue normale d'un barrage existant par une installation des hausses fusibles constitue une solution simple, économique et sûre pour répondre à un besoin en eau. Cette installation a pour but d'optimiser le niveau de retenue tout en assurant une sécurité de fonctionnement. La rehausse envisageable dépend du taux d'écrêtement de la crue de projet par celui-ci. Elle doit garantir que le débit de pointe de la crue sortante soit inférieur au débit de la crue entrante.

La crue du premier basculement est choisie de manière à optimiser les performances économiques du projet. En effet, le gain de stockage est important lorsque la période de retour du premier basculement est moins grande. Et cela s'explique du fait que plus la tranche de sécurité est exploitée, plus le débit à évacuer de la crue sera important et plus la période de retour correspondante grande. Mais pour que la hausse ne bascule pas et que le niveau des plus hautes eaux ne soit pas dépassé, il faut que la lame déversante soit réduite engendrant ainsi la diminution du débit à évacuer. D'où, la diminution de la période de retour de la crue.



**Figure I.12** Augmentation de la capacité des barrages (Hydroplus)

Généralement les barrages sont utilisés pour l'approvisionnement en eau potable ou à l'irrigation agricole, la croissance des besoins en eau, oblige les gestionnaires des eaux à trouver des techniques pour récupérer la tranche perdue qui est entre 1 à 3 mètres, ce qui représente 20% à 50% de la capacité de stockage.

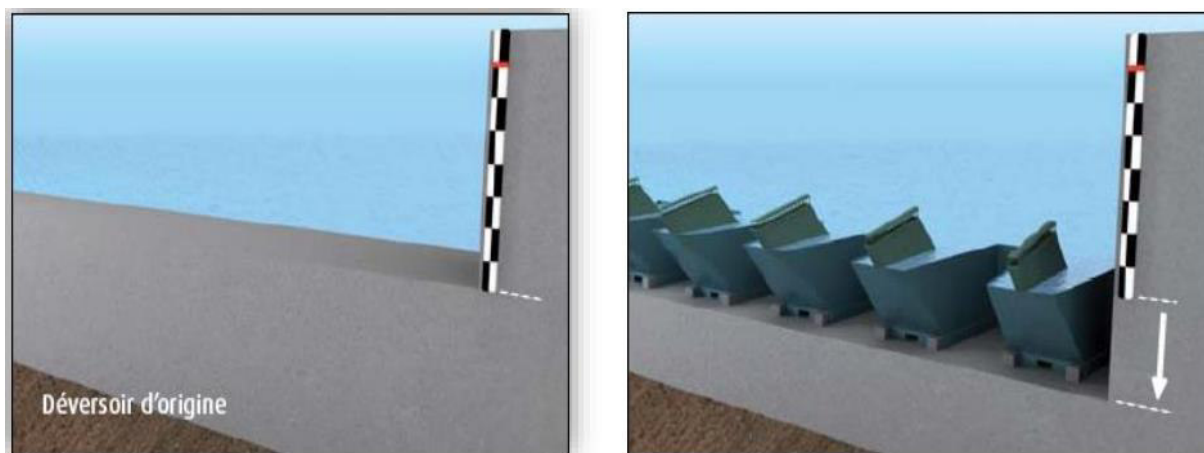
Les hausses fusibles augmentent la hauteur du niveau normal et par conséquent, la capacité de stockage tout en gardant l'avantage du seuil libre qui ne nécessite pas l'intervention humaine (Royet et Degoutte, 1992).

### I.2.3.6.2 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. Pour se faire, 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.

Ainsi, 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 (Royet et Degoutte, 1992).



**Figure I.13** Amélioration de la sécurité des évacuateurs de crues à seuil libre (Hydroplus)

### I.2.3.6.3 Moyen de sécuriser un système vanné

L'installation des hausses fusibles en complément d'un système vanné permet 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 (Hydroplus).

### I.2.3.6.4 Régulation de l'écoulement dans les rivières

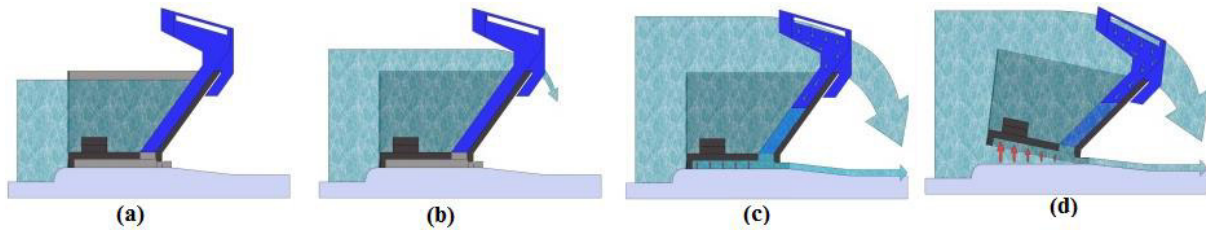
En cas de crue exceptionnelle, les hausses fusibles installées sur un déversoir latéral de rivière, permettent de protéger des zones habitées en déviant une partie de la crue vers des bassins de stockage temporaire. (Polders) (Hydroplus)

### I.2.3.7 Principe de fonctionnement des hausses fusibles

L'idée de départ est d'obstruer le seuil sur une hauteur de l'ordre de 1 à 3 mètres par des éléments auto-stables jusqu'à une certaine cote du plan d'eau amont et qui s'effacent automatiquement en cas de forte crue. (Royet et Degoutte, 1992)

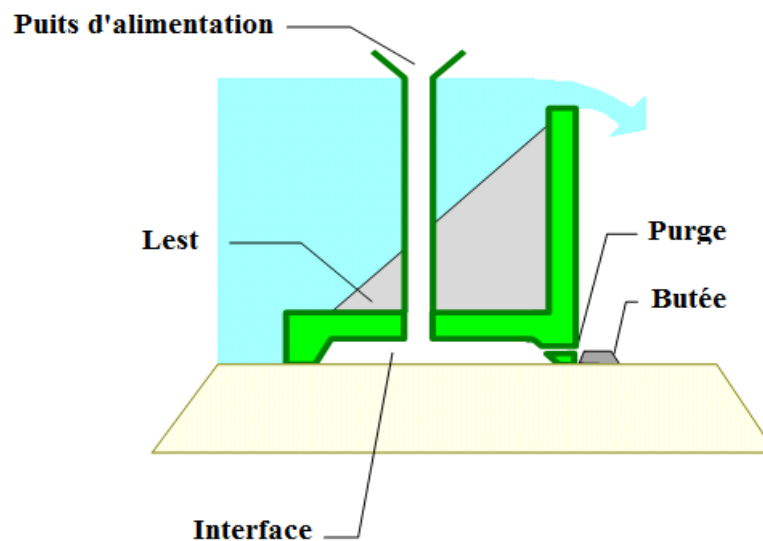
Lorsque le niveau d'eau est bas, la "hausse" agit comme un prolongement du barrage. En cas de crue faible ou moyenne, elle joue un rôle de déversoir. En cas de crue exceptionnelle, elle joue

un rôle de "fusible », elle bascule afin d'accroître les capacités d'évacuation du déversoir. Selon le niveau d'eau dans la retenue, les éléments des hausses fonctionnent comme un barrage, un déversoir, ou un fusible. (Falvey, 1995)



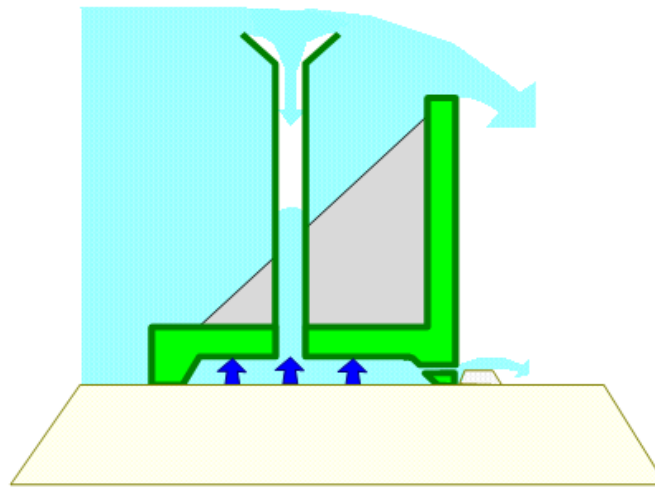
**Figure I.14** Principe de fonctionnement des hausses fusibles (hydroplus, 2006)

- a) Lorsque le niveau de l'eau est inférieur ou égal au niveau d'arase des hausses, celles-ci fonctionnent comme un barrage. Chaque élément est largement auto stable et résiste à la poussée hydrostatique grâce à son poids propre, au poids de l'eau contenue dans l'alvéole amont et à la butée en pied aval de la hausse (Royet et Degoutte, 1992).



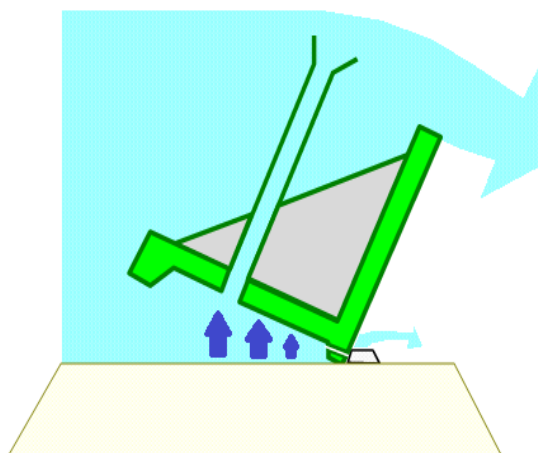
**Figure I.15** Hausse fusible avec déversement sur la crête pour une crue modérée

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



**Figure I.16** Fonctionnement d'une hausse fusible lors de dépassement de l'eau le sommet de puits

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



**Figure I.17** Hausse fusible avec mise en pression de la chambre et basculement

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

Au fur et à mesure de la montée de l'eau, les modules basculent les uns après les autres. Leur côte de basculement est réglée avec précision par le calage en hauteur de leur puits, de manière à ce que l'effacement des hausses fusibles soit progressif afin d'atténuer l'effet des crues exceptionnelles (Lacroix et Al, 2012).

### I.2.3.8 Caractéristiques du débit

Le débit évacué par la crête des hausses fusibles a les mêmes propriétés que les déversoirs à seuil libre. Les caractéristiques de débit qui transite par les hausses fusibles ont fait l'objet des études hydrauliques au Laboratoire National d'Hydraulique (LNH) à Chatou (France) et au laboratoire Tennessee Valley Authority (TVA) ° à Norris (Etats Unis).

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

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

$Q$  : Débit ( $m^3/s$ )

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

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

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

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

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

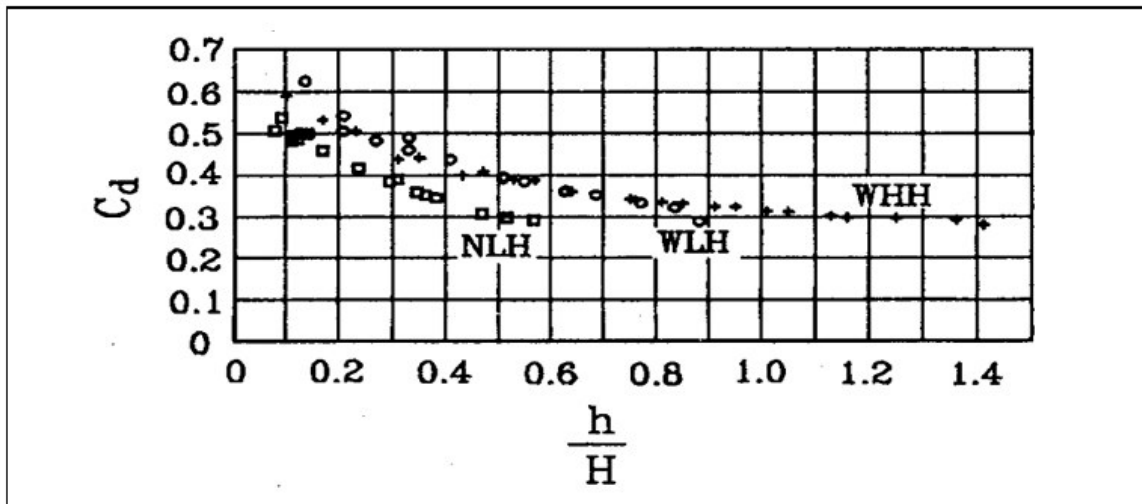
$$C_d = C_1 \left( \frac{h}{H} C_2 \right)^{C_3} \quad (I.2)$$

Où :

$H$  : la hauteur de la hausse

$C_1$ ,  $C_2$  et  $C_3$  : Constantes pour les valeurs de  $h / H$  supérieures à 0.1.

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



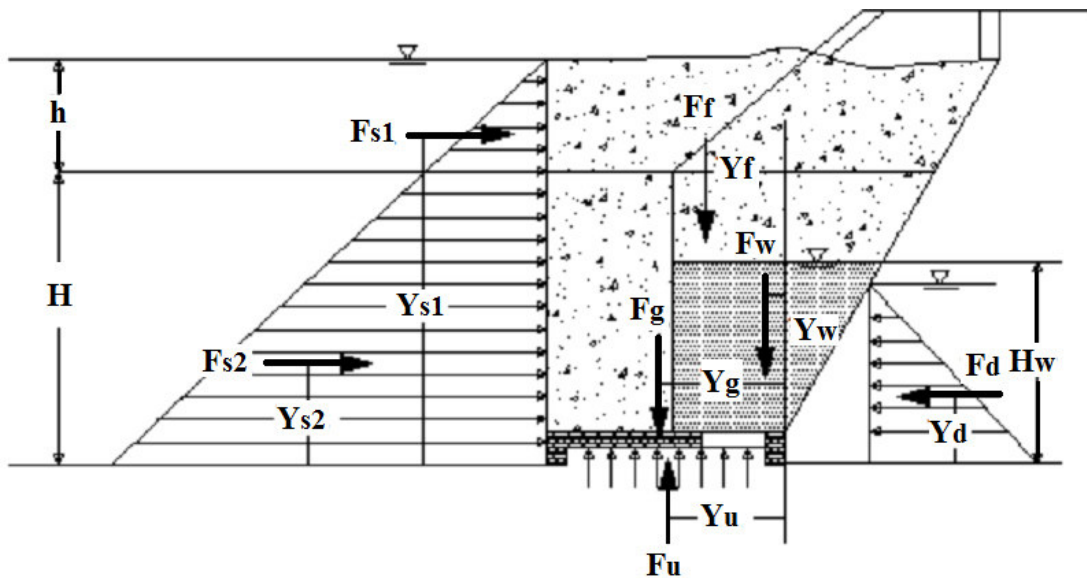
**Figure I.18** Coefficient de débit pour les trois configurations des hausses fusibles en fonction de la charge relative  $h/H$  (Falvey et al, 1995)

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

### I.2.3.9 Stabilité des hausses fusibles

Les hausses fusibles sont des éléments auto-stable jusqu'à une cote d'eau déterminées, qui au-delà fonctionnent comme un fusible, c'est-à-dire qu'elles basculent sous la poussée de l'eau. Le basculement des éléments est provoqué automatiquement, à une cote précise, prédéterminée par la mise en charge d'une chambre aménagée à la base des éléments.

La hausse, simplement posée sur le seuil, s'appuie à l'aval sur ses deux butées. Le système de force auquel elle est soumise peut-être décomposé de la façon suivante et exprimé en moment par rapport aux butées aval.



**Figure I.19** Système des forces agissant sur une hausse fusible

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

a) Avant remplissage de la chambre

- Forces stabilisatrices :
  - Poids propre de la hausse
  - Poids de l'eau dans l'alvéole amont
  - Butée aval
- Forces motrices :
  - Poussée hydrostatique sur la face verticale amont.

b) Après remplissage de la chambre

- Forces stabilisatrices :
  - Poids propre de la hausse
  - Poids de l'eau dans l'alvéole amont
  - Butée aval
- Forces motrices :
  - Poussée hydrostatique sur la face verticale amont
  - Sous-pression sous la base de la hausse.

#### a. Stabilité au renversement

Les moments de renversement résultent des forces amont sur la hausse (moment amont) et la force de la sous-pression dans la chambre (le moment de sous-pression). La restauration des moments est assurée 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 :

$$M_s = M_{s1} + M_{s2} \quad (I.3)$$

$$\text{Où} \quad M_{s1} = F_{s1}Y_{s1} = \frac{\rho_w g h}{2} (hW_w) \left( H + \frac{h}{3} \right) = \frac{\rho_w g W_w h^2 (3H + h)}{6} \quad (I.4)$$

$$\text{Et} \quad M_{s2} = F_{s2}Y_{s2} = \rho_w g h (HW_w) \frac{H}{2} + \frac{\rho_w g h}{2} (HW_w) \frac{H}{3} = \frac{\rho_w g W H^2 (H + 3H)}{6} \quad (I.5)$$

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 :

$$M_u = \rho_w g A_c H_w Y_u \quad (I.6)$$

$A_c$  : Surface de la chambre du fond (m<sup>2</sup>)

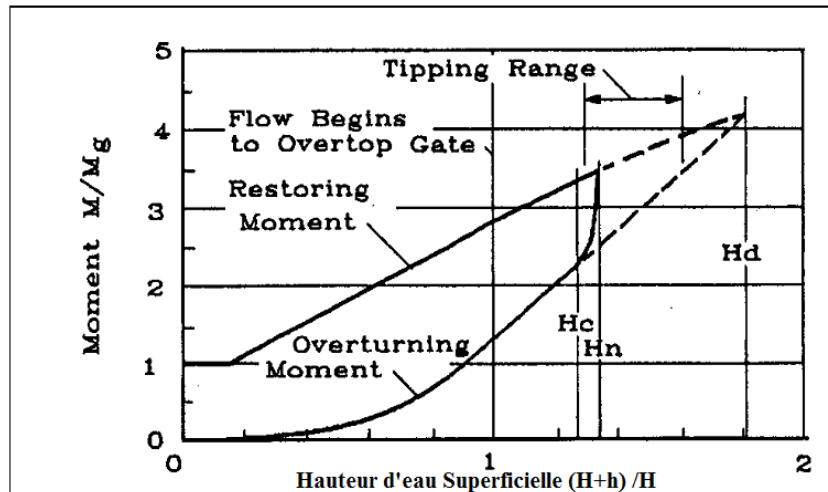
$H_w$  : Profondeur d'eau dans le puits (m)

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

$\rho_w$  : Densité de l'eau (kg/m<sup>3</sup>)

La chambre du fond se caractérise par une grande superficie. A cet effet, le moment ( $M_u$ ) augmente rapidement avec l'accroissement de la hauteur d'eau sur la hausse. L'effet sur le moment est montré dans la figure (I.19) par la ligne continue presque verticale entre les hauteurs d'eau superficielles ( $H_c$ ) et ( $H_n$ ).





**Figure I.20** Moments dans la hausse fusible Model WLH (Falvey et Al, 1995)

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 et al, 1995). Le moment de la hausse est donné par :

$$M_g = F_g Y_g = \rho_s V_s Y_s + \rho_c V_c Y_c \quad (I.7)$$

Où :

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

$V_c$  : Volume du matériau dans la base ( $m^3$ )

$V_s$  : Volume du matériau dans le godet ( $m^3$ )

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

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

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

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

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

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

$$M_w = \rho_w g (V_b Y_b + W_w H_w L_w Y_w) \quad (I.8)$$

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

$L_w$  : Longueur du puits (m)

$V_b$  : Volume d'eau dans le godet ( $m^3$ )

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

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

Le moment aval est dû au niveau d'eau sur les côtés aval de la hausse. Le niveau varie d'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 :

$$M_d \approx \frac{\rho g [(H+h)/3]}{2} \left[ \frac{H+h}{3} \right] W_w \frac{H+h}{3} \approx \frac{\rho g (H+h)^3 W_w}{182} \quad (I.9)$$

### 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-12). L'ampleur de la force exercée sur la butée peut être estimée en calculant la force hydrostatique amont appliquée sur la hausse.

La force qui provoque le glissement est donnée par :

$$F_s = F_{S1} + F_{S2} = \frac{\rho_w g h^2 W_w}{2} + \frac{\rho_w g (H+2h) H W}{2} = \frac{\rho_w g H^2}{2} \left( \frac{h^2}{H^2} W_w + W + \frac{2h}{H} W \right) \quad (I.10)$$

Où :

$W$  : Largeur de la hausse fusible (m)

$W_w$  : Largeur du puits (m)

$\rho_w$  : Densité de l'eau (kg/m<sup>3</sup>)

$F_{S1}$  Et  $F_{S2}$  : forces motrices (newton)

Les forces  $F_{S1}$  et  $F_{S2}$  sont montrées dans la figure (I-32). Cette équation est conservatrice dans laquelle on ignore des forces de frottement entre la hausse et le bord de déversoir.

### **I.2.3.10 Principes de dimensionnement**

Les hausses fusibles sont utilisées sur un nouveau barrage où le déversoir est conçu avec une forme qui permet la pose des hausses, ou sur un barrage existant après des interventions effectuées à travers un arasement du seuil de manière qui facilite l'emplacement des éléments sur la crête. La mise en place des hausses fusibles doit être soumise à des normes pour éviter la submersion du barrage ou l'évolution des inondations à l'aval d'ouvrage.

#### a) Dimensionnement hydraulique

L'étude hydrologique est la base principale qui est adopté pendant l'étude de la construction d'un barrage sur un cours d'eau. Cette étude commence par la collecte et l'analyse de données disponibles pour le cours et le bassin versant notamment les précipitations et les apports entrants qui déterminent la capacité de stockage de la retenue du barrage, et la hauteur de l'eau dans le réservoir qui arrive à la cote normale de la retenue, tandis que la crue de projet arrive à une valeur maximale pour l'élévation du niveau d'eau à la cote des plus hautes eaux, qui est

considérée comme la cote de stabilité du barrage. Pendant la période d'exploitation du barrage, l'actualisation de l'étude hydrologique continue, ce qui conduit dans de nombreux cas à revoir la capacité d'évacuation du déversoir existant et prévoir son remodelage pour assurer l'évacuation de la crue actualisée. L'utilisation des hausses fusibles sur le déversoir a pour objectif de protéger le barrage et préserver sa stabilité suite à la révision de la crue du projet. Les résultats de l'étude hydrologique selon la révision mettent en évidence deux cas distincts : Dans le cas où la vérification de l'étude hydrologique n'amène pas à modifier le débit de la crue de projet, l'installation des hausses fusibles permet de récupérer une tranche utile de retenue jusqu'à 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.

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, un dérasement du seuil s'impose pour le passage de la crue de projet. La tranche d'eau gagnée par l'installation dans ce cas est légèrement inférieure à celle du cas précédent.

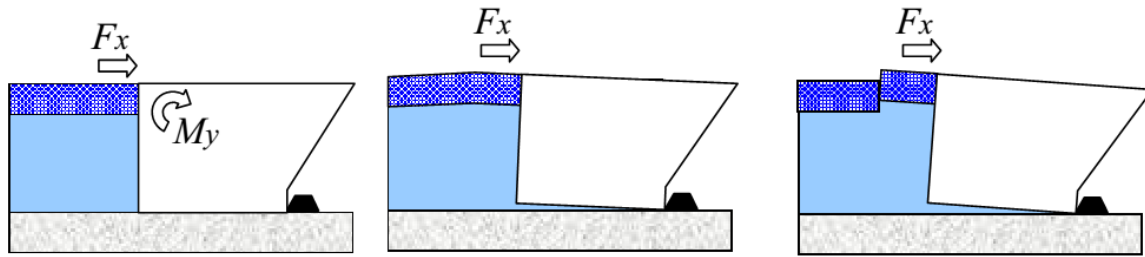
#### b) Dimensionnement mécanique

Le principe des hausses est dépassé brutalement pour une cote d'eau déterminée d'une situation de stabilité largement assurée à une situation d'instabilité. Lors du remplissage du puits et de la chambre, le système des forces auxquelles est soumise la hausse est modifié rapidement, par application d'une sous pression sous sa base (Falvey., 1995).

#### **I.2.3.11 Effet de la glace**

Des essais sur modèle réduit au sein des laboratoires du « National Research Council » de Saint John's (Canada) et du « Institute of Energy Structures » de Moscou (Russie) ont permis d'étudier le comportement des hausses fusibles dans les régions très froides où le réservoir est entièrement gelé en hiver et où le cours d'eau charrie au printemps d'importantes quantités de blocs de glace.

Du fait de l'expansion thermique, la prise en glace du réservoir peut induire des efforts significatifs sur le barrage et les dispositifs connexes. Ces efforts sont susceptibles d'amorcer un débit de rotation de hausses fusibles installées sur des ouvrages subissant de telles conditions climatiques, principalement lorsque le niveau d'eau dans le réservoir est au niveau de la crête des hausses fusibles. Les essais sur modèle réduit ont montré que, dans ce cas, une importante contrainte en flexion est générée sur la couche de glace en fonction de l'angle de rotation de la hausse fusible, jusqu'à provoquer la rupture de la couche de glace (voir figure I.34). La rotation de la hausse est insuffisante pour générer son basculement irréversible.



**Figure I.21** Effet de glace sur la hausse fusible (Hydroplus)

### I.2.3.12 Effet des séismes

Les hausses fusibles, étant simplement posées sur le seuil, ont un comportement aux séismes souvent meilleur que les vannes mécaniques.

L'influence des séismes sur la stabilité des hausses fusibles a été étudiée sur la base d'une approche pseudo statique. La stabilité de la hausse fusible est appréciée en comparant la résultante (MOVS) du moment des forces ayant un effet déstabilisant en prenant en compte les charges sismiques à la résultante du moment (MST) des forces ayant un effet stabilisant. ("Design of Small Dams" P 322 à 326 de la troisième édition).

## I.2.4 Les blocs fusibles

### I.2.4.1 Définition des blocs fusibles

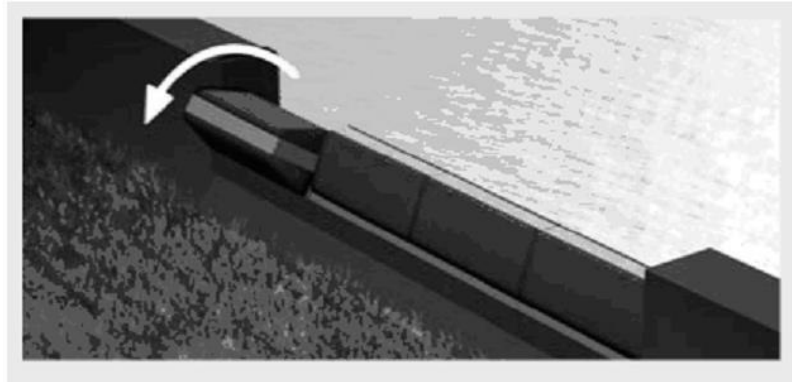
C'est un nouveau déversoir rectiligne qui fonctionne en mode auto-stable, des essais expérimentaux pour le développement hydraulique de ce déversoir étaient déjà entamés depuis 2003 au laboratoire des Aménagements Hydrauliques et Environnement (LAHE) de l'université de Biskra.

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 stable jusqu'à ce que le niveau d'eau à l'amont atteinte un certain niveau pour lequel ils basculent.

Les blocs placés sur le seuil d'un même déversoir ont la même hauteur. Leurs faces supérieures réunies forment le seuil surélevé. Pour des raisons économiques, il n'est pas souhaitable que tous les blocs basculent simultanément. Pour cela, ils sont de longueurs différentes (figure 4), donc de poids différents. Ils basculent, par conséquent, pour des hauteurs d'eau différentes (Lemprière et Vigny, 2007).

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 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 communiquant avec l'amont (sous-

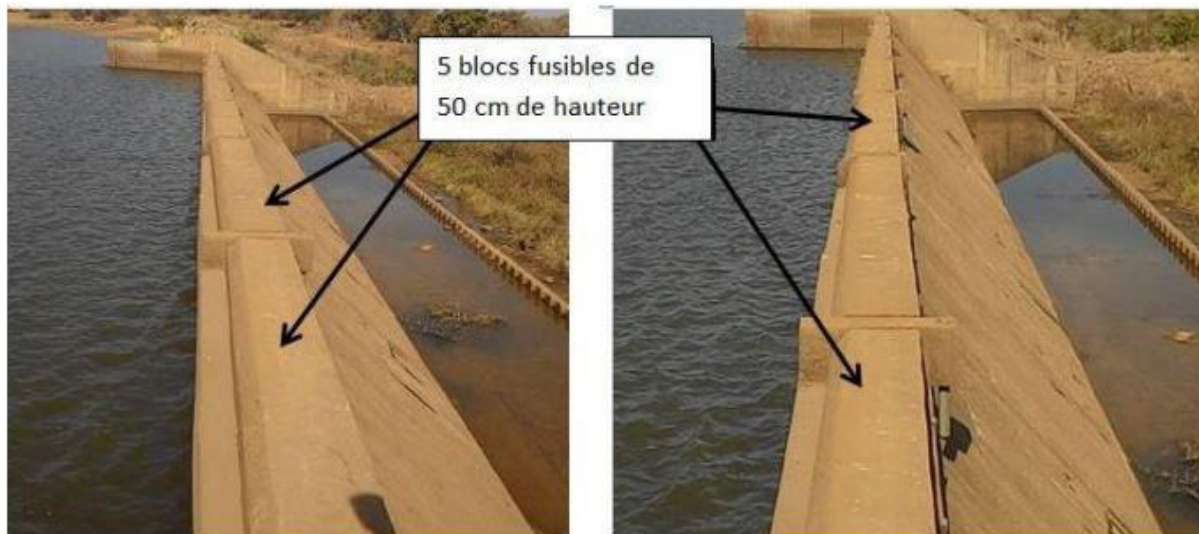
pression totale), ou soit fermé par un joint d'étanchéité à l'amont et communiquant avec l'aval (sous-pression inexistante) (Lempérière et al. 2006).



**Figure I.22** Vue en perspective d'un déversoir Blocs fusibles (Hydroplus)

Ces blocs sont particulièrement intéressants pour l'amélioration des seuils libres et semblent très bien adaptés aux nombreux petits barrages du Burkina Faso.

La figure 3 présente cette technique réalisée au Burkina Faso sur la retenue de Wedbila.

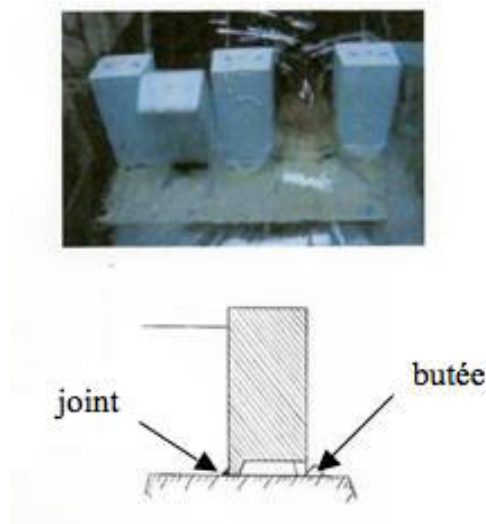


**Figure I.23** Blocs réalisés sur la retenue de Wedbila (Burkina Faso)

#### **I.2.4.2 Blocs fusibles sans sous-pression**

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  $L$ ).

Cette solution sans sous-pression permet d'avoir des blocs avec 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 (Lempérière et al. 2006).



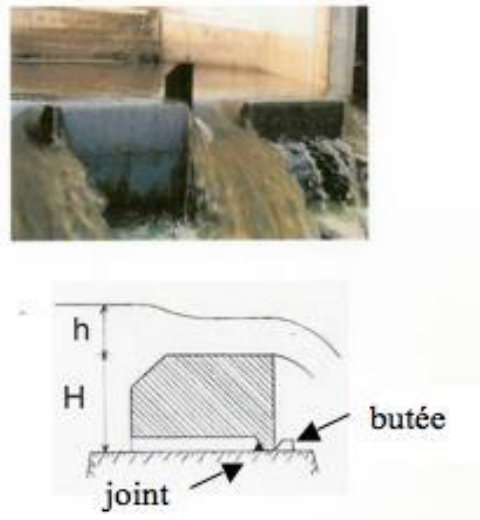
**Figure I.24** Blocs sans sous-pression et basculement avant déversement

### **I.2.4.3 Blocs fusibles avec sous-pression**

Ces blocs sont relativement plus longs et épais par rapport à leur hauteur, la face amont est raccordée avec la face supérieure par un chanfrein qui favorise l'écoulement, ce type de bloc se caractérise par la présence d'une chambre inférieure où se forme la sous pression.

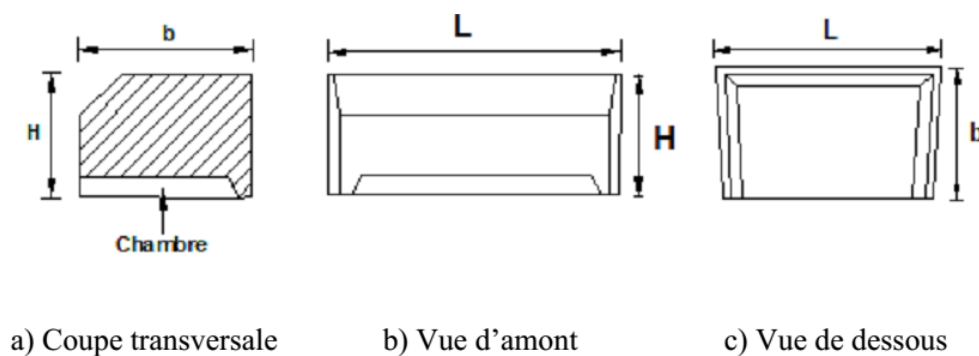
Les blocs peuvent être renversés après avoir été submergés par une couche d'eau de hauteur  $h$  qui peut atteindre deux fois la hauteur  $H$  du bloc.

La solution (sous-pression totale), bien que consommant plus de béton, paraît plus intéressante dans ce cas car elle donne une meilleure précision au niveau d'eau qui assure le basculement. 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 du bloc quand il bascule. Il convient simplement de veiller à une aération suffisante de la nappe, ce qui est facile à réaliser (Lempérière et al. 2006). Ces blocs sont particulièrement intéressants pour l'augmentation du débit par abaissement du seuil ou augmentation du stockage par relèvement du plan d'eau ou la combinaison des deux. Il semble très bien adapté aux nombreux petits barrages (cas des premières applications au Burkina Faso). Cette solution est donc celle qui sera développée ci-après.



**Figure I.25** Bloc avec sous-pression et déversement avant basculement

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.26** Géométrie d'un bloc fusible avec sous-pression

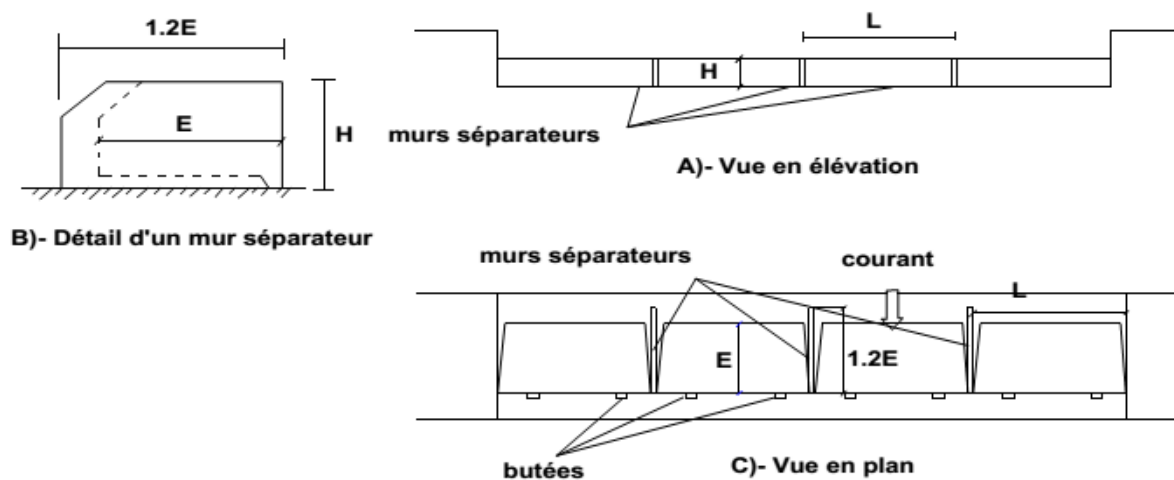
#### I.2.4.4 Emplacement des Blocs fusibles

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.

La présence de murs séparateurs de faible largeur entre deux blocs adjacents minimise les phénomènes d'affaissement du plan d'eau que peut provoquer le basculement de l'un d'entre eux et facilite le calcul de la hauteur de basculement. Des murs de même hauteur et de longueur faisant 1.2 fois celle des blocs suffisent à minimiser ces effets d'affaissement (Hydrocoop, 2005; Lempérière et Vigny, 2007). Pour éviter les phénomènes de friction entre deux blocs adjacents (ou entre un bloc et un mur séparateur) au moment du basculement de l'un d'entre eux, la largeur de la face aval est légèrement supérieure à celle de la face amont (Lempérière et Vigny, 2007) (Fig. I.27). Dans les essais faisant l'objet de ce travail, la largeur de la face aval avait toujours 0.02 m de plus que celle de la face amont.

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



**Figure I.27** Emplacement des Blocs fusibles





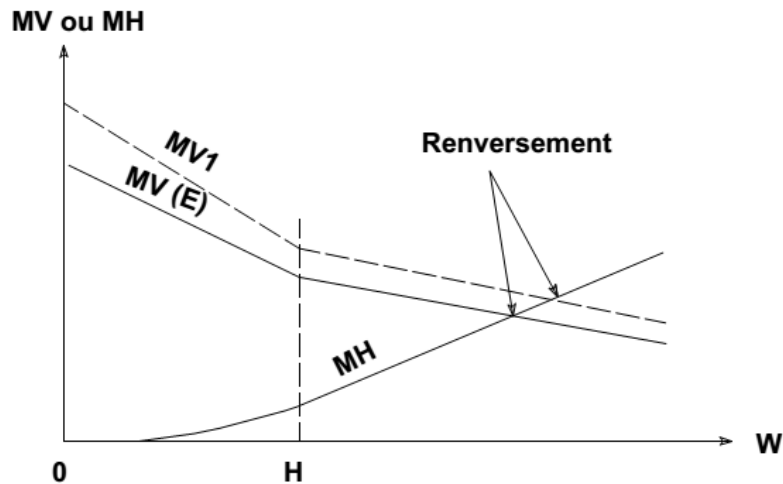
**Figure I.28** Blocs fusibles sur un seuil avec des murs séparateurs

#### I.2.4.5 Dimensionnement des blocs fusibles

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.40) 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.29** Diagramme de stabilité des blocs fusibles

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 :

$$h = E - 0,4 \quad (\text{I. 11})$$

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 ( $h = H$ ).

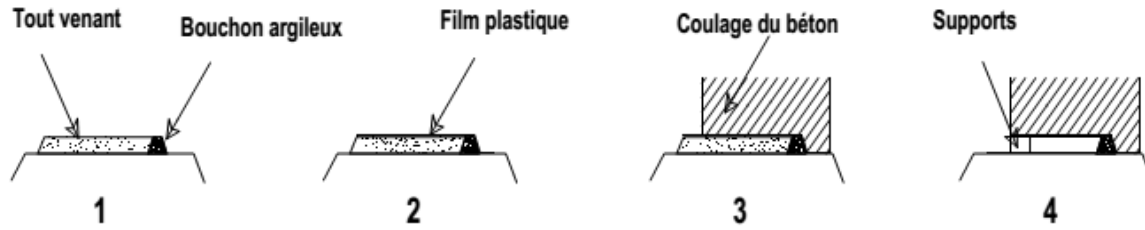
Dans la plupart des cas, il faut environ  $1 \text{ m}^3$  de bloc de béton pour augmenter le débit de  $1 \text{ m}^3/\text{sec}$ . L'utilisation de blocs fusibles à la place d'un seuil classique permet à la fois de réduire la quantité de béton à mettre en œuvre et d'accroître la capacité de l'évacuateur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



**Figure I.30** Bloc fusible placé sur un seuil après un arasement

#### I.2.4.6 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 le coulage du béton, recouverte d'une membrane plastique comme indiqué sur la figure (I.42). Si les extrémités latérales restent ouvertes, quelques supports sont nécessaires pour assurer la stabilité du bloc.



**Figure I.31** Différentes phases de construction du bloc sur un seuil

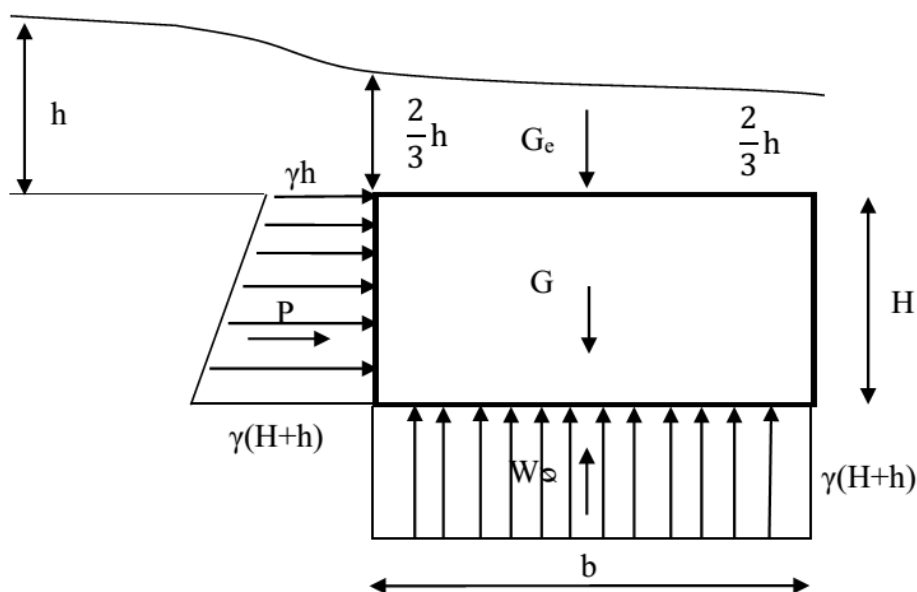
L'étanchéité des joints verticaux entre blocs ou entre blocs et murs séparateurs peut se faire de façon classique, par exemple à l'aide de feuilles de caoutchouc encastrées ou boulonnées dans le bloc.

#### I.2.4.7 Des essais 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.32** 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.

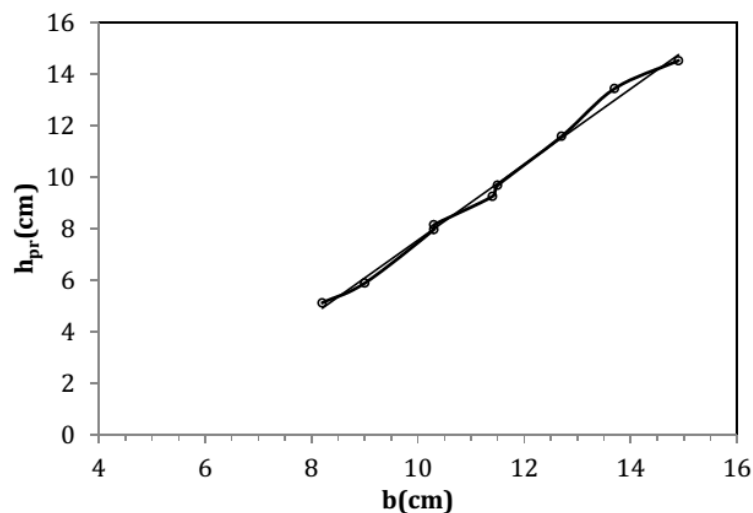
$$b = H \sqrt{\frac{(H + 3h)}{3 \frac{\gamma b}{\gamma} H - 3H - h}} \quad (1.12)$$

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.2.4.8 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.

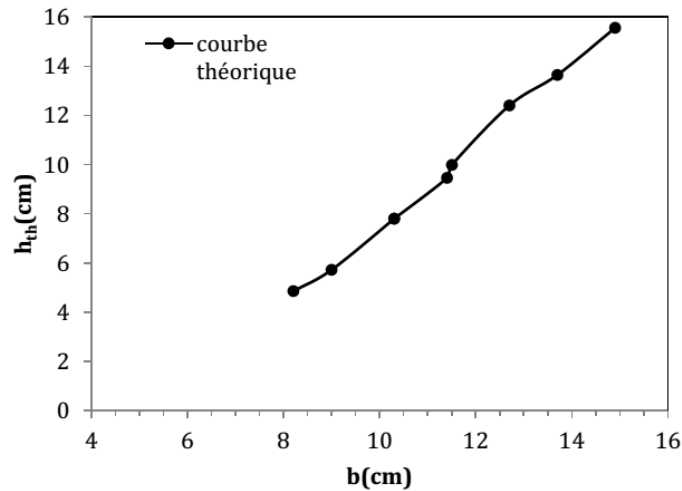
Le graphe suivant (fig.I.33) représente la variation de la largeur  $b$  en fonction de la lame d'eau écoulée qui provoque le basculement du bloc (théorique et expérimentale) (Sekkour. I), on remarque que la tendance de la courbe se rapproche d'une droite.



**Figure I.33** Courbe pratique de la variation de la charge de basculement en fonction de la largeur de bloc (Sekkour.I)

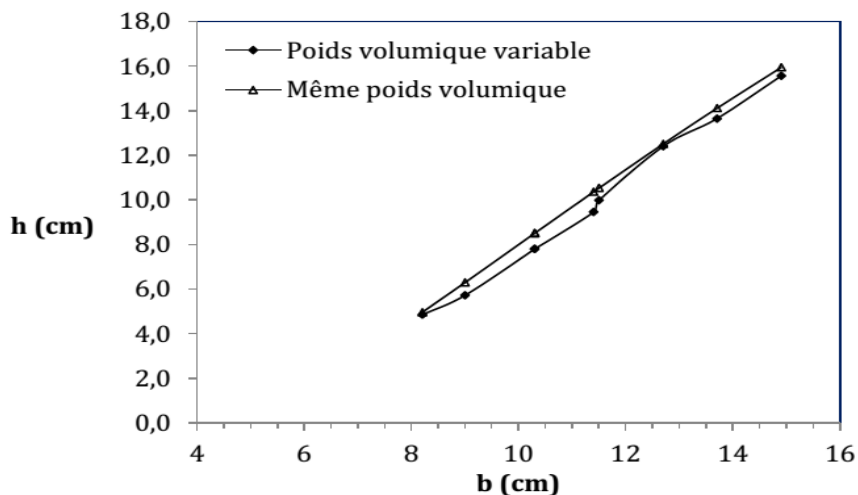
On remarque que la hauteur de basculement dépend de la largeur du bloc. Pour basculer un bloc par une faible hauteur d'eau, il suffit juste de réduire sa largeur, ceci montre que les blocs fusibles sont plus adaptés aux faibles crues que pour les fortes crues. La représentation graphique (fig.I.34) des 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.34** 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)

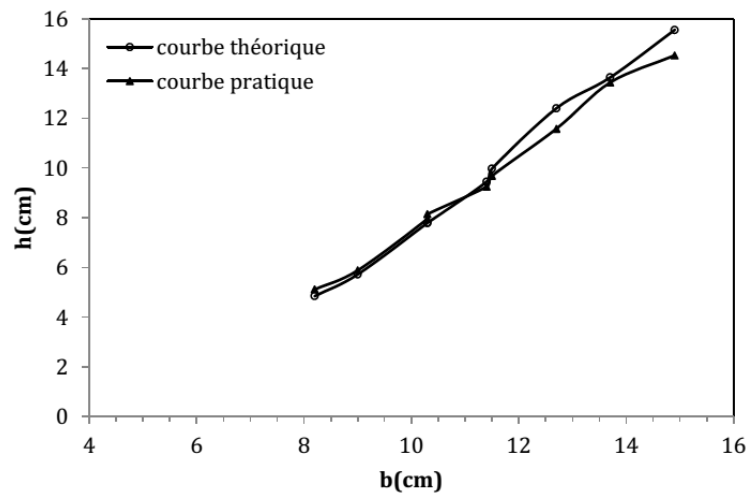


**Figure I.35** Variation de la hauteur de basculement en fonction de la variation du poids volumique (Sekkour.I)

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.36** 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)

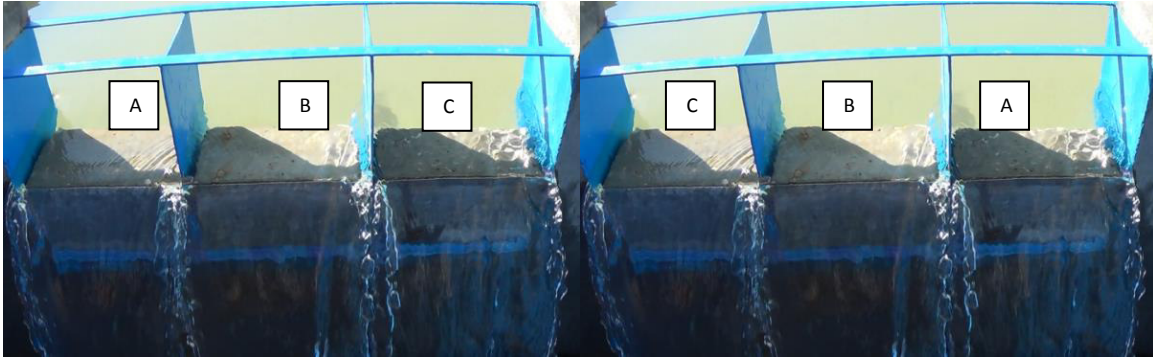
Les résultats des essais ont montré qu'effectivement quand le niveau d'eau dans le réservoir atteint le sommet du bloc, ce dernier bascule. Ce résultat confirme directement la bonne conformité de la relation (I.12) avec la pratique. (Sekkour.I)

#### I.2.4.9 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 expérimentées. 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).

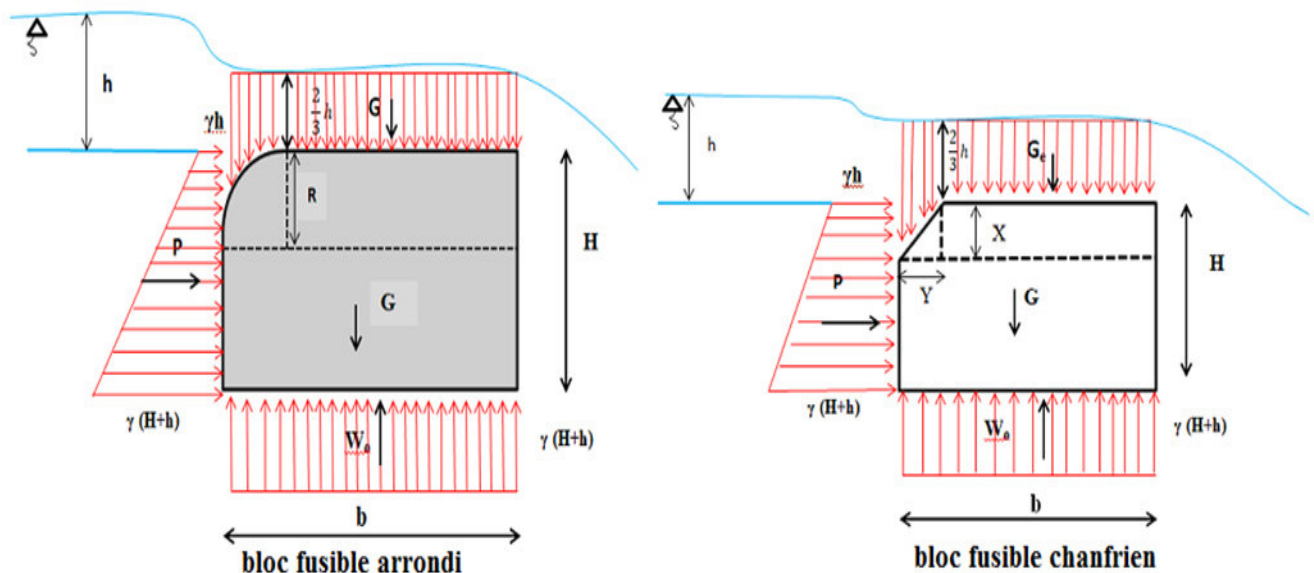


**Figure I.37** Schéma d'alignement d'une série de trois blocs sur le seuil

#### I.2.4.9 Effet de la forme d'arête amont (chanfreinée et arrondie)

Pour vérifier l'effet de la forme de l'arête amont du bloc fusible sur le débit évacué et la charge de basculement, une étude expérimentale a été effectuée sur deux configurations (chanfreinée et arrondie) des blocs qui ont été dimensionnés par deux relations développées

La vérification expérimentale des résultats obtenue par voie théorique pour les deux formes choisies a montré un bon accord entre les deux méthodes (théorique et expérimentale), ce qui confirme que le basculement des blocs fusibles est lié au poids volumétrique et à la largeur de chaque bloc.



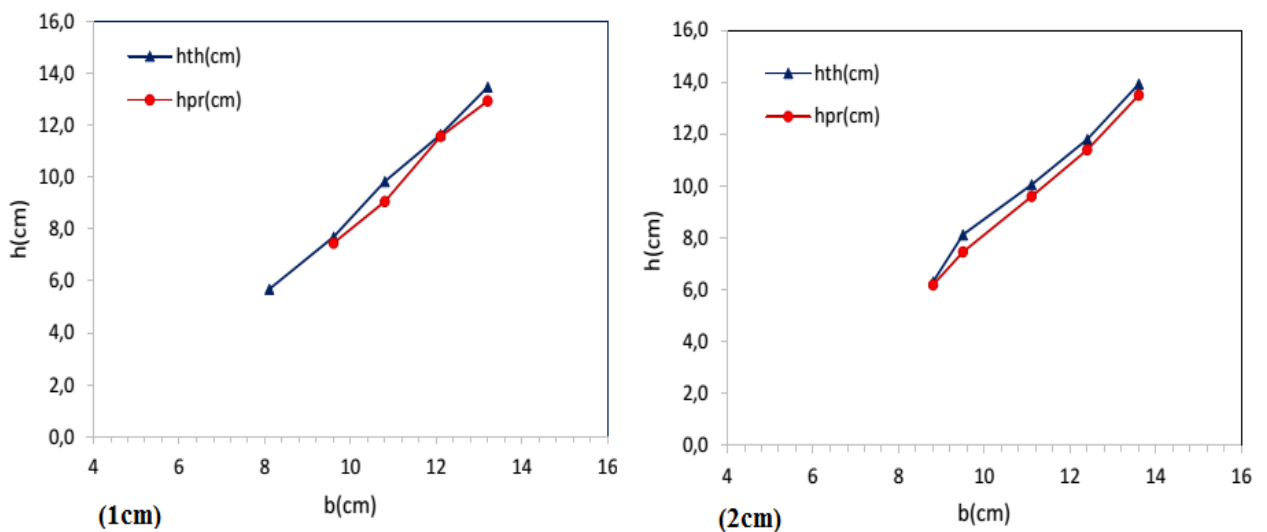
**Figure I.38** Schéma de calcul de stabilité de deux formes des blocs fusibles



**Figure I.39** Blocs fusibles à arête amont chanfreinée

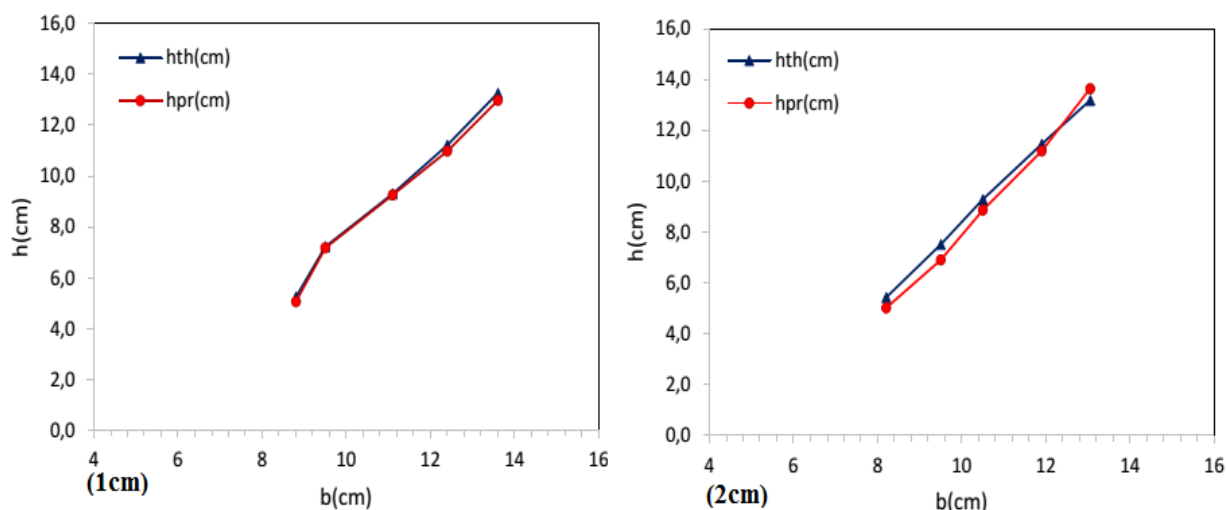


**Figure I.40** Blocs fusibles à arête amont arrondie



**Figure I.41** Comparaison entre la charge théorique et pratique de la forme chanfreinée





**Figure I.42** Comparaison entre la charge théorique et pratique de la forme arrondie

L'augmentation de la valeur du coefficient de débit caractérise les grandes charges qui dépassent la charge maximale de renversement, tandis que ce coefficient est presque identique pour la charge qui entre dans l'intervalle de basculement des blocs fusibles pour les deux formes des modèles testés et la forme rectangulaire qui a été étudié précédemment, cela montre que le coefficient de débit n'a pas un effet sur le renversement.

### I.2.5 Autres dispositifs fusibles

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

Des dispositifs fusibles très économiques ont été utilisés depuis longtemps dans des versions simplifiées telles que les « flashboards » aux Etats-Unis et les digues fusibles en Chine (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.2.5.1 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.



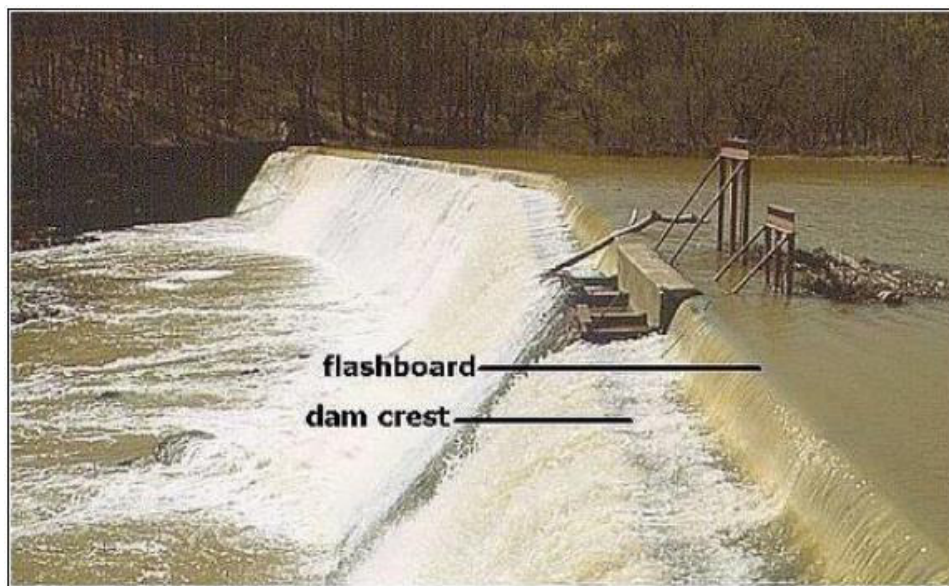
**Figure I.43** Hausses rabattables (Hydroplus)

### **I.2.5.2 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 délibéré 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.44** Déversoir Flashboard (Etats-Unis)

### I.2.5.3 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.

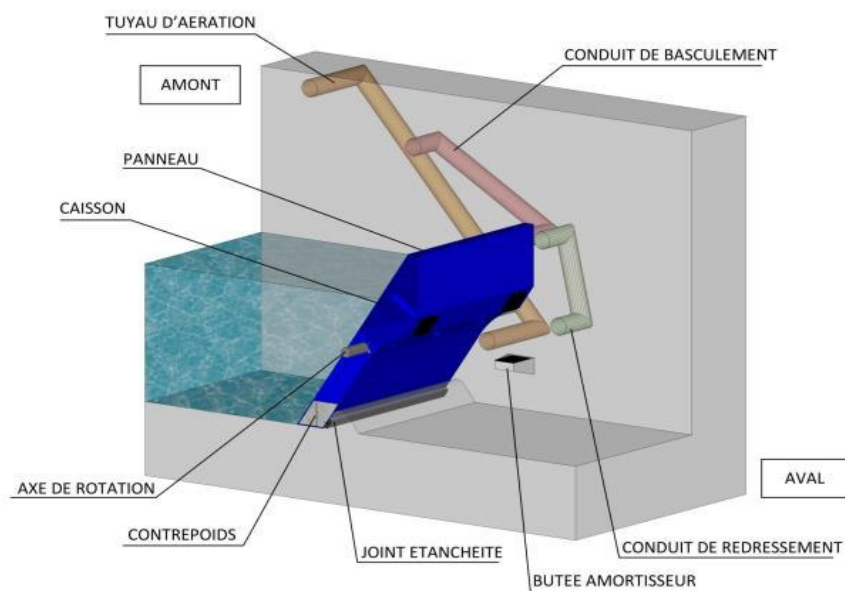
Au fil des années, une certaine cohésion peut apparaître progressivement dans les matériaux constitutifs de la digue (sans parler de la végétation qui peut pousser sur sa surface) de sorte que la charge d'eau nécessaire pour entraîner la rupture de la digue tend à augmenter, la digue devenant de moins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



**Figure I.45** Déversoir digue fusible (France)

#### I.2.5.4 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.46** 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.2.5.5 Les boudins gonflables**

Il s'agit de boudins gonflables à l'air, constitués d'une enveloppe souple, en caoutchouc armé, d'environ 10 mm d'épaisseur. Les boudins gonflés à l'eau, capables de supporter des charges importantes ne se justifient pas pour les déversoirs de digues, justement du fait de la charge limitée (1,0 à 1,5 m). L'enveloppe est fixée à la structure au moyen d'un plat métallique boulonné sur une ligne d'ancrages dans une poutre en béton armé encastrée dans le seuil déversant. 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.47** Barrage anti-sel de 1969 avec son boudin gonflable

### I.2.5.6 Les Murs en « L »

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

Le mécanisme de cette solution est le suivant :

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

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



**Figure I.48** Barrage Milner avec les murs en L –USA

## I.3 Conclusion

Cette étude bibliographique a été réalisée dans le but de présenter les principaux travaux destinés à l'étude de la performance des déversoirs auto-stables notamment les hausses, les blocs et d'autres dispositifs fusibles.

La bibliographie a permis de mieux comprendre le système auto-stable en citant la définition, la géométrie, le principe de fonctionnement ainsi que le but d'utilisation de ce système.

Les blocs fusibles représente l'un des dispositifs auto-stables considérés comme un ouvrage supplémentaire installé sur le déversoir d'origine soit nouveau ou existant de type rectiligne, pour la surélévation du niveau d'eau stocké ou d'améliorer l'évacuation du déversoir.

La combinaison entre l'étude théorique et expérimentale a été la base des recherches effectués pour le dimensionnement des déversoirs auto stables, où les essais sur des modèles réduits avec des dimensions géométriques qui ont été calculés suivant une méthode théorique qui permet le pré-dimensionnement des blocs fusibles sur la base de la stabilité limite des éléments sur le seuil du déversoir.

Il existe deux types de blocs : le premier avec sous pression, le déversement s'amorce avant le basculement, le deuxième sans sous pression et sans déversement avant le basculement.

De ce fait, la présente étude va donc aborder au dimensionnement des blocs fusibles sans sous pression mais avec déversement avant le basculement par le biais d'une étude théorique, vérifié par la voie expérimentale.

## CHAPITRE II

### Etude théorique pour le dimensionnement des blocs fusibles

#### (Blocs fusibles sans sous-pression)

##### II.1 Introduction

Le système des blocs fusibles est un nouveau type des déversoirs auto-stables qui a été conçu ces dernières années, de ce fait il est encore en cours d'étude jusqu'à présent.

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

Pour atteindre ce but, on a choisi pour cette étude, la forme du bloc sans sous-pression à l'inférieur (sous-pression inexistante) qui permet le basculement avant le déversement.

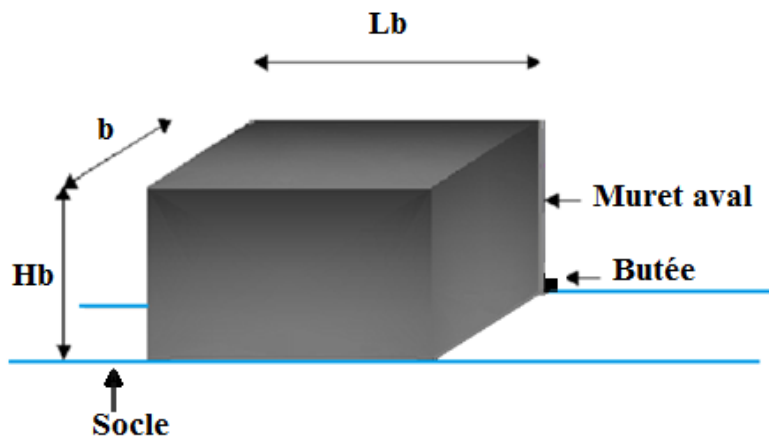
Le dimensionnement des blocs fusibles se fait par la relation théorique qui a été développée au Laboratoire Hydraulique et Environnement de l'université de Biskra, sur la base de la stabilité limite du bloc au-dessus du seuil.

##### II.2 Description des blocs fusibles

Le principe des blocs fusibles est de mettre en place des éléments massifs en béton 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 simplement posés et restent auto-stables jusqu'à ce que l'eau de la retenue atteigne un certain niveau et ils basculent lorsque ce niveau est dépassé.

Ces blocs se caractérisent par une forme géométrique simple, ils sont fabriqués en béton ordinaire coulé sur place ou préfabriqué, ils possèdent la même hauteur mais peuvent avoir des largeurs différentes et des formes différentes (arête amont chanfreinée ou arrondie), donc des poids différents. Ces éléments sont posés au long de la crête du déversoir existant après un faible arasement du seuil, sous forme d'un rideau qui assure l'obturation de l'écoulement, L'étanchéité entre les blocs fusibles adjacents est assurée par des joints en plastique, de même entre les blocs et le seuil. A l'aval immédiat des blocs, des butées sont réalisées pour empêcher leur glissement.





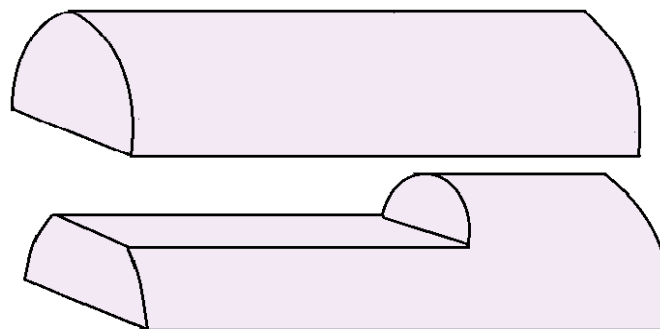
**Figure II.1** Schéma descriptif d'un bloc fusible

### II.3 Objectif de conception des blocs fusibles

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

Dans le cas d'un déversoir existant, le but des blocs fusibles 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.

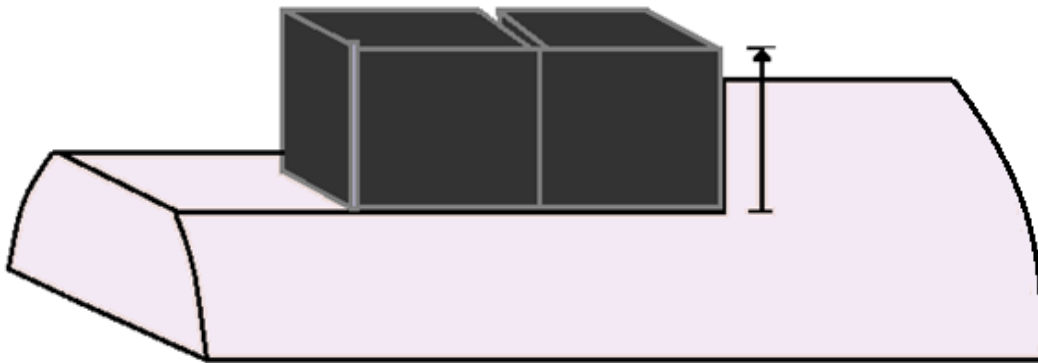


**Figure II.2** Arasement du seuil pour l'emplacement des blocs fusible

### 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 blocs fusibles sur le seuil du déversoir existant sans pour autant affecté la sécurité du barrage. Les blocs fusibles 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.

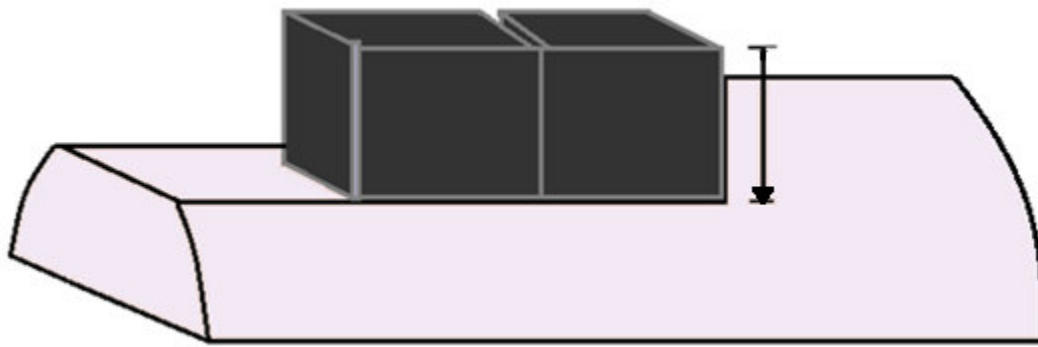


**Figure II.3** Blocs fusibles pour augmenter la capacité des barrages

### 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 blocs fusibles, ces derniers 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 mise en place de ces blocs sur le seuil après l'arasement, permet de conserver le volume d'eau dans le bassin, tandis que le passage des crues est assuré.



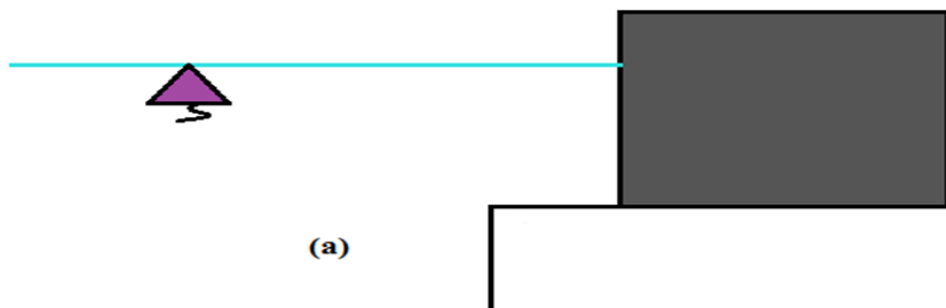
**Figure II.4** Blocs fusibles pour améliorer la sécurité des évacuateurs de crues

#### II.4 Principe de fonctionnement des blocs fusibles

Les blocs fusibles obturent le seuil sur une certaine hauteur par des blocs qui sont auto-stables jusqu'à une certaine cote du plan d'eau amont.

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

a) Au moment où le niveau de l'eau est inférieur ou égal le niveau d'arase des blocs, ces derniers se comportent comme un barrage. Chaque bloc est largement auto stable et résiste à la poussée hydrostatique grâce à son poids propre.



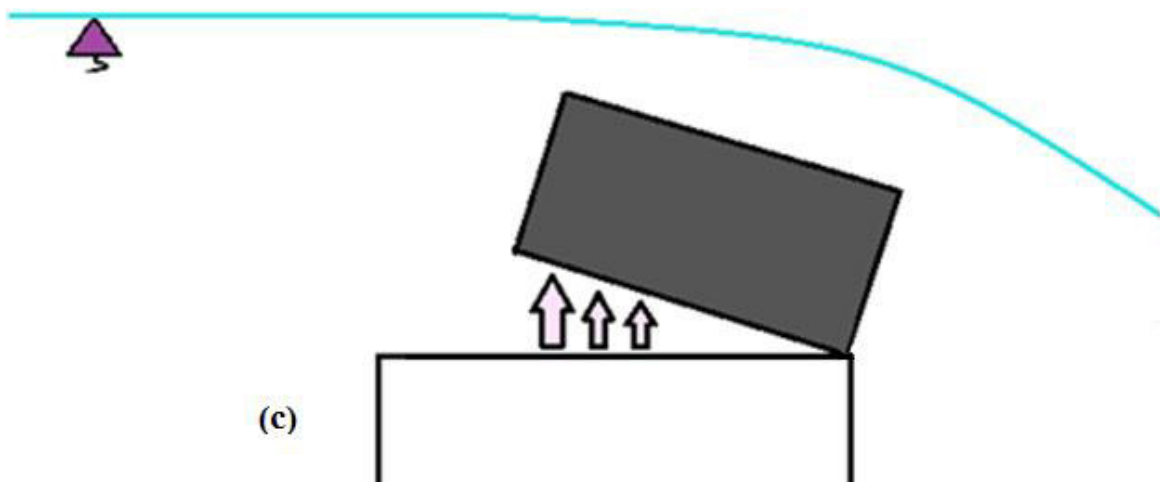
**Figure II.5.a** Bloc fusible fonctionne comme un barrage

b) Au moment où le niveau de l'eau s'élève au-dessus de la cote d'arase des blocs, ces derniers se comportent comme un déversoir à large seuil, jusqu'à une certaine épaisseur de la lame d'eau écoulée. Au cours de cette phase de fonctionnement chaque élément reste largement auto stable comme dans la phase précédente.



**Figure II.5.b** Bloc fusible fonctionne comme un déversoir

c) Au moment où le débit est très grand, le niveau de l'eau augmente au-dessus du bloc, la sous-pression ainsi introduite sous l'élément modifie radicalement ses conditions de stabilité et provoque brutalement son basculement.



**Figure II.5.c** Bloc fusible fonctionne comme un fusible

### II.5 Pré-dimensionnement des blocs fusibles

Le dimensionnement des blocs fusibles signifie la méthode de calcul de ses dimensions d'une façon qui assure son bon fonctionnement. La hauteur des blocs est censée d'être la même au long du déversoir, elle est déterminée en fonction de la lame déversante et la surélévation choisie. La longueur des blocs dépend de l'importance du bloc, de l'aspect constructif, des facilités de construction et des conditions locales du site.

La largeur du bloc varie d'un bloc à l'autre dans le cas où chaque bloc est dimensionné pour basculer pour une charge d'eau donnée. Ainsi on peut dire que la largeur du bloc est étroitement liée à la charge d'eau sur le bloc.

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

### **II.5.1 Dimensionnement hydraulique**

Le dérèglement des précipitations causé par le changement climatique provoque un effet direct sur la stabilité des barrages et des retenues, des grandes quantités de matières solides portées par l'eau de pluie, en raison de l'intensité d'érosion, conduire à une diminution de la quantité de stockage plus rapide que considérée comme moyenne.

Pour solliciter ce problème, une révision hydrologique a été faite afin d'améliorer la stabilité des barrages par l'utilisation des blocs fusibles au-dessus du déversoir.

Les résultats obtenus en fonction de la révision hydrologique sont divisés en deux cas :

- Dans le cas où les résultats de révision ne portent pas un changement dans le débit de crue du projet, la mise en place des blocs fusibles sur le seuil, nous a permis de récupérer une importante tranche de retenue comprise entre le niveau normal et les plus hautes eaux, qui augmente la capacité de stockage, ou à compenser la partie perdue, en raison de l'accumulation de sédiments dans le bassin du barrage.

Et puisqu'il n'y a pas de changement dans la crue de projet, donc il n'y a pas de changement dans les conditions de la sécurité de l'ouvrage.

- Dans le cas où la révision hydrologique atteint à modifier la crue du projet, la protection de l'ouvrage nous oblige à augmenter la capacité de décharge, en parallèle de conserver la capacité de stockage, de sorte que la réduction du seuil pour permettre le passage de crue de projet est nécessaire, avec une compensation de la partie abaissée du seuil, par des blocs fusibles.

### **II.5.2 Dimensionnement mécanique**

Le principe du bloc fusible est de passer brutalement, pour une cote d'eau déterminée, d'une situation de stabilité largement assurée par son poids propre à une situation de nette instabilité. L'augmentation de la hauteur d'eau à l'amont a modifié rapidement le système des forces auxquelles est soumise le bloc, par application d'une sous pression sous sa base.

### **II.5.3 Hauteur des blocs fusibles**

La hauteur des blocs fusibles dépend de la hauteur de surélévation désirée et de l'importance de débit à évacuer après le basculement de l'ensemble des blocs.

Un arasement du seuil existant étant nécessaire pour permettre la mise en place des blocs, ceci conduit à un changement du coefficient de débit. Pour assurer le passage de la crue maximale sans contrainte, il est donc fondamental de déterminer le coefficient de débit du seuil arasé, pour prévoir la section nécessaire pour le passage de la crue de projet et par conséquent la hauteur de la tranche à araser. Des essais sur modèle d'un déversoir à seuil horizontal ont été réalisés et le résultat a montré que le coefficient de débit décroît à une valeur de 0,4. A cet effet, la section nécessaire pour le passage de la crue doit être augmentée.

#### II.5.4 Largeur des blocs

La largeur des blocs doit être adapter à la largeur de la base d'appui et dépend essentiellement de la charge d'eau choisie pour laquelle le bloc bascule et du type de contact avec la base d'appui.

Pour déterminer la largeur des blocs, il a été nécessaire de faire recours à la méthode de la stabilité limite que nous avons aboutie et qui se base sur le principe de la stabilité générale d'un objet soumis à la force de pression hydrostatique, à la force des sous-pressions, au poids de l'eau sur l'objet et son poids propre.

#### II.5.5 Développement théorique pour le dimensionnement d'un bloc fusible sans sous pression

Le principe de base de l'étude théorique repose sur le calcul de la stabilité d'un bloc auto-stable afin de déterminer la largeur du bloc pour le quel ce 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.

On néglige pour cette étude la pression exercée par l'eau sur la base du bloc (Sous-pression,  $W_{\infty}$ ).

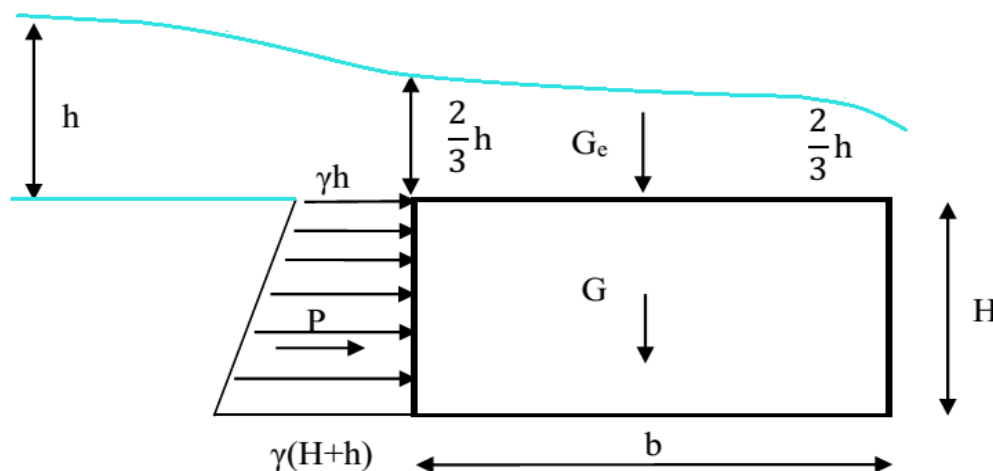


Figure II.6 Schéma de calcul de stabilité du bloc fusible

$h$  : Hauteur d'eau à l'amont par rapport au seuil du bloc.

$H$  : Hauteur du bloc.

$b$  : Largeur du bloc.

$\gamma$  : Poids volumique de l'eau.

$\gamma_b$  : Poids volumique du béton.

$Ge$  : Poids de l'eau sur le bloc.

$G$  : Poids du bloc.

$P$  : Pression hydrostatique exercée par l'eau sur le bloc.

- Forces appliquées au bloc fusible :

Le bloc fusible est soumis à l'action du poids de l'eau sur son sommet ( $Ge$ ), de son poids propre ( $G$ ), de la pression hydrostatique ( $P$ ) appliquée sur sa face amont. Il en résulte de chacune de ces forces un moment qui favorise ou empêche le renversement du bloc.

L'écoulement sur le bloc est considéré comme celui sur un seuil épais par conséquent, la hauteur d'eau sur toute la longueur du bloc est égale à  $\frac{2}{3}h$ .

$$Ge = \frac{2}{3\gamma hb} \quad X_{Ge} = \frac{b}{2} \quad M_{Ge} = \frac{\gamma hb^2}{3} \quad (II.1)$$

$$Ge = \gamma_b Hb \quad X_G = \frac{b}{2} \quad M_G = \frac{\gamma_b Hb^2}{2} \quad (II.2)$$

$$P = \frac{\gamma(H + 2h)H}{2} \quad y_P = \frac{H(H + 3h)}{3(H + 2h)} \quad M_P = \frac{\gamma(H + 3h)}{6} H^2 \quad (II.3)$$

Le moment de renversement est exprimé par la relation suivante :

$$K_r = \frac{M_{Ge} + M_G}{M_P} \quad (II.4)$$

En substituant les relations des moments des forces (1), (2), et (3) dans la relation (4) et en considérant le cas de la stabilité limite, on déduit la relation qui exprime la largeur  $b$  du bloc en fonction de sa hauteur, de la hauteur d'eau sur le bloc et des poids volumiques du matériau et de l'eau.

$$b = H \sqrt{\frac{H + 3h}{3 \frac{\gamma_b}{\gamma} H + 2h}} \quad (II.5)$$

Cette dernière relation permet de donner les premières dimensions du bloc fusible pour une hauteur d'eau de renversement donnée et pour une hauteur du bloc fixée préalablement.

### II.5.5.1 Stabilité au glissement

La stabilité au glissement est assurée par des butées dans le bord aval du déversoir qui sont ancrées dans le seuil comme indiqué sur la figure (II.6). L'ampleur de la force exercée sur la butée peut être estimée en calculant la force hydrostatique amont appliquée sur le bloc. Comme approximation, la force qui provoque le glissement est donnée par :

$$p = \frac{1}{2} \gamma \cdot H \cdot (H + 2 \cdot h) \quad (II.6)$$

### II.6 Conclusion

En guise de l'étude théorique, qui a été effectuée sur des blocs fusibles sans sous pression a eu pour objectif d'aboutir une relation mathématique simple, qui permet de calculer la largeur du bloc qui bascule pour une charge d'eau fixée précédemment.

Le frottement entre les blocs a été négligé pour simplifier les calculs, ainsi, les blocs doivent être disposés de manière qu'il ne se touche pas.

D'après cette base, le développement théorique a permis d'arriver à une relation mathématique qui permet le calcul de la largeur du bloc en fonction de la charge sur ce dernier, de sa hauteur et de son poids volumique.



## CHAPITRE III

### Etude expérimentale sur modèles réduits des blocs fusibles

#### (Blocs fusibles sans sous-pression)

#### 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 blocs 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 blocs fusibles. Pour atteindre notre objectif, qui concerne l'étude de l'effet de ces formes sur l'écoulement et le comportement des blocs fusibles installés sur le déversoir.

#### 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.

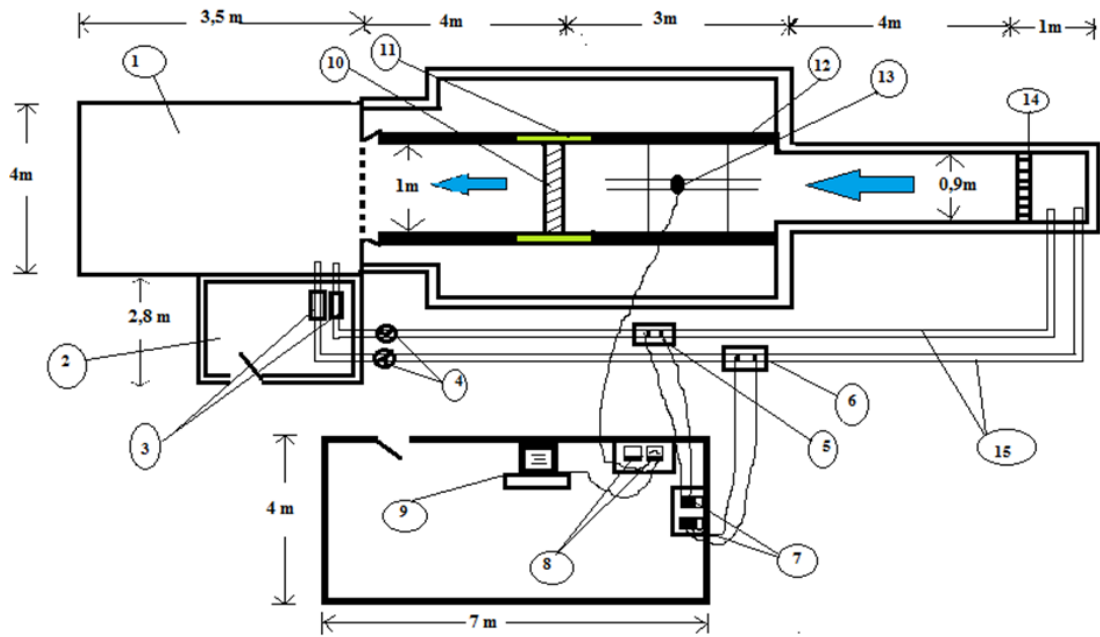


**Figure III.1** Vue d'ensemble de la station d'expérimentation.

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** Vue aval du canal des essais de la station d'expérimentation.



**Figure III.3** Schéma de la station d'expérimentation

- |                                 |  |
|---------------------------------|--|
| 1- Bâche à eau                  | 8- enregistreur de niveau                    |
| 2- Station de pompage           | 9- PC  |
| 3- Pompes                       | 10- modèle réduit                            |
| 4- Vannes de réglage de débit   | 11- vitre en plexiglass                      |
| 5- Débitmètre a ultrason        | 12- canal de simulation                      |
| 6- Débitmètre électromagnétique | 13 - détecteur du niveau                     |
| 7- Enregistreur des débits      | 14- Système de stabilisation de l'écoulement |
|                                 | 15- conduite de refoulement                  |

### 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.



**Figure III.4** Schéma du principe de mesure du débit par débitmètre à ultrason

Le débitmètre à ultrason est constitué de deux parties distinctes :

- Deux sondes identiques (transducteurs), fixées par une chaînette sur la conduite d'alimentation du système chacune des sondes joue 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.



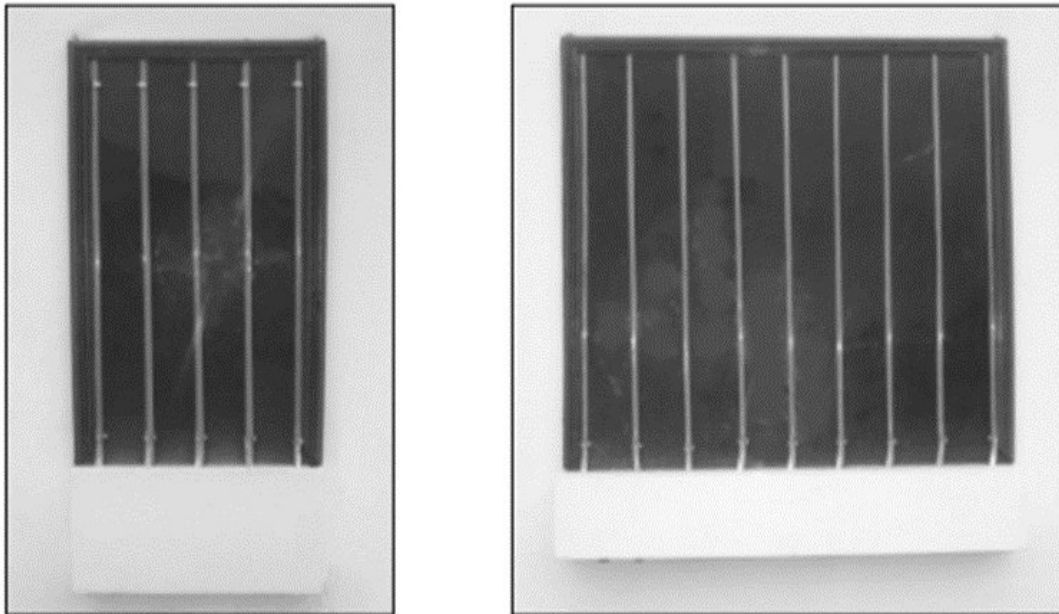
**Figure III.5** Débitmètre à ultrason Flowmeter 93W2

### 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.6** Tableaux des manométriques de mesure des niveaux d'eau.

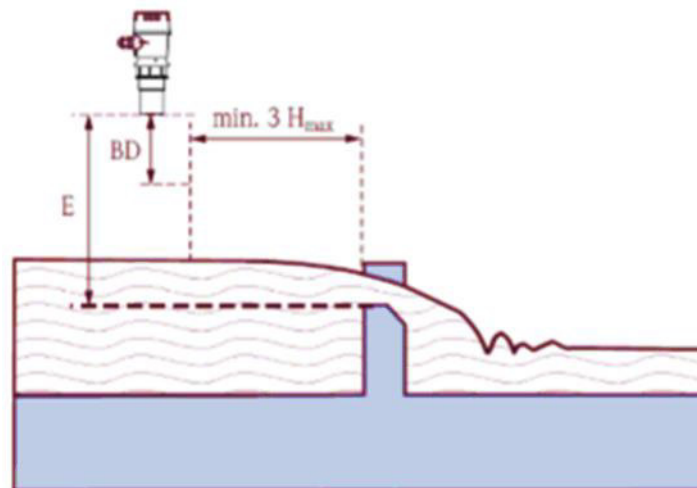
#### b) Les capteurs des niveaux :

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.7** Capteur de niveau PROSONIC T**Figure III.8** Schéma d'installation du Capteur de niveau dans un canal à écoulement libre

Conditions de montage pour la mesure de débit :

- Montez l'appareil du côté de l'arrivée d'eau le plus près possible au-dessus du niveau d'eau maximum  $H_{max}$  (tenir compte de la distance de blocage BD).
- Positionnez l'appareil dans l'axe du canal et du déversoir.
- La membrane du capteur doit être parallèle à la surface de l'eau.
- Respectez la distance de montage du canal ou du déversoir concerné.



**Figure III.9** Détecteur de niveau à ultrason au niveau du canal.

### **III.3 Dispositif expérimental**

L'objectif principal de ce travail est de déterminer la charge de basculement des blocs fusibles de largeurs différentes.

Le dispositif a été établi pour réaliser des essais sur des blocs sans sous-pression et qu'ils basculent après le déversement, et ensuite la comparaison avec le premier type de blocs (avec sous-pression) qui ont été déjà étudié par des travaux précédents au niveau de notre laboratoire de recherche (LAHE) dans la station d'expérimentation (Sekkour.I).

#### **III.3.1 Modèles réduits des blocs fusibles**

Pour commencer l'étude expérimentale, une série de bloc en béton a été réalisé, ces blocs ont été dimensionnés à partir d'une relation développée théoriquement.

Pour éviter le frottement entre les blocs, un socle de cinq ouvertures munies de murs séparateurs a été installé sur le seuil du déversoir avec des butées en aval.

La hauteur des blocs a été choisi égale à 10 cm pour tous les modèles, tandis que la longueur des blocs a été choisi égale à deux fois la hauteur, soit  $L = 20$  cm. Une plaque métallique est collée sur la face aval du bloc, faisant ainsi, un prolongement de 0,5cm sur les deux extrémités du bloc en béton, son but est de réduire le contact entre deux blocs ou le bloc et les murs de séparation.

Cependant, la largeur des blocs varie d'un bloc à un autre en fonction de la hauteur de basculement prévue.

Les blocs ont été fabriqués par du béton coulé dans des moules en bois. Une chambre vide a été créée sous chaque bloc étanche à l'amont et ouvert à l'aval pour s'assurer que la sous-pression soit inexistante.

Le béton a été réalisé avec un dosage équivalent à  $2,4\text{t/m}^3$  en utilisant un béton composé de  $1,2\text{kg}$  de gravier,  $0,650\text{kg}$  de sable,  $0,350\text{kg}$  de ciment et un volume d'eau de  $0,2\text{ Kg}$ .

Les caractéristiques géométriques et le poids volumique des différents blocs sont mentionnés dans le tableau suivant.

**Tableau III.1** Caractéristiques initiales des modèles réduits des blocs :

Caractéristiques	$\gamma_b(\text{t/m}^3)$	$H_b(\text{cm})$	$L_b(\text{cm})$	$h_{th}(\text{cm})$	$b(\text{cm})$
N° Bloc					
(1)	2,4	10	20	5	5,5
(2)	2,4	10	20	7	6
(3)	2,4	10	20	10	6,6
(4)	2,4	10	20	12	6,9
(5)	2,4	10	20	15	7,3



**Figure III.10** Blocs fusibles testés

Après la fabrication des blocs, il a été remarqué une légère différence avec les caractéristiques proposées initialement. Le tableau (III.2) récapitule les caractéristiques réelles des blocs.



**Tableau III.2** Caractéristiques réelles des modèles réduits après leur fabrication.

Caractéristiques	$\gamma_b(t/m^3)$	$H_b(cm)$	$L_b(cm)$	$b(cm)$	$h_{th}(cm)$
N° Bloc					
(1)	2,55	10	20	5,5	5,5
(2)	2,55	10	20	6	7,7
(3)	2,51	10	20	6,6	10,7
(4)	2,52	10	20	6,9	12,7
(5)	2,51	10	20	7,3	15,6

### III.3.2 Mur de séparation

Pour éviter le frottement entre les blocs en cas de basculement de l'un d'eux, un support métallique a été fabriqué. Ce dernier se compose de cinq ouvertures de même longueur.

La longueur de chaque ouverture ou pertuis est légèrement supérieure à la longueur du bloc pour éviter le frottement entre les murs séparateur et les blocs.

**Figure III.12** Support métallique

### III.3.3 Socle de basculement des blocs

Dans la partie contractée du bassin de simulation, un mur en béton a été construit pour permettre la pose des blocs, il joue le rôle d'un seuil déversant. La longueur du socle est de 0.95m, sa hauteur 0.30m, et sa largeur 0.15m. La largeur du socle a été choisie pour permettre des essais sur des blocs allant jusqu'à 0,15 m de largeur.

Une plaque métallique a été installée sur le seuil en béton. Sa partie aval a été pliée sur une hauteur de 5mm, formant ainsi une butée le long du déversoir pour empêcher le glissement des blocs.



**Figure III.11** Socle de basculement des blocs

### **III.4 Déroulement des essais**

#### **III.4.1 Préparation du modèle**

Pour réaliser les essais avec une précision satisfaisante, le bloc en béton doit être posé sur le seuil tout en assurant son horizontalité par l'insertion d'un petit cube en béton au-dessous du bloc comme support à son extrémité aval. Ceci permet la création d'une chambre sous le bloc pour supprimer la sous-pression totalement. L'étanchéité entre le bloc et les parois latérales, ainsi que celle entre le bloc d'essai et le seuil est assurée par des joints en plastique (fig.III.15).

#### **III.4.2 Démarrage des essais**

Le démarrage des essais par l'amorçage de la pompe permet la mesure du débit et de la hauteur d'eau.

Après l'amorçage de la pompe en laissant l'eau s'écouler dans le canal, le niveau d'eau s'élève graduellement jusqu'à ce qu'il arrive le seuil du socle, et continue à augmenter jusqu'à ce qu'il atteigne la face supérieure des blocs, qui sont dans une position stable, formant ainsi une barrière étanche. L'eau continue à monter jusqu'au déversement par-dessus des modèles, lorsqu'il atteint une charge d'eau donnée le bloc de la largeur la plus faible bascule, en prend

instantanément la hauteur d'eau par le capteur et la lecture du niveau d'eau dans les piézomètres. Par contre, les autres blocs restent stables sur le déversoir, après le départ du premier bloc. En conséquent, le niveau d'eau diminue rapidement dans le canal. Pour augmenter à nouveau la charge d'eau sur les autres blocs qui restent, on augmente le débit qui transite par le déversoir jusqu'à un niveau qui provoque le renversement du deuxième bloc. En passant au troisième bloc, le débit de deux pompes n'atteint pas à sa charge de basculement, ce qui nous oblige à réinstaller les deux premiers blocs pour compléter le reste des essais avec les blocs restants jusqu'à le dernier.

Les essais ont arrêté au quatrième bloc à cause de l'insuffisance du temps.



**Figure III.12** Vue aval des blocs posés sur les pertuis

### III.5 Résultats et discussion

#### III.5.1 Description d'écoulement

D'après l'étude précédente sur les blocs fusibles avec sous-pression, L'écoulement sur ce type de déversoir auto-stable est similaire à celui d'un seuil épais.

Le débit évacué par le déversoir en blocs fusibles peut être déterminé par la relation suivante :

$$Q = C_d L \sqrt{2gh^3} \quad (\text{III.1})$$

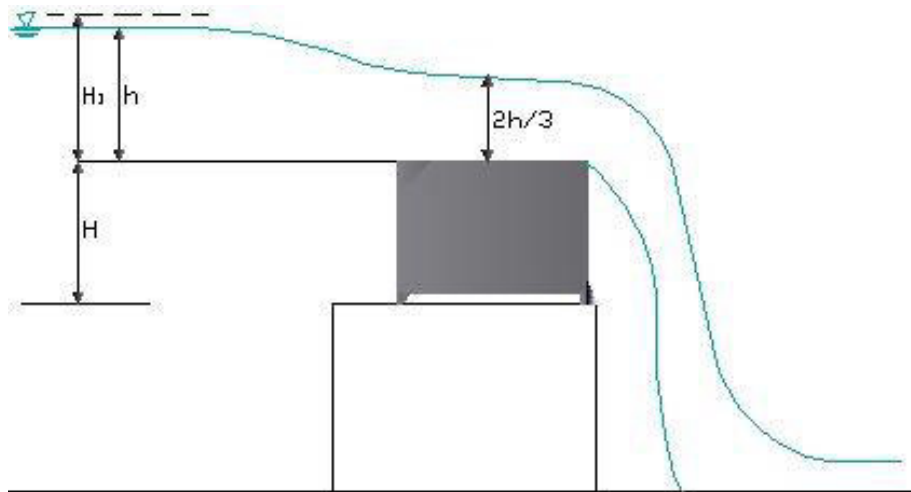
Avec :

$C_d$  : coefficient de débit

$h$  : la lame d'eau écoulee sur le bloc

$L$  : longueur du seuil

$g$  : accélération de la gravité



**Figure III.13** Déversoir à seuil épais en écoulement dénoyé

Les expériences de Basin ont donné pour le coefficient de débit  $C_d$  d'un déversoir à seuil épais des valeurs comprises entre 0,37 et 0,39 alors l'équation (III.1) sera :

$$Q = 0,385.L.\sqrt{2g}.h^{\frac{3}{2}} \quad (\text{III.2})$$

A partir des dimensions des modèles réduits et la largeur du déversoir, on peut calculer le débit de basculement de chaque bloc fusible.

### III.5.2 Comparaison entre la charge de basculement théorique et pratique

Les essais expérimentaux ont été effectués sur une série de cinq blocs fusibles de largeur différente, qui ont été déterminée à partir de la relation théorique développée sur la base de la stabilité limite de bloc avec sous-pression inexistante.

La différence de la largeur implique une hauteur de basculement différente pour chaque bloc. Ainsi, les essais ont été répétés plusieurs fois et la différence entre les valeurs obtenues pour chaque bloc est négligeable. Les valeurs obtenues de la charge d'eau sur le bloc pour plusieurs essais sont presque les mêmes. De ce fait, la valeur pris en compte correspond à la valeur moyenne.

La valeur pris en compte correspond à la valeur moyenne obtenue par la relation suivante :

$$\bar{h}_{pr} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{h}_j \quad (\text{III.3})$$

$\bar{h}_{pr}$  est la hauteur moyenne calculée pour une série d'essais d'un bloc,  $n$  le nombre d'essais réalisés et  $j$  l'ordre de l'essai.

Les valeurs moyennes mesurées sur une série des essais sont présentées sur le tableau suivant :

**Tableau III.3** Hauteurs d'eau expérimentale de basculement obtenu pour chaque bloc :

N° Bloc	1	2	3	4
$\bar{h}_{pr}(cm)$	5,1	5,9	8,0	8,2



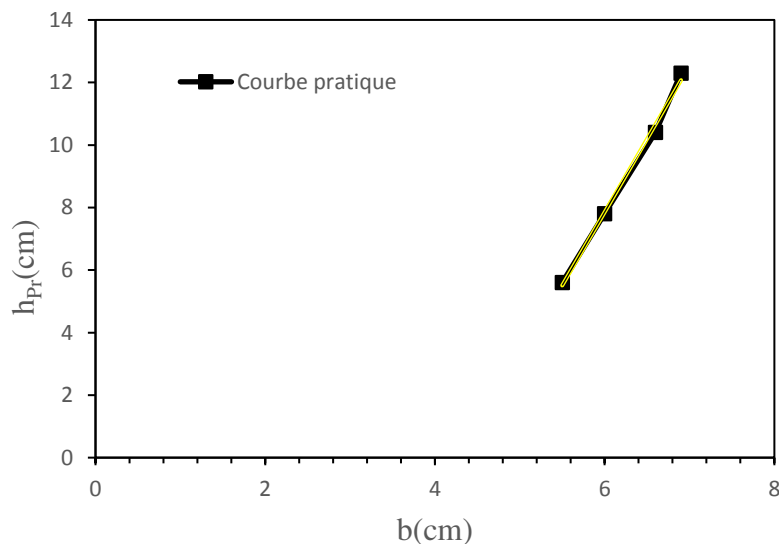
**Figure III.14** Déversoir avant et après le basculement d'un bloc fusible

**Tableau III.4** Caractéristiques géométriques et résultats théoriques et pratiques obtenus pour chaque bloc fusible :

N° Bloc	(1)	(2)	(3)	(4)
Caractéristiques				
$\gamma_b(t/m^3)$	2,55	2,55	2,51	2,52
$H_b(cm)$	10	10	10	10
$L_b(cm)$	20	20	20	20
$b(cm)$	5,5	6	6,6	6,9
$h_{th}(cm)$	5,5	7,7	10,7	12,7
$h_{pr}(cm)$	5,6	7,8	10,4	12,3
$h_{th}-h_{pr}(cm)$	-0,1	-0,1	0,3	0,4
Diff(%)	-1,78	-1,28	2,88	3,25

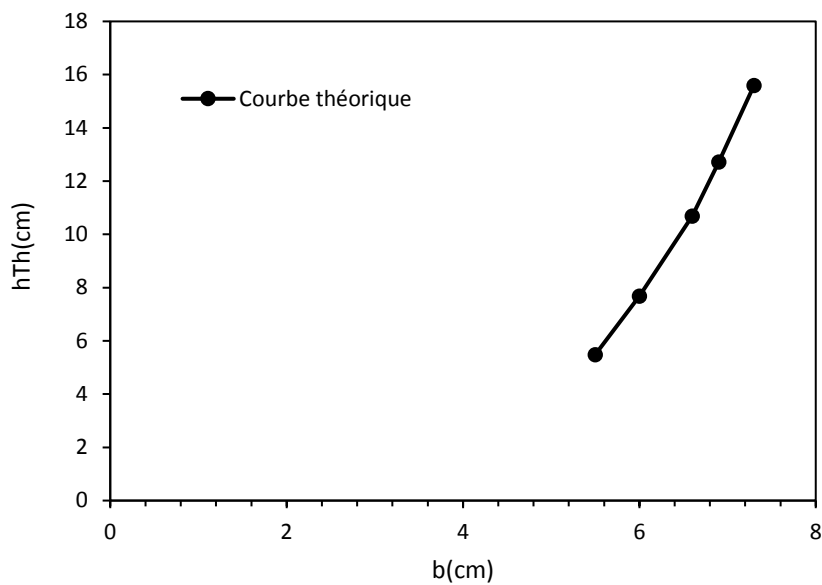
La représentation graphique des résultats obtenus sur les quatre blocs montre que la tendance de la courbe se rapproche d'une droite (III.15). Cependant, ceci ne peut être vrai que si le poids volumique et le même pour tous les blocs, et cela remarquant pour les blocs testés, que ces poids volumiques sont très proches. Le graphe suivant représente la variation de la largeur  $b$  en fonction de la lame d'eau écoulée qui provoque le basculement du bloc (expérimentale).

A partir de ces résultats expérimentaux, on observe que la charge de basculement des blocs augmente rapidement par rapport à l'augmentation de la largeur, où la charge de renversement du petit bloc presque égale à sa largeur, tandis que le quatrième bloc bascule à une charge proche du double de sa largeur.



**Figure III.15** Courbe pratique de la variation de la charge de basculement en fonction de la largeur de bloc

Le graphique de la figure (III.15), montre aussi que la hauteur de basculement dépend essentiellement de la largeur du bloc, par exemple pour que le bloc bascule pour une faible hauteur d'eau sur le bloc, il suffit de réduire la largeur du bloc. Ceci montre que les blocs fusibles sont plus adaptés aux faibles crues que pour les crues de grande période de retour.



**Figure III.16** Courbe théorique de la variation de la charge de basculement en fonction de la largeur de bloc

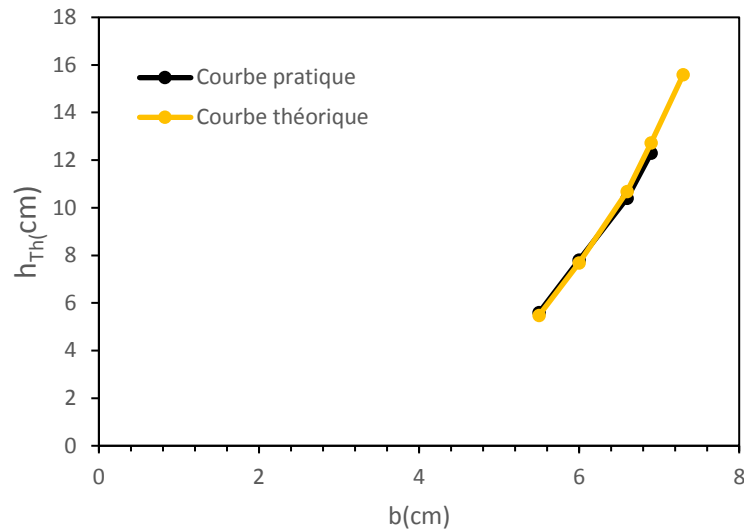
La représentation graphique (III.16) de la variation de la charge de basculement en fonction de la largeur calculé par la relation théorique obtenue dans le deuxième chapitre (II.5) montre la même allure que celle obtenue dans les résultats expérimentaux pour les mêmes poids volumiques que les blocs testés qui sont variables d'un bloc à l'autre.

$$b = H \sqrt{\frac{H + 3h}{3 \frac{\gamma_b}{\gamma} H + 2h}}$$

$$\Rightarrow h = \frac{3 \left( \frac{\gamma_b}{\gamma} \right) b^2 H - H^3}{3H^2 - 2b^2}$$

Pour vérifier la validité de la relation (II.5), il est utile de procéder à une confrontation des résultats théoriques avec ceux obtenus expérimentalement. A cet effet, le graphique (II.17) représente une comparaison entre les deux courbes théorique et expérimentale.

La lecture de ce graphique (III.17) qui représente les hauteurs de basculement pratiques  $h_{pr}$  et théoriques  $h_{th}$  en fonction de la largeur des blocs, montre un très bon accord entre les valeurs théoriques et ceux obtenues expérimentalement. La différence maximale entre les valeurs théoriques et pratiques ne dépasse pas 3,5% sur toute la gamme de la charge.



**Figure III.17** Comparaison entre la charge théorique et pratique

### III.5.3 Comparaison entre les blocs fusibles avec et sans sous-pression

Les résultats obtenus des essais effectués sur les blocs fusibles avec sous-pression ont montré un bon accord avec la relation théorique, Il a été remarqué que la hauteur de basculement augmente avec l'accroissement de la largeur du bloc.

L'existence de la sous-pression totale sous les blocs, et parce que la hauteur des blocs et la charge de basculement sont à la fois fixes, pour ça la largeur doit être grande pour assurer la stabilité du bloc jusqu'à l'eau atteint la valeur de renversement et donc une augmentation des matériaux de constructions.

Tandis que les blocs fusibles sans sous-pression (sous-pression inexistante) permet d'avoir des éléments avec des épaisseurs  $b$  réduites, et donc des matériaux de construction réduits.

### III.6 Conclusion

L'étude expérimentale qui a été effectuée sur 04 modèles réduits des blocs fusibles sans sous-pression (sous-pression inexistante), avec des largeurs différentes a été menée sur un déversoir qui comporte cinq blocs.

Les premiers résultats ont fait remarquer que l'écoulement sur les blocs est semblable à celui sur un déversoir à seuil épais.

Cependant, la vérification expérimentale de la validité de la relation obtenue par voie théorique a montré un très bon accord entre les deux méthodes théorique et expérimentale, l'écart le plus remarquable est d'environ 3,5%, sur toute la gamme de la charge.



A partir de ces résultats, on observe que la charge de basculement des blocs augmente rapidement par rapport à l'augmentation de la largeur, où la charge de renversement du petit bloc presque égale à sa largeur, tandis que le quatrième bloc bascule à une charge proche du double de sa largeur.

La comparaison entre les blocs fusibles avec et sans sous-pression montre que l'existence de la sous-pression totale sous les blocs nécessite une grande largeur pour assurer la stabilité du bloc jusqu'à l'eau atteint la valeur de renversement et donc une augmentation des matériaux de constructions.

Tandis que les blocs fusibles sans sous-pression (sous-pression inexistante) permet d'avoir des éléments avec des épaisseurs  $b$  réduites, et donc des matériaux de construction réduits.

## Conclusion générale

La sécurité des barrages est un objectif primordial qui peut conduire à accroître la capacité des évacuateurs de crues. A l'opposé, la problématique de l'envasement, l'augmentation des besoins ou la satisfaction inévitable des besoins due à une perte de capacité, amène à rechercher des solutions pour accroître la capacité des retenues

Les blocs fusibles sont considérés comme une solution efficace et une alternative économique pour résoudre le problème de la réduction de la capacité de stockage à cause de l'envasement pour un grand nombre de barrages équipés par des déversoirs rectilignes à seuil libre.

L'objectif souligné dans ce travail, a été de parvenir à une méthode pour déterminer les dimensions des blocs fusibles, afin de permettre leur basculement successif lors des crues exceptionnelles, quand la hauteur de l'eau atteint une certaine valeur au-dessus du bloc, qui correspond à une lame d'eau d'une crue sélectionnée.

Le premier chapitre, qui s'est intéressée de passer en revue les différents travaux de recherche qui ont été effectués sur les déversoirs auto-stables, en particulier le système des hausses fusibles, blocs fusibles et d'autres dispositifs fusibles, afin de mieux comprendre leurs caractéristiques géométriques, leurs dimensionnements, leurs principes de fonctionnement et leurs utilités.

Le deuxième chapitre a été consacré à l'étude théorique de l'identification de la méthode de prédimensionnement des blocs, cette méthode est basée sur le principe de la stabilité limite, lorsqu'il est posé sur le seuil du déversoir et exposé à l'influence de la force hydrostatique et une sous-pression inexistante. Le résultat de ce développement théorique a permis de présenter une relation mathématique qui permet de calculer la largeur des blocs fusibles pour une hauteur d'eau donnée au-dessus du bloc.

Le troisième chapitre a été pour objectif de valider la relation mathématique qui permet de calculer la largeur des blocs fusibles pour une hauteur d'eau donnée au-dessus du bloc. Des essais ont été effectués sur des modèles réduits de blocs fusibles dimensionnés par l'équation obtenue théoriquement.

L'étude expérimentale a été effectuée sur 04 modèles réduits des blocs fusibles, avec des largeurs différentes.

Les premiers résultats ont fait remarquer que l'écoulement sur les blocs est semblable à celui sur un déversoir à seuil épais.

Cependant, la vérification expérimentale de la validité de la relation obtenue par voie théorique a montré un très bon accord entre les deux méthodes théorique et expérimentale, l'écart le plus remarquable est d'environ 3,5%, sur toute la gamme de la charge.

A partir de ces résultats, on observe que la charge de basculement des blocs augmente rapidement par rapport à l'augmentation de la largeur, où la charge de renversement du petit bloc presque égale à sa largeur, tandis que le quatrième bloc bascule à une charge proche du double de sa largeur.

La comparaison entre les blocs fusibles avec et sans sous-pression montre que L'existence de la sous-pression totale sous les blocs nécessite une grande largeur pour assurer la stabilité du bloc jusqu'à l'eau atteint la valeur de renversement et donc une augmentation des matériaux de constructions.

Tandis que les blocs fusibles sans sous-pression (sous-pression inexistante) permet d'avoir des éléments avec des épaisseurs  $b$  réduites, et donc des matériaux de construction réduits.

Ce travail est une contribution à l'étude des déversoirs auto-stables baptisé blocs fusibles de type sans sous-pression et basculement après déversement, pour le but d'aboutir à une méthode de dimensionnement simple et de meilleur type de ces dispositifs.

## 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, Thèse 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.