

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
العلمي والبحث العالبي ال تعلل يم وزارة
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 :...../ 2018



جامعة محمد خيضر- بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية و الري
المرجع:...../ 2018

Mémoire de Master
Spécialité Hydraulique
Option : Ouvrage Hydraulique

Thème :

**Vérification expérimentale de l'effet de la forme de
l'arête amont des
blocs fusibles sur l'écoulement**

Etudiant :

•SEFARI Rami

Encadreur :

•OUAMANE Ahmed

Co-encadreur :

•SEKKOUR Ilyese

Promotion : Juin 2018

Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon promoteur Pr. Ouamen Ahmed, au département d'hydraulique. Je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté à me rencontrer et répondre à mes questions durant mes recherches.

Je remercie mes très chers parents, Chaaban et Fadila, qui ont toujours été là pour moi, « Vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé ni efforts. Vous m'avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Je suis redevable d'une éducation dont je suis fier ».

Je remercie mon frère Sami et mes sœurs Achouak et Siouar pour leur encouragement.

Je remercie un ami très spécial, un homme que je respecte beaucoup, ce qui m'a donné le soutien, le bonheur et la joie de vivre vous AIDAT Toufik.

Je remercie très spécialement Mr Sekkour Ilyes pour son soutien et ses conseils fructueux qui m'ont facilité la réalisation de ce travail et sa disponibilité au laboratoire de recherche (LAHE).

Enfin, je remercie tous mes Ami(e)s que j'aime tant, Hamza, Sofiane, Rafik, Amin, Houcin, Walid, Kamel, Hamza, Marzouk, Djihad, Hicham, Fateh, Sara et Amina Pour leur sincère amitié et confiance, et à qui je dois ma reconnaissance et mon attachement.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Sefari Rami

Dédicaces

A ma très chère mère FADILA

*Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le
Symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et
L'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et
De prier pour moi.*

*Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours
Pour mener à bien mes études.*

*Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour
Exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as
Cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance
Et même à l'âge adulte.*

*Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et
T'accorder santé, longue vie et bonheur.*

A mon Père CHAABENE

*Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour,
L'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu
Pour vous.*

A ma grande mère maternelle YAYA ZOUHRA

*A la grande dame qui a tant sacrifié
Pour nous.*

A tous les membres de ma famille, petits et grands

*Veillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon
Affection*

*A tout le staff du département de génie civil et hydraulique
A tous les enseignants et enseignantes qui ont contribué à ma
formation.*

A u défunt et regretté ami et frère MOUHOU S Mounir

*De son vivant, n'a cessé d'inculquer en moi l'art de bien faire et celui de ne jamais
laisser tomber devant une difficulté. Je lui dois cette réussite. Que dieu
l'accueille en son vaste paradis nchallah*

Résumé

Les déversoirs auto stables sont des alternatives qui permettent de compenser la capacité de stockage perdue des barrages qui ont été affectés par un envasement précoce de leurs retenues et d'augmenter le degré de sécurité des barrages existants.

Ces alternatives représentent une solution efficace de la réhabilitation de l'évacuateur de crues en faisant surélever le seuil du déversoir par des dispositifs fusibles pour augmenter la capacité du stockage ou le débit à évacuer.

Les blocs fusibles est un nouveau système économique des déversoirs auto-stables qui permet l'augmentation de la capacité de stockage et le débit d'évacuation.

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 l'ouverture de chaque élément pour un niveau d'eau amont différent. Ainsi le débit aval augmente donc progressivement.

L'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.

Le présent travail est dans le cadre d'autre travaux qui doivent être entrepris pour améliorer cette approche et aboutir à une méthode simple de dimensionnement des blocs fusibles.

Mots clés : Barrage, capacité de stockages, déversoir, système fusibles, blocs fusibles, systèmes auto-stables.

abstract

The auto-stable weirs are alternatives that allow compensate for the lost storage capacity of dams that have been affected by precocious siltation of their reservoirs and increase the safety of existing dams.

These alternatives represent an effective solution of the rehabilitation of the spillway by raising the threshold of the spillway by fuse devices to increase the capacity of the storage or the flow to evacuate.

The fuse blugs is a new economic system of self-stable weirs that allows for increased storage capacity and evacuation flow.

The principle of this system is to place concrete blugs independent of each other, side by side on the threshold of the weir. These elements have characteristics a little different from each other, which causes the opening of each element for a different upstream water level. Thus, the downstream flow increases therefore gradually.

The studies carried out at the Laboratory of Hydraulic Aménagements and Environment at the University of Biskra have allowed to lead to a pre-sizing approach of the weir in fuse blugs.

The present work is part of other works that must be undertaken to improve this approach and lead to a simple method of sizing of fuse blugs.

Keywords: Dam, storage capacity, Weir, fuse system, Fuse plug, auto-stable systems.

ملخص

إن السدود المستقرة ذاتيا هي بدائل تسمح بتعويض السعة التخزينية المفقودة للسدود التي تأثرت بالتغرين المبكر لخزاناتها وزيادة سلامة السدود الموجودة

وتمثل هذه البدائل حلاً فعالاً لإعادة تأهيل مصرف الفيضانات عن طريق رفع عتبة الهدار بواسطة أجهزة الصمامات لزيادة سعة التخزين أو التدفق المصرف

كتل الصمامات هي نظام اقتصادي جديد من الهدرات المستقرة ذاتياً يسمح بزيادة سعة التخزين وتدفق التصريف مبدأ هذا النظام هو وضع الكتل الخرسانية مستقلة عن بعضها البعض ، جنباً إلى جنب على عتبة الهدار. هذه العناصر لها خصائص مختلفة بعض الشيء عن بعضها البعض ، مما يؤدي إلى انفتاح كل عنصر لمستوى ماء مختلف في المنبع. وبالتالي يزداد تدفق المصب تدريجياً

الدراسات التي أجريت في مختبر تهيئات الري والبيئة في جامعة بسكرة سمحت بالوصول إلى مقارنة ما قبل تحجيم الهدار ذو كتل الصمامات

هذا العمل هو جزء من أعمال أخرى التي يجب القيام بها لتحسين هذا المقاربة والوصول إلى طريقة بسيطة لتحديد ابعاد الكتل الصمامات

كلمات مفتاحيه : السد، سعة التخزين، هدار، نظام صمامات، كتل صمامات، نظام مستقر أليا

Liste des figures

CHAPITRE I : *Etat des connaissances*

Figure (I.1) Déversoir (dispositif de mesure).....	03
Figure (I.2) Déversoir (Evacuateur de crues).....	04
Figure (I.3) Déversoir rectiligne à échancrure rectangulaire.....	04
Figure (I.4) Déversoir en mince paroi.....	05
Figure (I.5) a) -Déversoir en mince paroi standard - b) - Déversoir standard correspondant	06
Figure (I.6) Déversoir à seuil épais, géométrie trapézoïdale.....	07
Figure (I.7) Déversoir à hausse fusible.....	08
Figure (I.8) Vue 3D d'une hausse fusible, (S. LACROIX, U. SPINAZZOLA, Hydroplus).	09
Figure (I.9) vue aval d'une hausse labyrinthe.....	10
Figure (I.10) Hausses fusibles à seuil labyrinthe, barrage Ghrib en Algérie (hydroplus,France).....	10
Figure (I.11) Hausse labyrinthe à faible lame déversante (Falvey et al 1995).....	11
Figure (I.12) Hausse labyrinthe à lame déversante modérée (Falvey et al 1995).....	11
Figure (I.13) Hausse labyrinthe à forte lame déversante (Falvey et al 1995).....	12
Figure (I.14) Vue amont des hausses à crête rectiligne (Hydroplus).....	12
Figure (I.15) vue amont des hausses à crête rectiligne barrage de Béni Amrane.....	13
Figure (I.16) Hausses fusibles sur le barrage de Khorobrovksaya.....	13
Figure (I.17) Hausses fusibles sur le barrage de Khorobrovksaya.....	14
Figure (I.18) Type de hausses en fonction du rapport h/H (Hasan T. Kocahan, 2006).....	14
Figure (I.19) photo et schémas représentatifs des hausses rabattables (Hydroplus).....	15
Figure (I.20) Schémas de fonctionnement des hausses rabattables (Hydroplus).....	15
Figure (I.21) Puits d'alimentation solidaire de la hausse (en acier).....	16
Figure (I.22) vue d'en bas d'une hausse labyrinthe.....	17

Figure (I.23) Augmentation de la capacité des barrages (Hydroplus).....	17
Figure (I.24) Amélioration de la sécurité des évacuateurs de crues à seuil libre (Hydroplus).....	18
Figure (I.25) Principe de fonctionnement des hausses fusibles.....	19
Figure (I.26) Hausse fusible avant déversement sur la crête.....	20
Figure (I.27) Hausse fusible avec déversement sur la crête pour une crue modérée.....	20
Figure (I.28) Hausse fusible avec mise en pression de la chambre et basculement.....	21
Figure (I.29) Coefficient de débit d'une hausse fusible (Falvey et al, 1995).....	22
Figure (I. 30) les forces agissant sur une hausse.....	23
Figure (I. 31) Forces agissant sur une hausse fusible (Falvey et al, 1995).....	24
Figure (I.32) Moments dans la hausse fusible Model WLH (Falvey et al, 1995).....	26
Figure (I.33) Effet de glace sur la hausse fusible (Hydropower & Dams de 1996).....	30
Figure (I.34) Vue en perspective d'un déversoir Blocs fusibles (Hydroplus).....	31
Figure (I.35) Blocs sans sous-pression et basculement avant déversement.....	31
Figure (I.36) Vue en perspective d'un des deux modèles des blocs fusibles avec sous-pression.....	32
Figure (I.37) Géométrie d'un bloc fusible avec sous-pression.....	33
Figure (I.38) Disposition générale et murs séparateurs.....	34
Figure (I.39) Diagramme de stabilité.....	35
Figure (I.40) Bloc fusible placé sur un seuil après un arasement.....	35
Figure (I.41) Différentes phases de construction du bloc sur un seuil.....	36
Figure (I.42) Schéma de calcul de stabilité du bloc fusible.....	37
Figure (I.43) le coefficient de débit en fonction de la hauteur d'eau sur les blocs.....	38
Figure (I.44) Courbe pratique de la variation de la charge de basculement en fonction de la largeur de bloc.....	39
Figure (I.45) Courbe théorique de la variation de la charge de basculement en fonction de la largeur de bloc.....	40
Figure (I.46) Variation de la hauteur de basculement en fonction de la variation du poids volumique.....	40
Figure (I.47) Comparaison entre la charge théorique et pratique.....	41
Figure (I.48) Schéma d'alignement d'une série de trois blocs sur le seuil.....	42

Figure (I.49) Disposition direct et inverse des blocs de la série (01).....	42
Figure (I.50) Disposition direct et inverse des blocs de la série (02).....	42
Figure (I.51) Disposition direct et inverse des blocs de la série (03).....	43

CHAPITRE II : Etude théorique pour le dimensionnement des modèles réduits

(Arête amont chanfreinée et arrondie)

Figure (II.1) Schéma descriptif d'un bloc fusible.....	46
Figure (II.2) Arasement du seuil pour l'emplacement des blocs fusible.....	47
Figure (II.3) Blocs fusibles pour augmenter la capacité des barrages.....	47
Figure (II.4) Blocs fusibles pour améliorer la sécurité des évacuateurs de crues.....	48
Figure (II.5) (a) Bloc fusible fonctionne comme un barrage.....	49
Figure (II.5) (b) Bloc fusible fonctionne comme un déversoir.....	49
Figure (II.5) (c) Bloc fusible fonctionne comme un fusible.....	50
Figure (II.6) Schéma de calcul de stabilité du bloc fusible chanfrien	52
Figure (II.7) Schéma de calcul de stabilité du bloc fusible arrondi.....	55

CHAPITRE III : Etude expérimentale sur des modèles réduits des blocs fusibles

(Forme d'arête amont chanfreinée et arrondie)

Figure (III.1) Vue d'ensemble de la station d'expérimentation.....	59
Figure (III.2) Vue aval du canal des essais de la station d'expérimentation.....	60
Figure (III.3) Schéma de la station d'expérimentation.....	61
Figure (III.4) Tableaux des manométriques de mesure des niveaux d'eau.....	62
Figure (III.5) Schéma du principe de mesure du débit par débitmètre à ultrason.....	62
Figure (III.6) Débitmètre à ultrason Flowmeter 93W2.....	63
Figure (III.7) Capteur de niveau PROSONIC T.....	64
Figure (III.8) Schéma d'installation du Capteur de niveau dans un canal à écoulement libre	

.....	64
Figure (III.9) Détecteur de niveau à ultrason au niveau du canal.....	65
Figure (III.10) Moules en bois et métallique.....	66
Figure (III.11) Blocs fusibles à arête amont chanfreinée après fabrication.....	67
Figure (III.12) Blocs fusibles à arête amont arrondie après fabrication.....	68
Figure (III.13) Socle de basculement des blocs.....	69
Figure (III.14) Support métallique.....	69
Figure (III.15) Vue amont et aval des blocs posés sur les pertuis.....	70
Figure (III.16) déversoir à seuil épais en écoulement dénoyé.....	71
Figure (III.17) Essai de calcul du coefficient de débit.....	72
Figure (III.18) Coefficient de débit d'un déversoir en blocs fusibles à arête amont chanfreinée en fonction de la charge.....	73
Figure (III.19) Coefficient de débit d'un déversoir en blocs fusibles à arête amont arrondie en fonction de la charge.....	73
Figure (III.20) Déversoir avant et après le basculement d'un bloc.....	74
Figure (III.21) Comparaison entre la charge théorique et pratique de la forme chanfreinée (1cm).....	76
Figure (III.22) Comparaison entre la charge théorique et pratique de la forme chanfreinée (2cm).....	77
Figure (III.23) Comparaison entre la charge théorique et pratique de la forme arrondie (1cm)	77
Figure (III.24) Comparaison entre la charge théorique et pratique de la forme arrondie (2cm)	78

Liste des tableaux

CHAPITRE I

Etat des connaissances sur les déversoirs

Tableau (I.1) : la Charge de basculement en fonction du rapport largeur/hauteur.....11

CHAPITRE III

Etude expérimentale sur des modèles réduits des blocs fusibles

(Forme d'arête amont chanfreinée et arrondie)

Tableau (III.1) Caractéristiques initiales des modèles réduits des blocs (forme chanfreinée)
.....66

Tableau (III.2) Caractéristiques initiales des modèles réduits des blocs (forme arrondie)
.....67

Tableau (III.3) Caractéristiques réelles des modèles réduits (forme chanfreinée) après fabrication.....67

Tableau (III.4) Caractéristiques réelles des modèles réduits (forme arrondie) après leur fabrication..... 68

Tableau (III.5) Coefficient de débit pour des blocs à arête amont chanfreinée (1cm).....72

Tableau (III.6) Coefficient de débit pour des blocs à arête amont chanfreinée (2cm).....72

Tableau (III.7) Coefficient de débit pour des blocs à arête amont arrondie (1cm).....72

Tableau (III.8) Coefficient de débit pour des blocs à arête amont arrondie (2cm)..... 72

Tableau (III.9) Caractéristiques géométriques et résultats théoriques et pratiques obtenus pour la forme chanfreinée sur les deux séries de (1cm) et (2cm) successivement.....75

Tableau (III.10) Caractéristiques géométriques et résultats théoriques et pratiques obtenus pour la forme arrondie sur les deux séries de (1cm) et (2cm) successivement.....76

Vérification expérimentale de l'effet de la forme de l'arête amont des blocs fusibles sur l'écoulement.

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Résumé

Introduction générale..... 01

Etude bibliographique

CHAPITRE I : *Etat des connaissances*

I.1 Introduction-----03

I.2.Généralités sur les déversoirs -----03

 I.2.1 Définition du déversoir -----03

 I.2.2 Différents types des déversoirs-----04

 I.2.2.1 Les déversoirs rectilignes -----04

 I.2.2.2 Déversoir en mince paroi -----04

 I.2.2.3 Déversoir standard-----06

 I.2.2.4 Déversoir à seuil épais -----07

I.3.Les déversoirs auto stables -----08

 I.3.1 Définition des déversoirs auto-stables-----08

 I.3.2 Les hausses fusibles -----08

 I.3.3 Types des hausses fusibles -----09

 I.3.3.1 Les hausses à seuil labyrinthe----- 10

 I.3.3.2 Hausses à crête rectiligne----- 12

 I.3.3.2.1 Les hausses destinées à supporter de très fortes lames d'eau----- 13

 I.3.3.2.2 Les hausses spéciales dites "grand froid" ----- 13

 I.3.3.2.3 Les hausses rabattables ----- 15

 I.3.4 Puits d'alimentation ----- 15

 I.3.5 Lest d'équilibrage des hausses----- 16

 I.3.6 Chambre de mise en pression ----- 16

 I.3.7 Domaines d'utilisation des hausses fusibles----- 17

I.3.7.1 Augmentation de la capacité de stockage des barrages -----	17
I.3.7.2 Amélioration de la sécurité des évacuateurs de crues -----	18
I.3.7.3 Moyen de sécurisé un système vanné-----	18
I.3.7.4 Régulation de l'écoulement dans les rivières-----	18
I.3.8 Principe de fonctionnement des hausses fusibles -----	19
I.3.9 Caractéristiques de débit des hausses fusibles-----	21
I.3.10 Stabilité des hausses fusibles et leur analyse-----	23
I.3.11 Stabilité au renversement -----	24
I.3.12 Stabilité au glissement-----	27
I.3.13 Principes de dimensionnement-----	28
I.3.14 Effet de la glace -----	29
I.3.15 Effet des séismes -----	30
I.4 Les Blocs fusibles -----	30
I.4.1 Définition des blocs fusibles-----	30
I.4.2 Les deux types des blocs fusibles -----	31
I.4.3 Dimensionnement des blocs -----	34
I.4.4 Construction des blocs fusibles-----	36
I.4.5 La nouvelle méthode développée pour le dimensionnement du bloc fusible ----	36
I.4.6 Développement théorique -----	36
I.4.7 Résultats expérimentaux-----	37
I.4.8 Description d'écoulement -----	37
I.4.9 Vérification du coefficient de débit d'un bloc fusible-----	38
I.4.10 La relation entre la hauteur de basculement et largeur du bloc -----	38
I.4.11 Effet de la disposition des blocs sur le seuil selon leur largeur -----	41
I.5 CONCLUSION -----	43

CHAPITRE II : Etude théorique pour le dimensionnement des modèles réduits

(Arête amont chanfreinée et arrondie)

II.1 Introduction.....	45
II.2 Description des blocs fusibles.....	45
II.3 Objectif de conception des blocs fusibles.....	46
II.3.1 Augmentation de la capacité des barrages	47
II.3.2 Amélioration de la sécurité des évacuateurs de crues.....	48
II.4 Principe de fonctionnement des blocs fusibles	48
II.5 Pré-dimensionnement des blocs fusibles.....	50
II.5.1 Dimensionnement hydraulique	50
II.5.2 Dimensionnement mécanique	51
II.5.3 Hauteur des blocs fusibles	51
II.5.4 Largeur des blocs	51
II.5.5 Calcul théorique des dimensions d'un bloc fusible à arête amont chanfreinée.....	51
II.5.6 Calcul théorique des dimensions d'un bloc fusible à arête amont arrondie	55
II.5.5.1 Stabilité au glissement.....	58
II.6 CONCLUSION.....	58

Etude expérimentale

CHAPITRE III : Etude expérimentale sur des modèles réduits des blocs fusibles

(Forme d'arête amont chanfreinée et arrondie)

III.1 Introduction	59
III.2 Description de la station expérimentale	59
III.2.1 Instruments de mesure de la charge d'eau sur les blocs.....	61
III.2.2 Instruments de mesure du débit qui transite sur les blocs	62

III.2.3 Instrument de mesure des profondeurs d'eau	63
III.3 Dispositif expérimental	65
III.3.1 Modèles réduits des blocs fusibles	65
III.3.2 Socle de basculement des blocs	68
III.3.3 Mur de séparation	69
III.4 Procédure expérimentale	69
III.5 Résultats et discussion	71
III.5.1 Description d'écoulement	71
III.5.2 Calcul du coefficient de débit expérimental de chaque forme de blocs	71
III.5.3 Comparaison du coefficient de débit des deux formes expérimentées	73
III.5.4 Comparaison entre la charge de basculement théorique et pratique	74
III.5.5 Comparaison de la charge de basculement des deux formes expérimentées	78
III.6 CONCLUSION	79

Introduction générale

Les barrages ont un rôle primordial dans la mobilisation des eaux de surface, dans le but de satisfaire la demande en eau pour des besoins d'alimentation en eau potable, d'irrigation ou industrielle. Malgré ce rôle important, la gestion des barrages se trouve confrontée à deux problèmes qui engendrent simultanément une réduction de la capacité de stockage un réservoir des barrages par un envasement accentué et d'autre part que la capacité des évacuateurs de crues d'un grand nombre de barrages est insuffisante ce qui affecte leurs sécurités.

Une nouvelle solution économique et simple d'évacuateur de crues baptisé blocs fusible a été mise au point récemment.

La technique des blocs fusibles est une nouvelle technique de déversoir auto-stable qui permet dans un premier temps l'augmentation de la capacité de stockage et dans un second temps l'évacuation d'un grand débit après effacement partiel ou total des blocs pendant les crues exceptionnelles.

Le principe de ce système est de placer des blocs en béton indépendants côte à côte sur le seuil du déversoir. Ces éléments ont des largeurs un peu différentes les unes des autres, ce qui entraîne l'ouverture de chacun d'eux pour un niveau d'eau amont différent. Ainsi le débit aval augmente donc progressivement.

La forme géométrique des blocs fusible est simple et le coût de construction ou de reconstruction des blocs effacés est faible. Ces avantages nous ont incités à mettre en évidence et étudier ce type de système.

L'écoulement sur les blocs fusibles avant leur effacement est souvent considéré comme un écoulement sur un déversoir à seuil épais. Dans ce cas, l'écoulement est sensible à la forme de l'arête amont du seuil qui peut avoir une forme anguleuse à 90° (plane), chanfreinée ou arrondie. Ces configurations peuvent avoir certainement un effet sur la débitance du déversoir en blocs fusibles et la hauteur d'eau de basculement. Pour ce faire, cette étude a été opérée par le biais d'étude théorique basée sur le principe de la stabilité limite et vérifiée par la suite par une étude expérimentale menée sur plusieurs modèles réduits de blocs fusibles de différentes configurations de la forme d'entrée (forme de l'arête amont des blocs).

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

- Le premier chapitre correspond en une étude bibliographique, concernant les déversoirs en général et les déversoirs auto-stable en particulier. Cette première partie de l'étude a pour objectif de présenter une synthèse des principaux travaux effectués dans le domaine.
- Le second chapitre représente une étude théorique prenant en compte les caractéristiques de chaque forme choisie pour aboutir à une relation mathématique simple de dimensionnement des blocs fusibles.
- Le troisième et dernier chapitre se rapporte à une étude expérimentale sur deux configurations des blocs qui ont été dimensionnés par les deux relations développées dans la partie théorique et finalement une conclusion générale de ce travail.



CHAPITRE I : ETAT DES CONNAISSANCES



CHAPITRE I

Etat des connaissances sur les déversoirs

I.1 Introduction

Les barrages réservoirs sont souvent confrontés à deux problèmes fondamentaux, le premier se rapporte à la maîtrise des crues qui peuvent présenter des risques de submersion du barrage et le deuxième problème se rapporte à la perte de la capacité de stockage suite à l'envasement de la retenue. La maîtrise des crues est généralement assurée par un dispositif qui permet le passage des crues extrêmes sans incident.

Ce dispositif, appelé généralement évacuateur de crue, équipé d'un déversoir de forme et de dimensions choisis de façon à garantir l'évacuation du volume excessif.

I.2 Généralités sur les déversoirs

I.2.1 Définition du déversoir

Un déversoir est un orifice superficiel ouvert à sa partie supérieure et pratiqué dans une paroi le plus souvent verticale.

- A l'amont, le niveau d'eau supposé constant s'abaisse sensiblement au-dessus du seuil. On appellera charge : la hauteur d'eau entre le niveau amont constant et le niveau du seuil.
- A l'aval du seuil, la lame déversante peut prendre différentes formes, en liaison avec la charge et la hauteur d'eau à l'aval (Carlier, 1986)

Quand on parle de construction hydraulique on trouve que les déversoirs jouent deux rôles importants tel que :

- Dispositifs de mesure fig. (I.1),

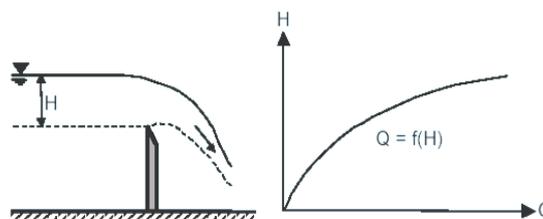


Figure (I.1) Déversoir (dispositif de mesure).

-Evacuateurs de crues fig. (I.2).

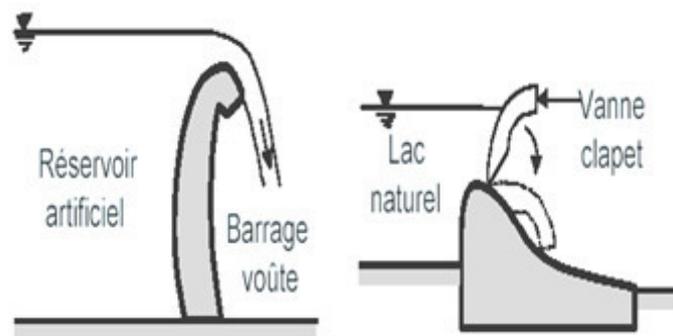


Figure (I.2) Déversoir (Evacuateur de crues).

I.2.2 Différents types des déversoirs

La classification des déversoirs selon le contrôle de déversement présente deux types principaux : les déversoirs contrôlés et les déversoirs non contrôlés. Les déversoirs non contrôlés sont classifiés en deux groupes selon l'alignement de la crête; rectilignes et non rectilignes.

I.2.2.1 les déversoirs rectilignes

Ces types des déversoirs constituent une structure qui permet de mesurer le débit qui transite par cet organe.

Ils sont caractériser par un seuil droit, le débit de transite est étroitement lié à la largeur W et la charge d'eau du seuil H . Selon la géométrie de la crête ce type de déversoir peut être en mince paroi, à seuil épais ou standard. (Ouamane.A.cours barrage.2007)

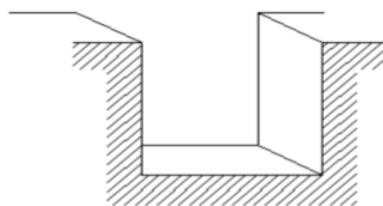


Figure (I.3) Déversoir rectiligne à échancrure rectangulaire

I.2.2.2 Déversoir en mince paroi

Ce type de déversoir est appelé à mince paroi, si la moitié, ou même quelquefois les deux tiers de la charge d'eau sur le seuil est supérieure à l'épaisseur de la crête, Un tel déversoir est caractérisé par la hauteur de pelle (\bar{w}) du fond du canal jusqu'à la crête, sa

largeur (b) et sa hauteur d'eau amont (\bar{h}_0) (Sininger et al. 1989). Selon *Bernoulli*, la charge amont sur le déversoir est :

$$\bar{H} = h_0 + \frac{Q^2}{2gb^2(\bar{h}_0 + w)^2} \quad (\text{I. 1})$$

Où :

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

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

b : Largeur du seuil du déversoir (m)

w : Hauteur de pelle (m)

Q : Débit de transite (m^3/s)

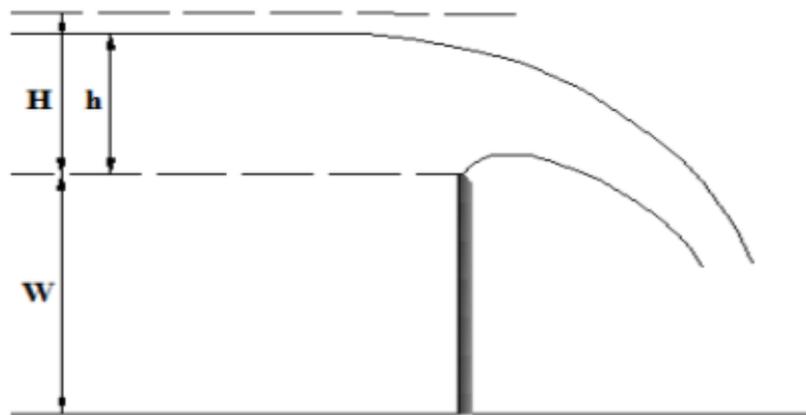


Figure (I.4) Déversoir en mince paroi

Le débit Q qui transite par le seuil peut être calculé en connaissant uniquement la hauteur d'eau à l'amont de l'ouvrage h (Carlier, 1980).

Poleni (1683-1761), a étudié plusieurs déversoirs à mince paroi. En se basant sur des diverses simplifications il a conclu que le débit (Q) est corrélé avec la hauteur d'eau amont (\bar{h}_0) par la relation :

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

Q : Débit qui transite sur le déversoir,

b : Largeur de la crête,

h : Hauteur d'eau amont,

g : Accélération de la pesanteur.

D'après (LADREYT et al, 2005), les déversoirs en mince paroi se différencient comme suit :

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

I.2.2.3 Déversoir standard

Le concept de déversoir standard consiste au développement d'un déversoir dont le parement aval épouse la géométrie de la nappe inférieure du déversoir en mince paroi afin d'éviter les zones de sous-pressions le long du radier. Ceci permet théoriquement d'avoir une pression égale à zéro le long du parement aval du déversoir standard. Le débit est donné par la relation suivante en considérant (H) comme la charge mesurée à partir de la crête du déversoir standard:

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

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

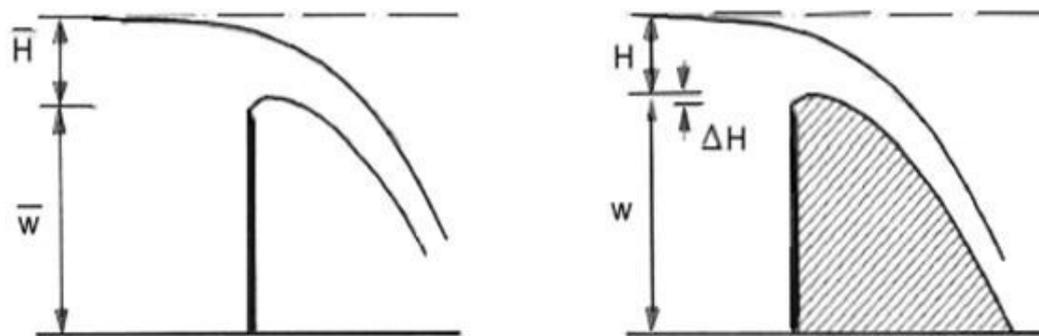


Figure (I.5) a) -Déversoir en mince paroi standard b) - Déversoir standard correspondant

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

- Le déversoir standard est considéré comme surdimensionné et les pressions sur le radier sont plus fortes mais positives. Quand la charge sur le seuil du déversoir standard est inférieure à la charge de dimensionnement ($H/H_d < 1$), donc acceptable. Dans ces conditions d'écoulement, le coefficient de débit diminue ($C_d < C_{dD}$); $H / H_d \rightarrow 0$; $C_d \rightarrow 0,385$.

- Quand la charge atteint une grandeur égale à la charge de dimensionnement (H_D), ($H/H_d = 1$), l'écoulement sur le déversoir standard correspond à celui d'un déversoir en mince paroi. Dans ces conditions la pression sur le radier est négligeable est le coefficient de débit atteint sa valeur maximale $C_d = C_{dD} = 0,494$.

- Quand la charge sur le seuil dépasse la charge de dimensionnement ($H/H_d > 1$), le déversoir standard est considéré comme sous dimensionné. Ainsi, les pressions sur le radier deviennent négatives (risque de cavitation si $H/H_D > 1,4$ ou l'écoulement se sépare du déversoir). Cependant, le coefficient de débit augmente ($C_d > C_{dD}$). En pratique des valeurs de $H/H_D = 1.1$ à 1.3 sont acceptées (Sinninger, 1988).

I.2.2.4 Déversoir à seuil épais

Le déversoir à seuil épais est caractérisé par un seuil large qui permet à la nappe déversante de prendre une forme régulière le long du seuil, les filets liquides sont parallèles et horizontaux dans cette partie, et d'après la figure (I.3) on dit que ce déversoir à angles vifs, peut s'imposer notamment pour des phases de construction des barrages en béton. Comparés au déversoir en mince paroi, deux paramètres supplémentaires relatifs à la pente amont θ et la longueur de la crête L_c du déversoir doivent être considérés. Le calcul simplifié introduit le coefficient de correction c_c dans la formule générale du déversoir en mince paroi.

$$Q = \overline{C_d} c_c b \sqrt{2gH}^{3/2} \quad (I.4)$$

Q : Débit évacué (m^3/s)
 C_d : Coefficient de débit
 c_c : Coefficient de correction
 b : Largeur du déversoir (m)
 H : Charge totale sur le déversoir (m)
 g : Accélération de l'apesanteur (m/s^2)

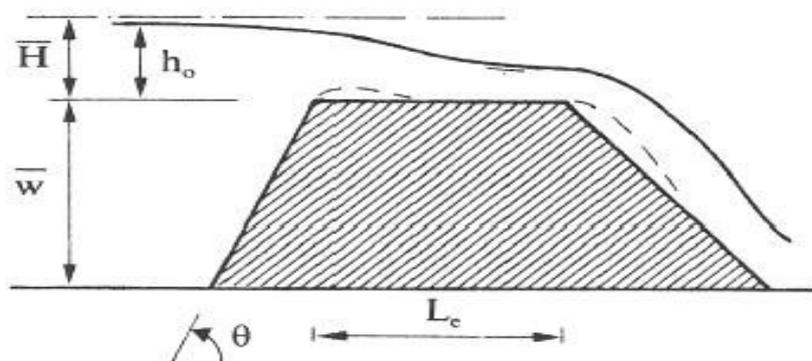


Figure (I.6) Déversoir à seuil épais, géométrie trapézoïdale

I.3. Les déversoirs auto stables

I.3.1 Définition des déversoirs auto-stables

Le déversoir auto-sables (fusibles) est un système de surélévation, se forme d'un ouvrage supplémentaire qui s'ajoute au-dessus d'un seuil du déversoir rectiligne pour améliorer leur efficacité hydraulique ou pour augmenter le volume de stockage d'une retenue. (Hydroplus)

I.3.2 Les hausses fusibles

Les hausses fusibles ont été inventées en 1989 par François Lempérière comme un moyen pour augmenter la capacité utile de stockage ou la capacité d'évacuation d'un déversoir. Ils ont été appliqués sur plus de 40 barrages dans plusieurs pays. La hausse fusible est l'équivalent d'un bouchon fusible utilisé pour l'augmentation du volume de stockage dans les retenues des barrages ou pour augmenter la capacité d'évacuation des déversoirs. 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. Chaque hausse est dimensionnée pour être renversé à un niveau de réservoir prédéterminé. Quand le débit de la crue maximale est atteint, toutes les hausses se renversent et la longueur entière de la crête est disponible pour évacuer la crue dans des conditions normales. Chaque hausse fusible se compose de trois parties; un godet en métal ou en béton armé, une base et un puits d'admission connectée à une chambre dans la base. (Ouamane.A.cours.barrage.2007)

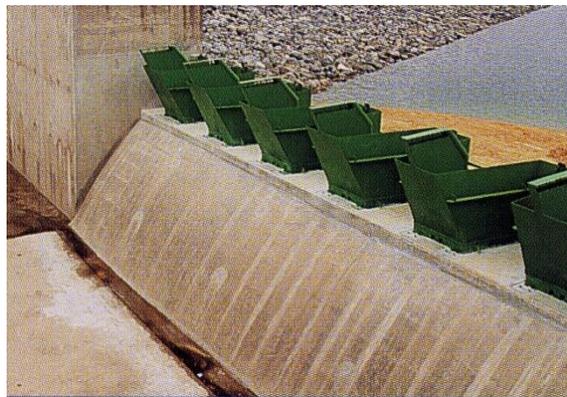


Figure (I.7) Déversoir à hausse fusible

I.3.3 Types des hausses fusibles

Les hausses fusibles ont la même composition, chacune se compose de quatre parties principales et nécessaires afin d'acquies sa fonction.

Les quatre parties principales sont : la hausse, le puits d'alimentation, la chambre de mise en pression au contact du seuil et le lest, et chaque partie peut être caractérisée par une configuration différente selon les besoins demandés.

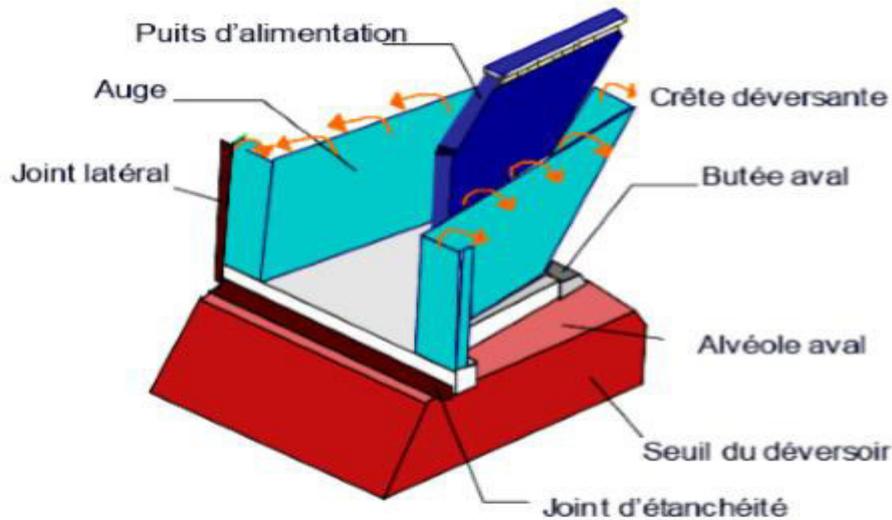


Figure (I.8) Vue 3D d'une hausse fusible, (S. LACROIX, U. SPINAZZOLA, Hydroplus).

Donc on peut dire que les hausses selon l'endroit d'emplacement, varient en forme et en dimensions, et varient aussi en poids et en matériaux de fabrication.

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)

Deux types de hausses fusibles ont été utilisés dans le domaine du déversoir auto-stable, elles sont caractérisées par la forme de leur crête :

I.3.3.1 Les hausses à seuil labyrinthe

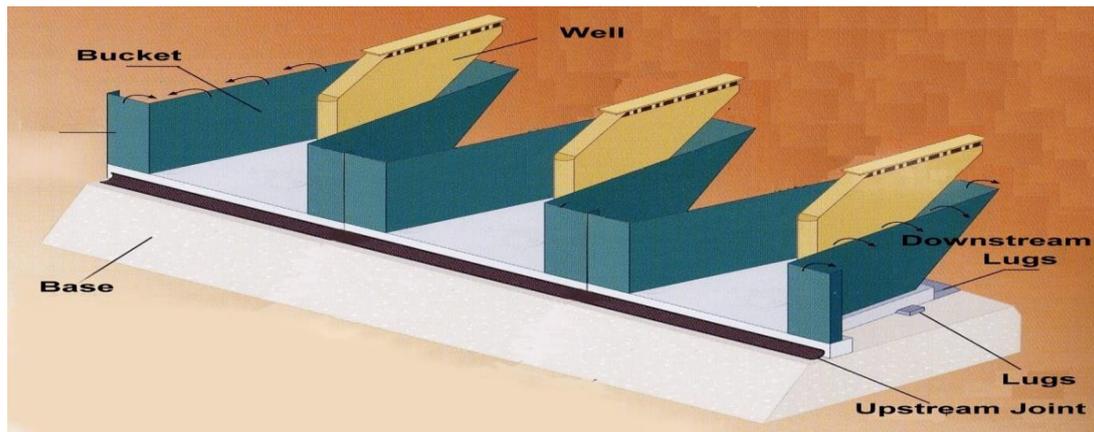


Figure (I.9) vue aval d'une hausse labyrinthe.

Ces sont des hausses déversantes qui supportent des lames d'eau d'une hauteur comprise entre 30% et 150% de leur propre hauteur, la mise en place de ces hausses le long du seuil donne à la crête une forme labyrinthe, ce qui développe la longueur du seuil jusqu'à trois fois la longueur du déversoir rectiligne (Hasan T. Kocahan, 2006).



Figure (I.10) Hausses fusibles à seuil labyrinthe, barrage Ghrif en Algérie (hydroplus, France).

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

Trois configurations standard sont disponibles et sont classées suivant la largeur en fonction de la hauteur de la hausse (Hasan T. Kocahan, 2006) : large (W :Wide) ou étroite (N :Narrow)

Vérification expérimentale de l'effet de la forme de l'arête amont des blocs fusibles sur L'écoulement.

CHAPITRE I Etat des connaissances

et suivant la marge de basculement déterminé par un entonnoir bas (LH :Low Head), élevé (HH :High Head). Les dispositifs de chacune de ces configurations sont présentés dont le tableau I.2 qu'il va présenter la Charge de basculement en fonction du rapport largeur/hauteur.

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

	Charge de basculement (en% de la hauteur de la hausse)	Rapport largeur/hauteur
Etroite, Puits d'alimentation bas (NLH)	entre 30% H et 70% H	1.0 (+/- 5%)
Large, Puits d'alimentation bas (LLH)	entre 30% H et 70% H	1.5 (+/- 5%)
Large, Puits d'alimentation élevé (LHH)	entre 70% H et 140% H	1.8 (+/- 5%)

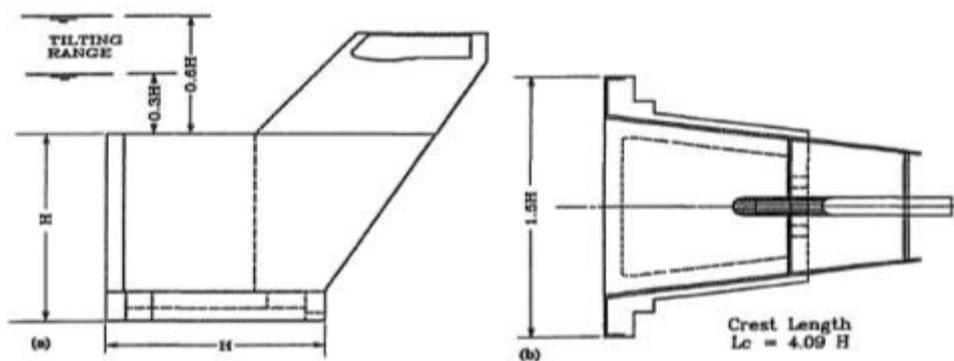


Figure (I.11) Hausse labyrinthe à faible lame déversante (Falvey et al 1995).

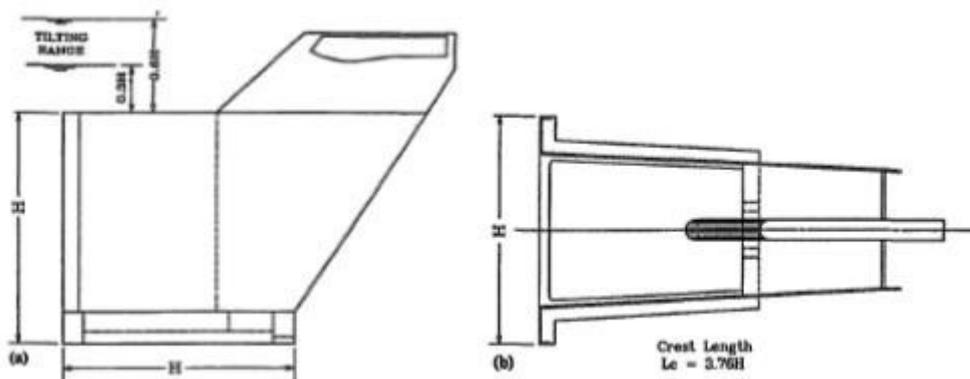


Figure (I.12) Hausse labyrinthe à lame déversante modérée (Falvey et al 1995).

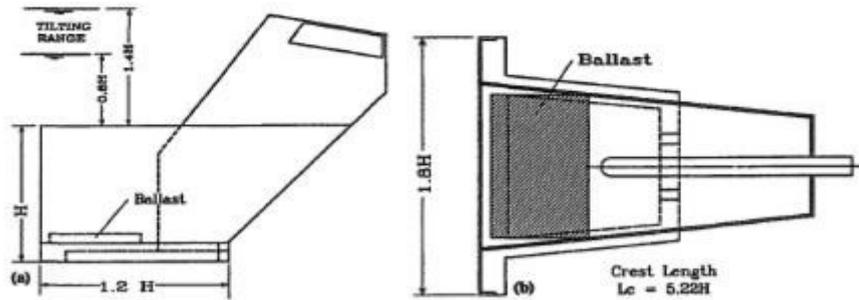


Figure (I.13) Hausse labyrinthe à forte lame déversante (Falvey et al 1995).

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

Le poids moyen de ces hausses est de :

- 20 t pour 2 m de hauteur d'élément ;
- 150 t pour 5 m de hauteur d'élément ;
- 400 t pour plus de 5 m de hauteur d'élément.

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

I.3.3.2 Hausses à crête rectiligne



Figure (I.14) Vue amont des hausses à crête rectiligne (Hydroplus)

Il y a trois types des hausses des hausses à seuil rectiligne :

I.3.3.2.1 Les hausses destinées à supporter de très fortes lames d'eau

Généralement ces hausses sont construites en béton plein éventuellement coulé en place et sont profilées de manière à obtenir le meilleur coefficient d'écoulement leur puits est en béton ou en acier. Elles peuvent être de grandes dimensions (20 m de large) et supporter des lames d'eau d'une hauteur allant jusqu'à 4 fois leur hauteur propre. Dans ce cas le labyrinthe perdrait une grande partie de son efficacité.

Généralement, les hausses sont construites en béton par le coulage sur place, autant que le puits peut être en béton ou en acier (Hasan T. Kocahan, 2006)



Figure (I.15) vue amont des hausses à crête rectiligne barrage de Béni Amrane.

I.3.3.2.2 Les hausses spéciales dites "grand froid"

Ces hausses sont conçues pour être utilisées dans des conditions de froid très sévères. Leur face amont est profilée et spécialement revêtue de manière à réduire le frottement et l'abrasion de la glace. Très stables, ces hausses sont construites en acier ou en béton.



Figure (I.16) Hausses fusibles sur le barrage de Khorobrovksaya.

CHAPITRE I Etat des connaissances

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. (« the reliability of fusible gates in ice-affected environments » publié dans la troisième édition du magazine Hydropower & Dams de 1996).



Figure (I.17) Hausses fusibles sur le barrage de Khorobrovksaya.

Ces hausses sont réglées pour basculer avant déversement ou à la suite d'un déversement annonciateur très faible. Elles sont dans la plupart des cas associées à des vannes qu'elles assistent en cas de très fortes crues et dont elles peuvent pallier une défaillance éventuelle. Elles peuvent être utilisées seules pour mettre automatiquement en service des bassins de stockage de crues disposés le long de grands fleuves. Leur hauteur peut varier entre un mètre et une dizaine de mètres. Elles sont deux panneaux rectangulaires en acier ou en béton préfabriqué.

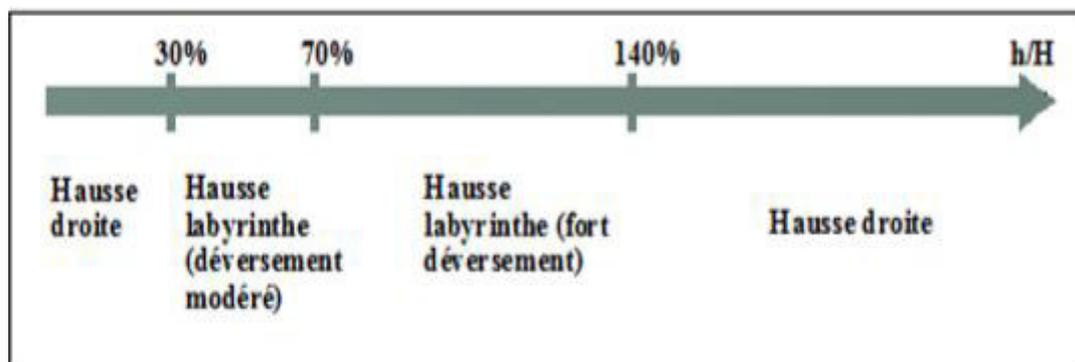


Figure (I.18) Type de hausses en fonction du rapport h/H (Hasan T. Kocahan, 2006).

I.3.3.2.3 Les hausses rabattables

Un autre type de hausse a vu le jour après quelque perfectionnement.

Un nouveau type de hausses fonctionne avec le même principe que les hausses fusibles, il se caractérise par un système qui permet aux hausses de rester sur place durant le passage des crues normales par le rabattement progressif jusqu'à l'évacuation des grandes crues, puis le système revient à sa situation initial (Hydroplus).

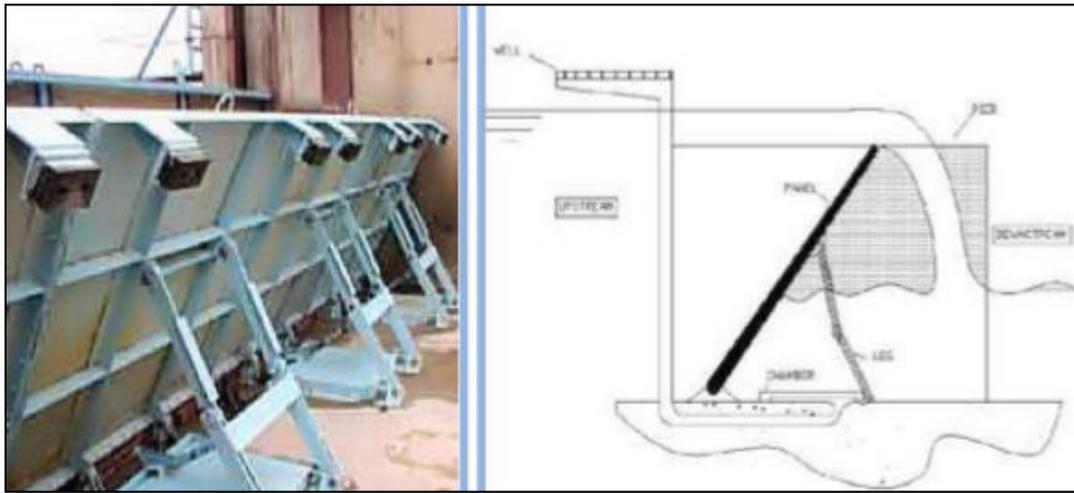


Figure (I.19) photo et schémas représentatifs des hausses rabattables (Hydroplus).

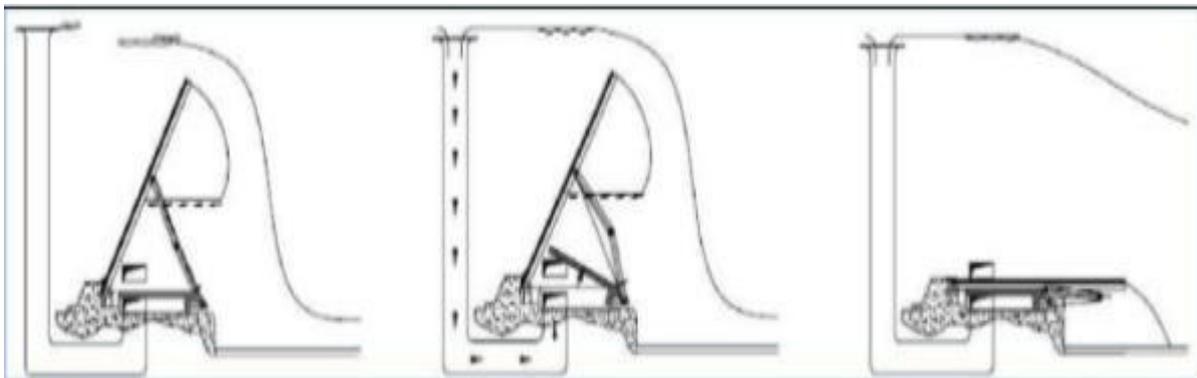


Figure (I.20) Schémas de fonctionnement des hausses rabattables (Hydroplus).

I.3.4 Puits d'alimentation

Le puits d'alimentation lié directement à la chambre de mise en pression, son rôle est de véhiculer l'eau vers la chambre, il est construit en acier avec une large ouverture à sa partie supérieure, cette ouverture est protégée par des barreaux pour empêcher le passage des corps flottants qui pourraient entraver le passage de l'eau. Le puits contribue à l'aération de la lame d'eau, pour les grandes crues où la lame est forte le fût de puits est construit en béton pour

Vérification expérimentale de l'effet de la forme de l'arête amont des blocs fusibles sur l'écoulement.

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 (Royet et Degoutte, 1992).



Figure (I.21) Puits d'alimentation solidaire de la hausse (en acier).

I.3.5 Lest d'équilibrage des hausses

L'équilibrage général des hausses est assuré par leur forme et la nature des matériaux qui les constituent. Cependant, cet équilibrage peut être obtenu par l'ajout de lest qui sert 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.3.6 Chambre de mise en pression

La force de sous pression se forme dans la chambre de mise en pression, son rôle est de déséquilibrer 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 côte 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).

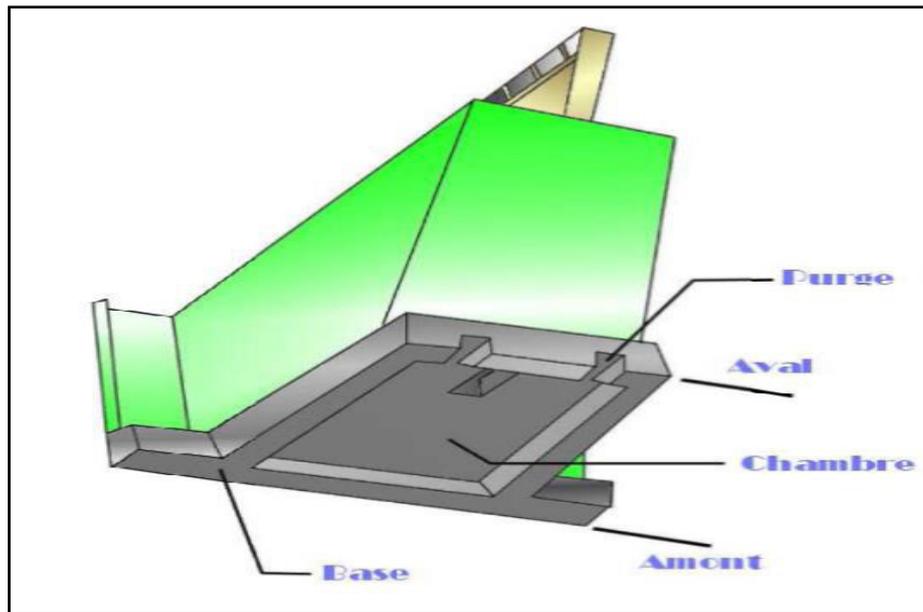


Figure (I.22) vue d'en bas d'une hausse labyrinthe.

I.3.7 Domaines d'utilisation des hausses fusibles

I.3.7.1 Augmentation de la capacité de stockage des barrages

L'équipement des barrages par un évacuateur de crue à seuil libre est considéré comme une des meilleures solutions pour les ouvrages non gardés. Le fonctionnement du seuil libre est fiable ce qu'il met l'ouvrage en sécurité, contrairement au seuil vanné qui peut connaître des pannes. La contrepartie de cette sécurité est la perte d'une tranche importante de la retenue comprise entre le niveau normal et le niveau des plus hautes eaux (Hydroplus).

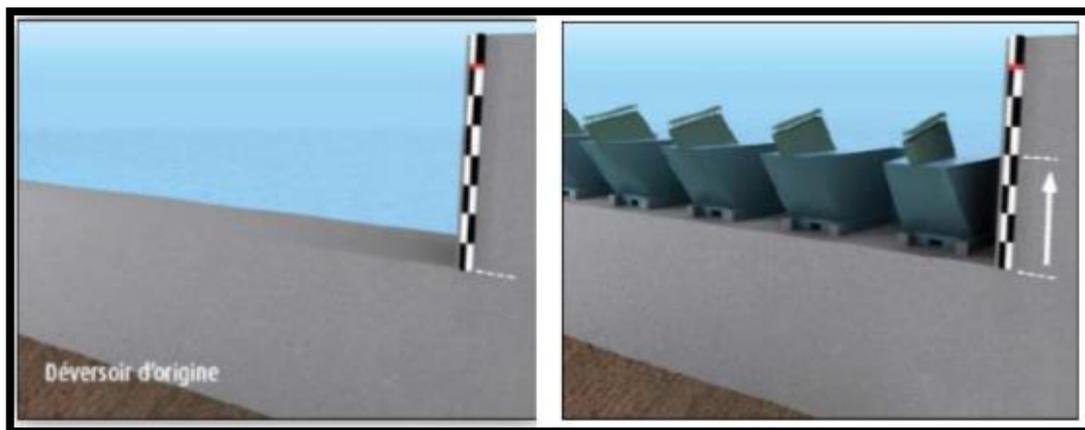


Figure (I.23) Augmentation de la capacité des barrages (Hydroplus).

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

Vérification expérimentale de l'effet de la forme de l'arête amont des blocs fusibles sur L'écoulement.

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.3.7.2 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).

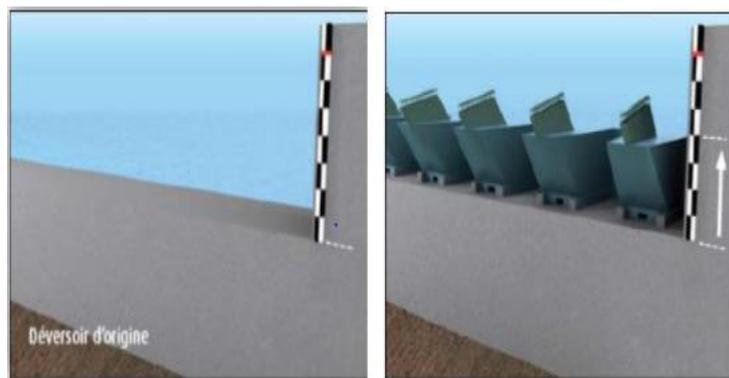


Figure (I.24) Amélioration de la sécurité des évacuateurs de crues à seuil libre (Hydroplus).

I.3.7.3 Moyen de sécurisé 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.3.7.4 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.3.8 Principe de fonctionnement des hausses fusibles

Le principe des hausses fusibles consiste à 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. D'après le niveau d'eau de la retenue, les éléments des hausses fonctionnent comme un barrage, un déversoir, ou un fusible (Royet et Degoutte, 1992)

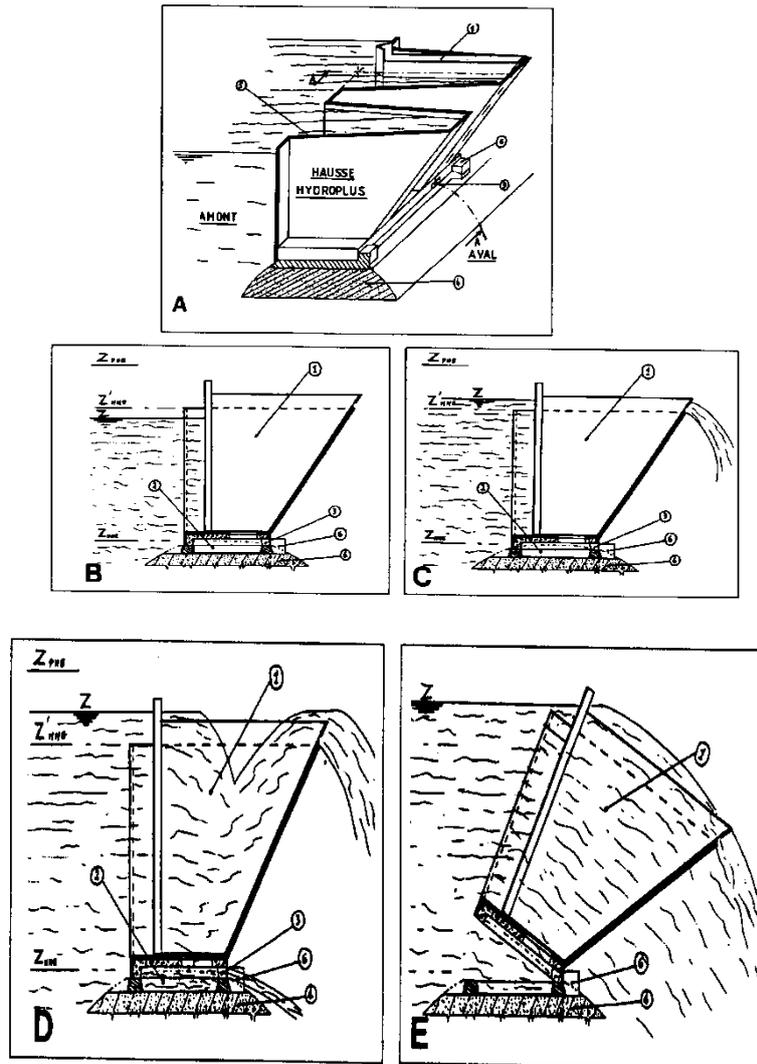


Figure (I.25) Principe de fonctionnement des hausses fusibles

Tel que :

- A. Vue perspective d'une hausse deux ondes avant déversement.
- B. Coupe AA avant déversement.
- C. Crue modérée avec déversement sur le labyrinthe.
- D. Crue importante avec remplissage du puits et de la chambre.
- E. Mise en pression et basculement de la hausse.

Vérification expérimentale de l'effet de la forme de l'arête amont des blocs fusibles sur l'écoulement.

CHAPITRE I Etat des connaissances

1. Puits ,2 Chambre, 3 Purge, 4 Seuil dérasé, 5 Labyrinthe, 6 Butée.

a/ Les hausses fonctionnent comme un barrage lorsque le niveau d'eau est inférieur ou égal au niveau du seuil des hausses. 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 au pied aval de la hausse. (Royet et Degoutte, 1992).

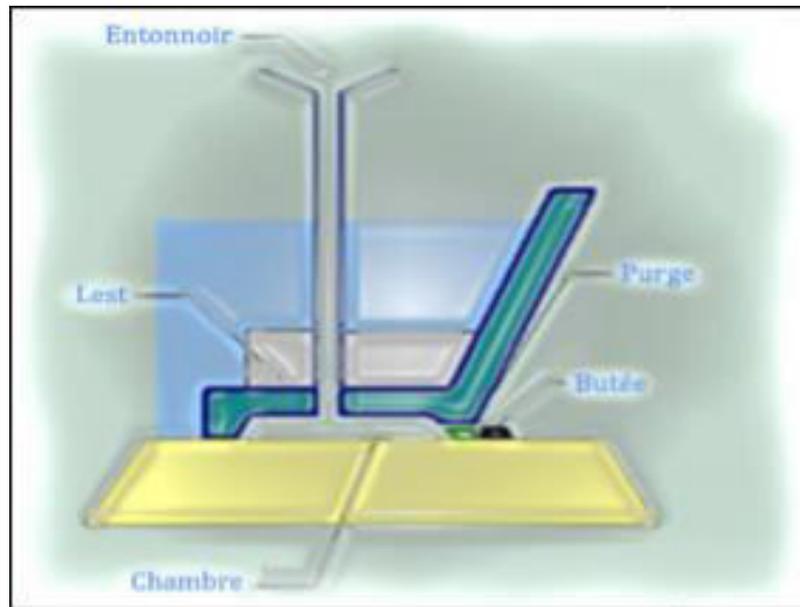


Figure (I.26) Hausse fusible avant déversement sur la crête.

b/ les hausses fonctionnent comme un déversoir en labyrinthe lorsque le niveau de l'eau s'élève au-dessus de la cote du seuil des hausses, jusqu'à une certaine épaisseur de lame d'eau. (Royet et Degoutte, 1992).

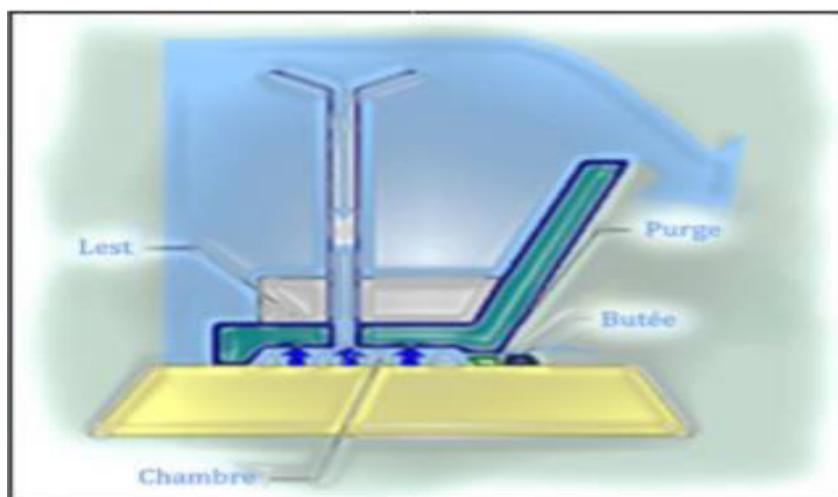


Figure (I.27) Hausse fusible avec déversement sur la crête pour une crue modérée

c/ En cas de forte crue, au-delà d'une fréquence choisie, le niveau d'eau atteint la cote d'entrée du puits par lequel l'eau pénètre dans une chambre à la base de l'élément. La sous-pression ainsi introduite sous l'élément modifie les conditions de stabilité et provoque son basculement, libérant ainsi une brèche dans laquelle le niveau du seuil libre redevient celui du seuil initial dérasé. Lorsque le seuil est équipé de plusieurs hausses, les cotes d'entrée des puits sont décalées de façon à ce que les éléments puissent basculer les uns après les autres au fur et à mesure de la montée du plan d'eau. De cette manière, l'augmentation du débit sur le déversoir, qui est en fonction du niveau de réservoir, peut être précisément contrôlée.

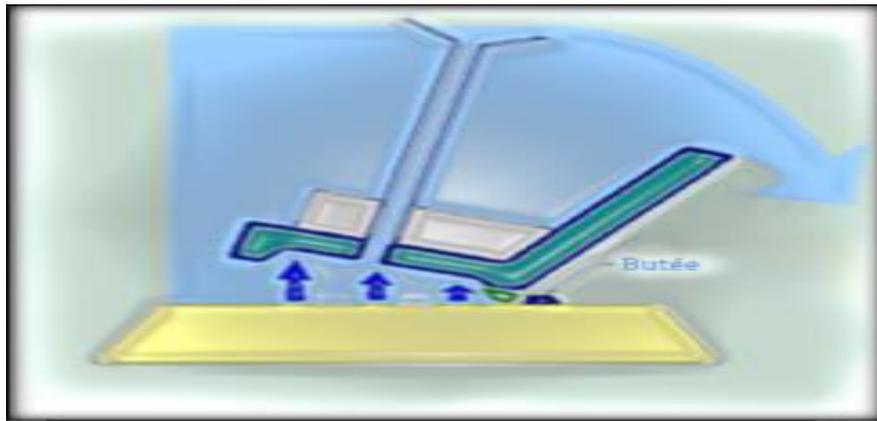


Figure (I.28) Hausse fusible avec mise en pression de la chambre et basculement

Afin que les hausses ne se basculent pas à la fois, l'ouverture du puits d'alimentation varie de quelques centimètres d'une manière à renverser successivement, dans ce cas la hausse fonctionne comme un fusible. Quand il y a un ou plusieurs hausses basculent, le niveau d'eau s'abaisse dans la retenue jusqu'à ce qu'il atteigne le niveau initial à la fin de la crue, alors les éléments qui se perdu doit être remplacer pour remplir la retenue. Si l'accès au seuil est aisé, le remplacement des éléments basculés ne pose pas de problèmes particuliers, compte tenu de la standardisation des hausses (Royet et Degoutte, 1992).

I.3.9 Caractéristiques de débit des hausses fusibles

Les études réalisées sur modèles réduits au niveau du Laboratoire National d'Hydraulique (LNH) à Chatou (France) et au laboratoire Tennessee Valley Authority (TVA) à Norris (USA) pour définir les caractéristiques de débit de la hausse fusible.

Le Laboratoire (LNH) a réalisé des études sur toutes les configurations des hausses, tandis que seulement la largeur et la configuration à basse charge ont été évaluées par le (TVA). Les différences des résultats des deux laboratoires ont été de 4%. Les caractéristiques de débit

CHAPITRE I Etat des connaissances

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

$$Q = \frac{2}{3} C_d L_c \sqrt{2gh}^{3/2} \quad (\text{I.5})$$

Où

Q : le débit qui transite sur la hausse;

g : l'accélération de l'apesanteur ;

L_c : la longueur de la crête de la hausse fusible ;

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

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

La figure (I.36) montre que le coefficient de débit diminue quand la charge sur la hausse fusible augmente. L'équation convenable pour le coefficient de débit suit une loi de puissance donnée par :

$$C_d = C_1 \left(\frac{h}{H} - C_2 \right)^{C_3} \quad (\text{I-06})$$

Où :

H : la hauteur de la hausse fusible et C_1 , C_2 et C_3 sont des constantes déterminées expérimentalement pour les valeurs de h/H plus grande que 0.1. Le coefficient C_2 est un terme de la tension superficielle qui devient négligeable quand la profondeur de l'écoulement sur la hausse augmente. Les coefficients obtenus des essais expérimentaux sont montrés dans la figure (2-36) (Falvey et al, 1995).

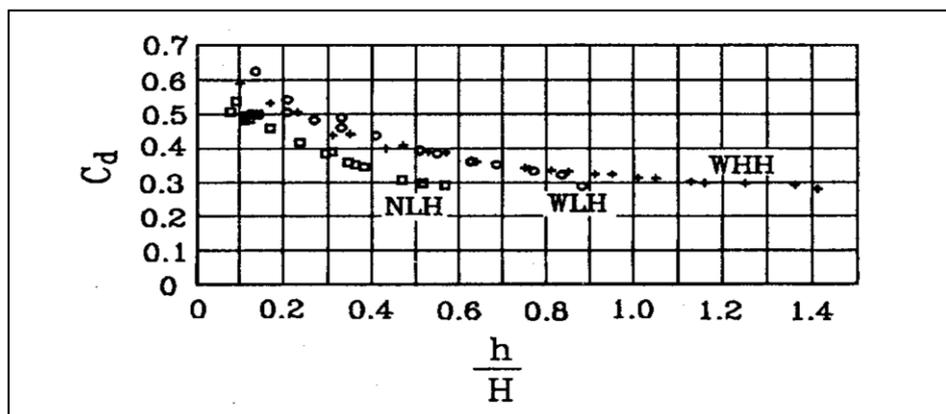


Figure (I.29) Coefficient de débit d'une hausse fusible (Falvey et al, 1995).

Vérification expérimentale de l'effet de la forme de l'arête amont des blocs fusibles sur l'écoulement.

Les hausses fusibles sont conçues pour fonctionner avec une nappe aériée. Les effets de la submersion et de l'interaction de la nappe sur les coefficients de débit observés pour les déversoirs en labyrinthe ne sont pas significatifs pour le cas des 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 aériée pour les hauts niveaux d'eau aval.

I.3.10 Stabilité des hausses fusibles et leur analyse

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

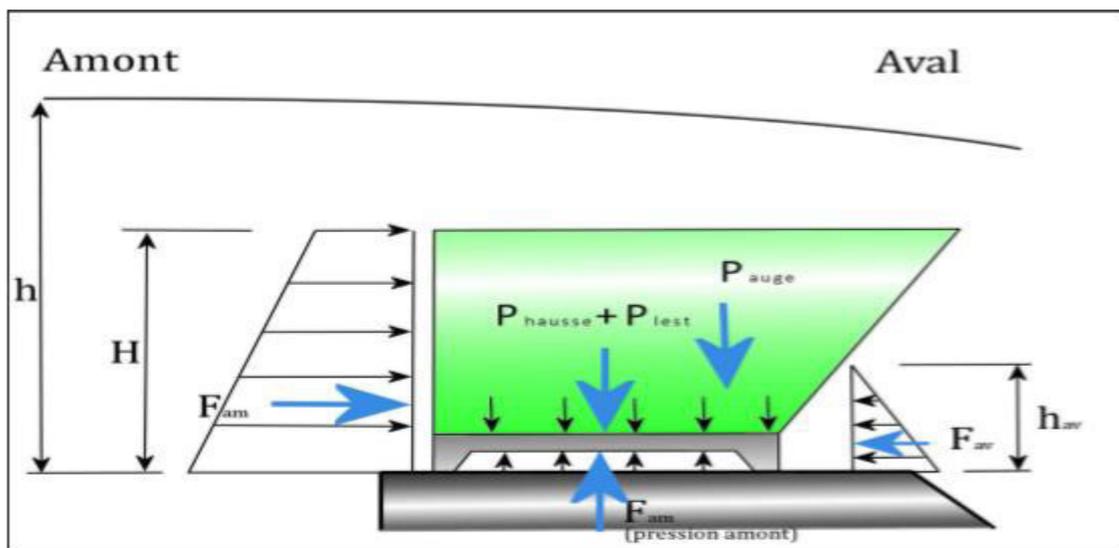


Figure (I. 30) les forces agissant sur une hausse.

Ces hausses sont des éléments auto-stables jusqu'à une cote d'eau déterminée, au-delà de cette cote, la hausse fonctionne comme un fusible, c'est-à-dire qu'elle bascule sous la poussée de l'eau. La hausse se pose simplement sur le seuil, s'appuie à l'aval sur les deux butées. Le système des forces auquel elle est soumise, peut être décomposé de la façon suivante et exprimé au moment par rapport aux butées aval. Les relations sur lesquelles repose l'analyse de stabilité sont récapitulées dans la figure (I.38).

a) Avant remplissage de la chambre

❖ Forces stabilisatrices :

- poids propre de la hausse;
- poids de l'eau dans l'alvéole amont;
- butée aval.

❖ Forces motrices :

- poussée hydrostatique sur la face verticale amont.

b) Après remplissage de la chambre

❖ Forces stabilisatrices :

- poids propre de la hausse;
- poids de l'eau dans l'alvéole amont;
- butée aval.

❖ Forces motrices :

- poussée hydrostatique sur la face verticale amont;
- sous-pression sous la base de la hausse.

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

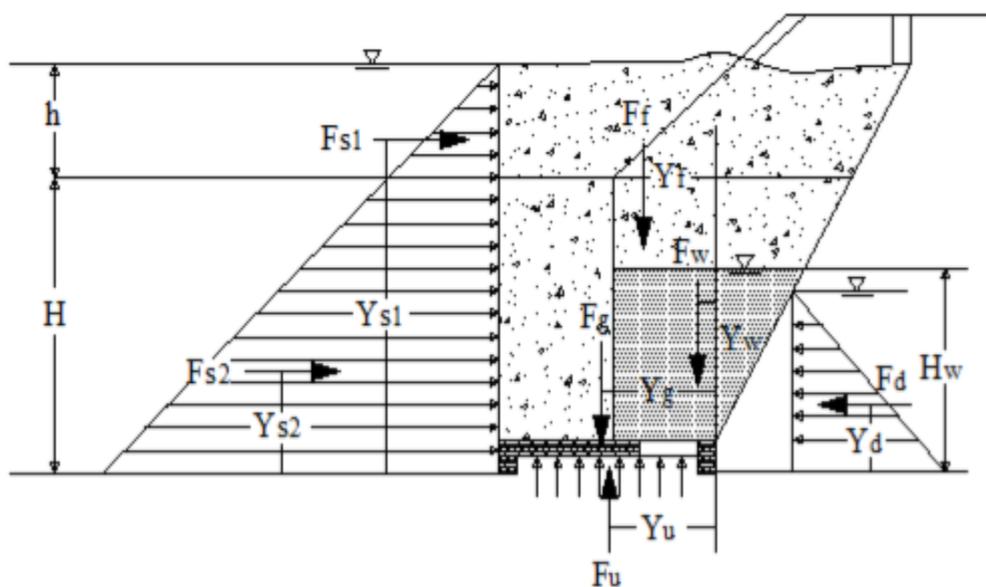


Figure (I. 31) Forces agissant sur une hausse fusible (Falvey et al, 1995).

I.3.11 Stabilité au renversement

Le renversement de la hausse est déterminé en additionnant les moments par rapport à l'extrémité aval de la hausse comme indiqué dans la figure (I.38). Les moments de *Vérification expérimentale de l'effet de la forme de l'arête amont des blocs fusibles sur L'écoulement.*

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

Le moment amont se compose de moment dû à la force hydrostatique sur le puits plus celui dû à 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

$$M_s = M_{s1} + M_{s2} \quad (I.7)$$

$$\text{Où : } M_{s1} = F_{s1} Y_{s1} = \frac{\rho_w g h}{2} (h W_w) \left(H + \frac{h}{3} \right) = \frac{\rho_w g W_w h^2 (3H + h)}{6} \quad (I.8)$$

$$\begin{aligned} \text{Et : } M_{s2} &= F_{s2} Y_{s2} = (\rho_w g h)(H W_w) \frac{H}{2} + \frac{\rho_w g H}{2} (H W_w) \frac{H}{3} \\ &= \frac{\rho_w g W H^2 (H + 3h)}{6} \end{aligned} \quad (I.9)$$

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

$$M_u = \rho_w g A_c H_w Y_u \quad (I.10)$$

A_c : superficie de la chambre de fond;

H_w : profondeur d'eau dans le puits;

Y_u : bras de moment au centre de pression;

ρ_w : Densité d'eau. A cause de la grande superficie dans la chambre du fond, le moment M_u augmente rapidement avec l'augmentation de la hauteur d'eau sur la hausse. L'effet sur le moment est montré dans la figure (I.39) par la ligne continue presque verticale entre les hauteurs d'eau superficielles H_c et H_n .

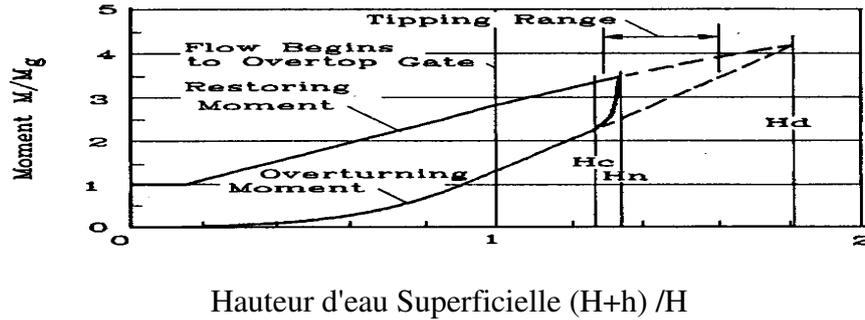


Figure (I.32) Moments dans la hausse fusible Model WLH (Falvey et al, 1995).

Quand la hausse commence à se renverser, le godet (alvéole) se déplace loin des joints placés dans le seuil du déversoir. Cela permet à la charge d'eau d'agir sur la chambre. Simultanément, la pression le long des côtés de la chambre baisse à une valeur équivalente au niveau d'eau sur le côté aval de la hausse. Les essais expérimentaux ont montré que la profondeur d'eau entre les hausses est approximativement égale au tiers de la profondeur d'eau amont (Falvey et al, 1995). Le moment de la hausse est donné par :

$$M_g = F_g Y_g = \rho_s V_s Y_s + \rho_c V_c Y_c \tag{I.11}$$

Où

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

V_c : volume du matériau dans la base;

V_s : volume du matériau dans le godet;

Y_c : bras de levier du matériau dans la base;

Y_g : bras de levier de la base et du godet;

Y_s : bras de levier du matériau dans le godet;

ρ_c : Densité du matériau dans la base;

ρ_s : Densité du matériau dans le godet.

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

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

$$M_w = \rho_w g (V_b Y_b + W_w H_w L_w Y_w) \tag{I.12}$$

H_w : = profondeur d'eau dans le puits ;

L_w : longueur du puits;

V_b : volume d'eau dans le godet;

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

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

Le moment aval est dû au niveau d'eau sur 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 :

$$M_d \approx \frac{\rho g [(H+h)/3]}{2} [(H+h)/3] W_w \frac{(H+h)/3}{3}$$

$$\approx \frac{\rho g (H+h)^3 W_w}{182} \quad (\text{I.13})$$

La somme des moments de restauration et de renversement pour le modèle WLH la hausse fusible est montrée dans la figure (I.39). Les moments sont considérés sans dimensions en les divisant par le moment de la hausse. La figure (I.39) montre les moments sur une hausse fusible quand le niveau de réservoir augmente à partir du seuil de la hausse fusible. Le déversement de la hausse fusible commence pour une profondeur de réservoir de $(h+H)/H$ égal à 1. A une profondeur correspondant à H_C , l'eau commence à couler dans le puits. Le renversement ne se produit pas à cette profondeur parce que l'eau sort aussi des trous du drain qui sont connectés à la chambre dans la base. Lorsque la profondeur augmente, le moment de renversement augmente avant que la profondeur H_C ne soit atteinte. A cette profondeur, les hausses se renversent. L'augmentation rapide du moment de renversement de H_C à H_n produit une relation précise entre le point de renversement et la hauteur de la surface d'eau. Si le puits d'admission est colmaté pour quelque raison, le moment de renversement continu à augmenter à un taux plus lent avant que la profondeur H_d ne soit atteinte. A la profondeur H_d . La hausse se renverse même sans le moment de la chambre (Falvey et al, 1995).

I.3.12 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-15). L'ampleur de la force exercée

sur la butée peut être estimée en calculant la force hydrostatique amont appliquée sur la hausse. Comme approximation, la force qui provoque le glissement est donnée par :

$$\begin{aligned} F_s &= F_{s1} + F_{s2} = \frac{\rho_w g h^2 W_w}{2} + \frac{\rho_w g (H + 2h) HW}{2} \\ &= \frac{\rho_w g H^2}{2} \left(\frac{h^2}{H^2} W_w + W + \frac{2h}{H} W \right) \end{aligned} \quad (\text{I.14})$$

Où

W : largeur de la hausse fusible,

W_w : largeur du puits,

ρ_w : Densité de l'eau.

Les forces F_{s1} et F_{s2} sont montrées dans la figure (I-38). Cette équation est conservatrice dans laquelle on ignore des forces de frottement entre la hausse et le bord de déversoir.

I.3.13 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

Vérification expérimentale de l'effet de la forme de l'arête amont des blocs fusibles sur L'écoulement.

révision de la crue du projet. Les résultats de l'étude hydrologique selon la révision mettent en évidence deux cas distincts : Le premier cas où la révision d'étude hydrologique ne porte pas un changement du débit de crue de projet, dans ce cas l'emplacement des hausses fusibles a pour but d'augmenter le volume de stockage de la retenue grâce à la récupération d'une tranche importante d'eau perdue de l'ordre de 75% de la hauteur des plus hautes eaux. Cela résulte du fait que le niveau des plus hautes eaux pour la crue de projet n'est pas modifié par rapport à la situation antérieure, ce qui ne change pas les conditions de sécurité de l'ouvrage. Le deuxième cas où la révision de l'étude hydrologique porte une modification du débit de la crue de projet, et afin de ne pas modifier le niveau des plus hautes eaux, l'emplacement des hausses dans le but d'augmenter la capacité d'évacuation après un dérasement du seuil existant, représente une solution convenable. La tranche disponible pour l'augmentation de capacité de la retenue par le système des hausses est donc légèrement diminuée par rapport à la situation précédente (Royet et Degoutte, 1992).

b/ Dimensionnement mécanique :

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

I.3.14 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. Au Canada par exemple, des poussées de 150kN par mètre linéaire sont considérées pour dimensionner des structures rigides et de 70 kN par mètre linéaire pour des structures flexibles (telles que vannes). 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.40**). La rotation de la hausse est insuffisante pour générer son basculement irréversible. Ces essais ont permis de caler une approche théorique basée sur l'étude de la compression d'une poutre semi-infinie.

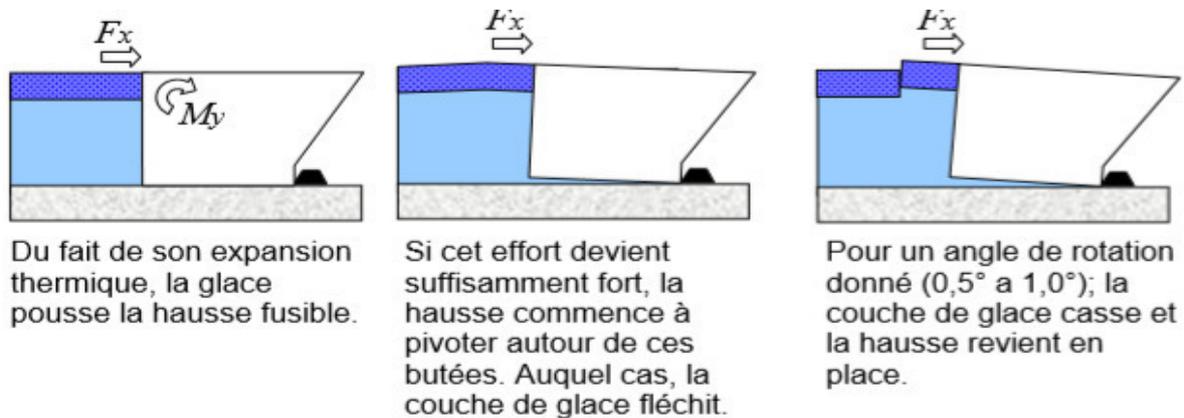


Figure (I.33) Effet de glace sur la hausse fusible (Hydropower & Dams de 1996).

Des essais similaires ont été menés afin d'apprécier les conditions de stabilité de la hausse fusible du fait de la variation du niveau d'un réservoir entièrement gelé (la couche de glace adhérant à la hausse fusible). Dans ce cas également, la couche de glace casse à l'amont de la hausse fusible sous l'effet de la contrainte induite par l'amorce de rotation.

I.3.14 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 par Pierre Londe sur la base d'une approche pseudo statique. La stabilité de la hausse fusible est appréciée en comparant la résultante (M_{OVS}) du moment des forces ayant un effet déstabilisant en prenant en compte les charges sismiques à la résultante du moment (M_{ST}) des forces ayant un effet stabilisant ("Design of Small Dams" P 322 à 326 de la troisième édition).

I.4 Les Blocs fusibles

I.4.1 Définition des blocs fusibles

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 atteigne un certain niveau pour lequel ils basculent. Les blocs posés sur un même seuil

Vérification expérimentale de l'effet de la forme de l'arête amont des blocs fusibles sur l'écoulement.

ont la même hauteur mais ils peuvent avoir des épaisseurs et donc des poids différents, de sorte qu'ils basculent pour des hauteurs d'eau différentes. Ce niveau peut être prévu avec précision si la valeur de la sous-pression qui s'exerce sous le bloc est bien connue. Une façon simple de résoudre ce problème est de s'assurer que la sous-pression soit totale, soit inexistante. Ceci peut se faire par la création, sous chaque bloc, d'un vide qui soit fermé par un joint d'étanchéité à l'aval et communicant avec l'amont (sous-pression totale), ou soit fermé par un joint d'étanchéité à l'amont et communicant avec l'aval (sous-pression inexistante) (Lempérière et al. 2006).



Figure (I.34) Vue en perspective d'un déversoir Blocs fusibles (Hydroplus).

I.4.2 Les deux types des blocs fusibles

Les blocs peuvent être prévus pour basculer avant d'être submergés. Ils sont alors relativement hauts par rapport à leur longueur (hauteur H jusqu'à deux fois la longueur L). 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).

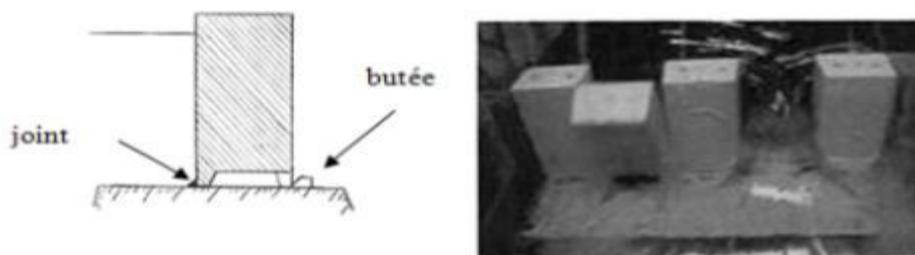


Figure (I.35) Blocs sans sous-pression et basculement avant déversement.

➤ Les blocs fusibles avec sous-pression :

Pour ce type des 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, c'est-à-dire proche de l'axe de rotation du bloc quand il bascule. Il convient simplement de veiller à une aération suffisante de la nappe, ce qui est facile à réaliser (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.

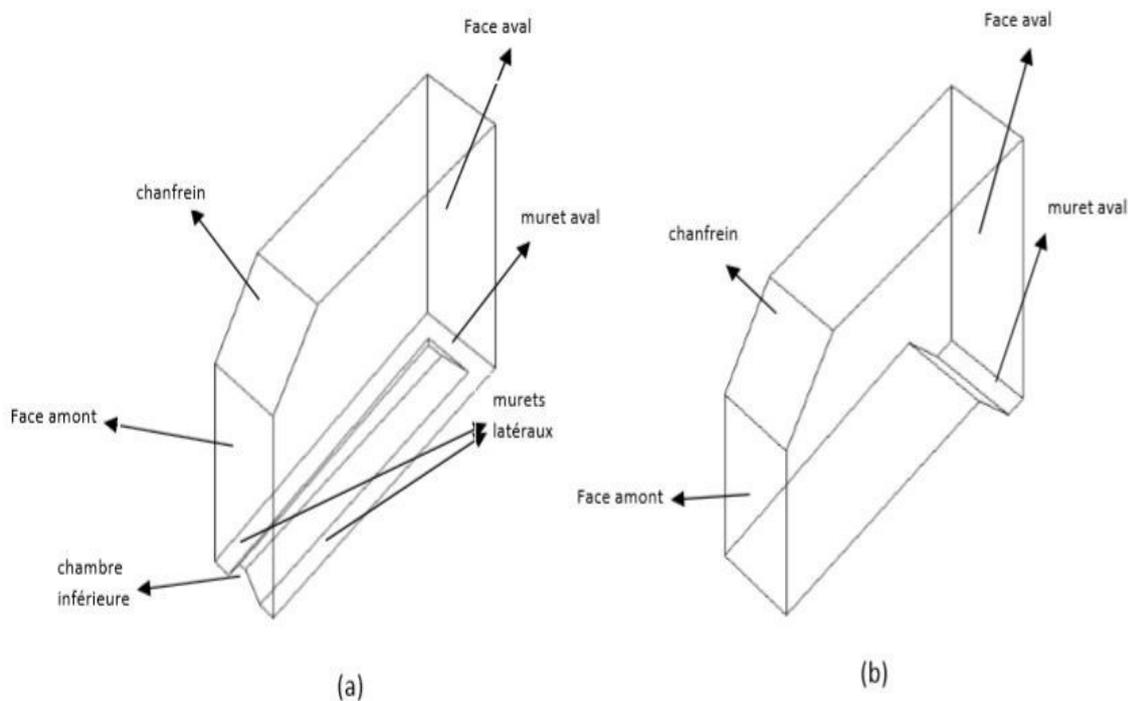


Figure (L.36) Vue en perspective d'un des deux modèles des blocs fusibles avec sous-pression.

Vérification expérimentale de l'effet de la forme de l'arête amont des blocs fusibles sur l'écoulement.

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.

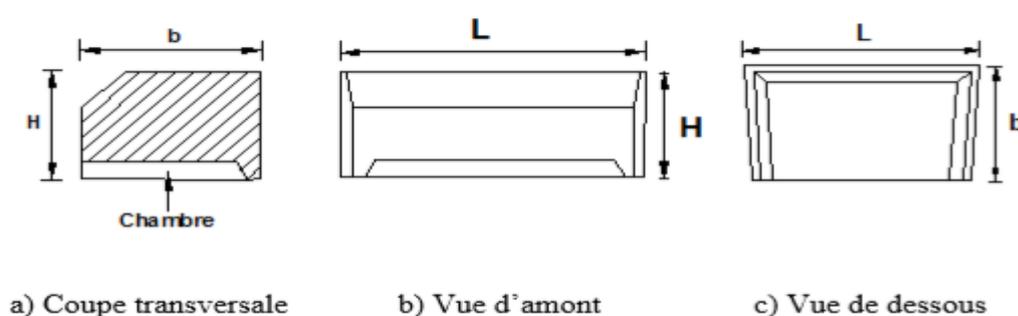


Figure (I.37) Géométrie d'un bloc fusible avec sous-pression

Les blocs peuvent être placés directement côte à côte, mais les nombreux essais sur modèles réalisés dans différents pays (France, Algérie, Chine, Vietnam) et coordonnés par Hydrocoop, ont montré l'intérêt de placer un mur vertical mince entre deux blocs adjacents lorsque ceux-ci ne sont pas d'une longueur très importante. Ces murs, fixés dans le seuil, limitent l'influence de la déformation de la nappe due au départ d'un bloc, sur les blocs adjacents et augmentent ainsi la précision du niveau de l'eau assurant le renversement des blocs restants. Les essais ont également montré que ces murs n'avaient pas besoin d'avoir de grandes dimensions pour être efficaces (voir figure I.45).

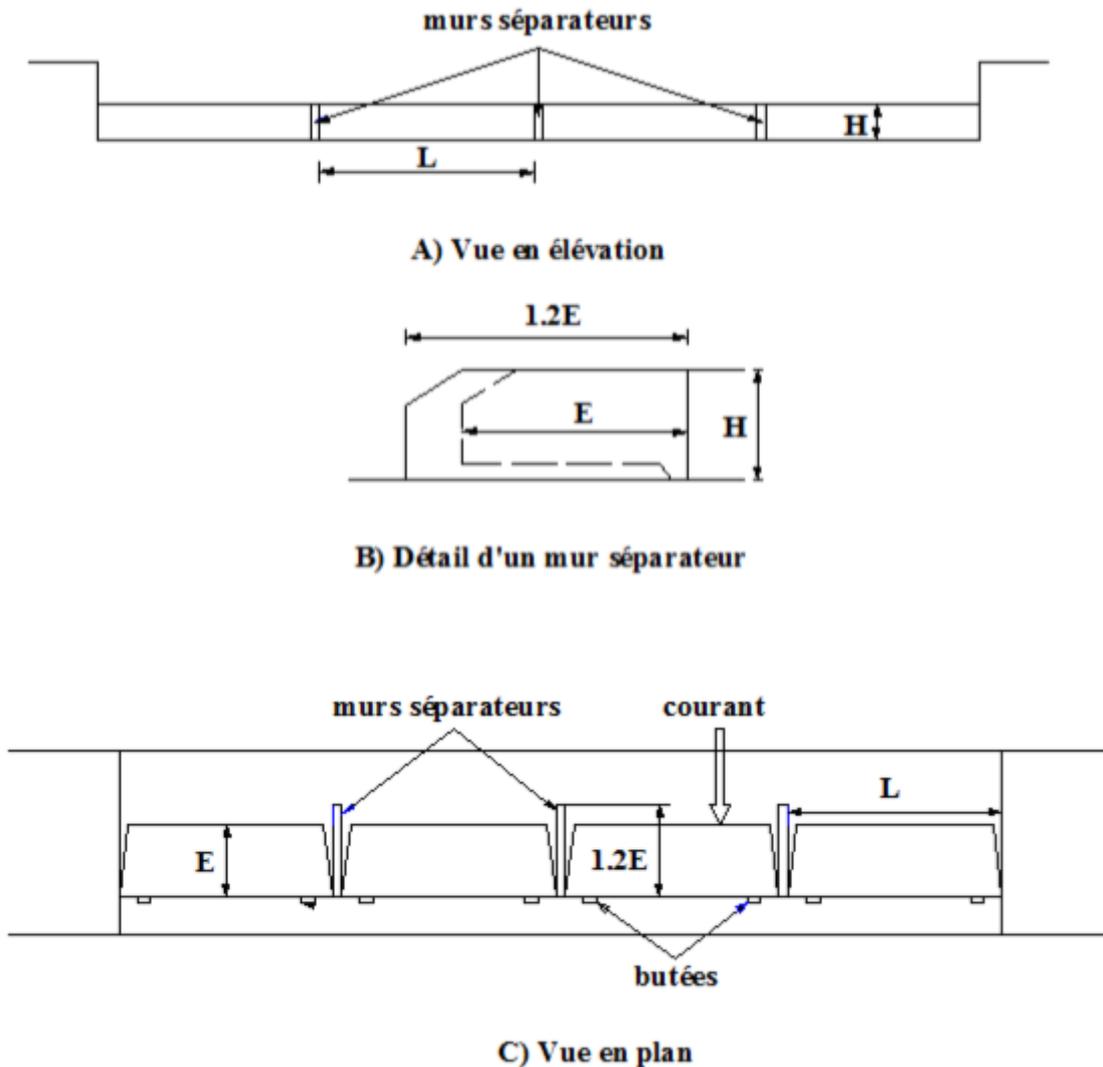


Figure (I.38) Disposition générale et murs séparateurs.

I.4.3 Dimensionnement des blocs

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.46) 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

Vérification expérimentale de l'effet de la forme de l'arête amont des blocs fusibles sur L'écoulement.

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 %.

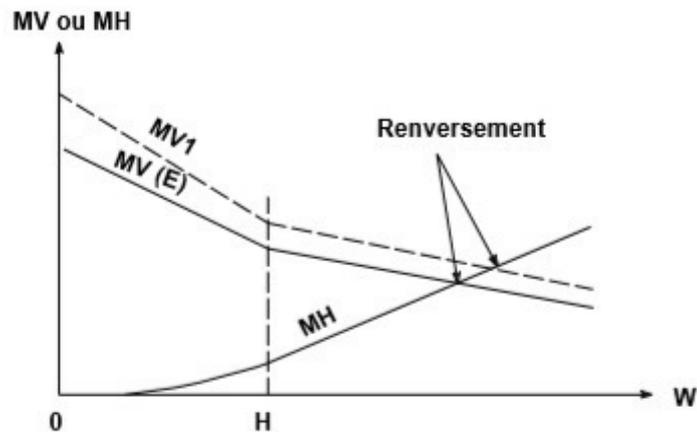


Figure (I.39) Diagramme de stabilité.

Les essais sur modèles ont montré la fiabilité du rapport entre l'épaisseur E d'un bloc et l'épaisseur de lame d'eau pour laquelle il bascule. Pour un avant-projet très préliminaire, on peut utiliser la formule approchée suivante pour un bloc ayant la forme générale décrite aux paragraphes précédents et une densité moyenne :

$$h = E - 0,4 H \quad (\text{I.15})$$

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 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 $1 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figure (I.40) Bloc fusible placé sur un seuil après un araselement.

I.4.4 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.48). Si les extrémités latérales restent ouvertes, quelques supports sont nécessaires pour assurer la stabilité du bloc.

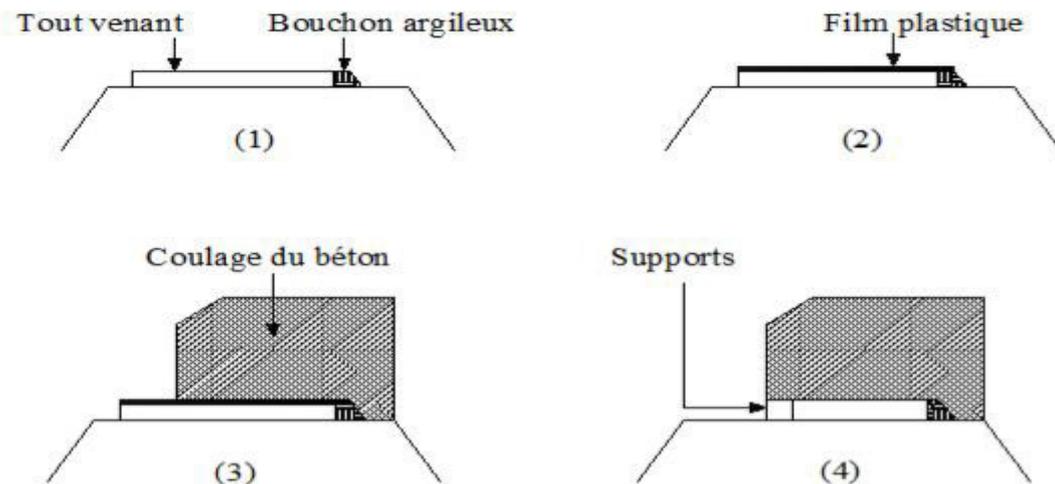


Figure (I.41) Différentes phases de construction du bloc sur un seuil.

I.4.5 La nouvelle méthode développée 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.

I.4.6 Développement théorique

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 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.

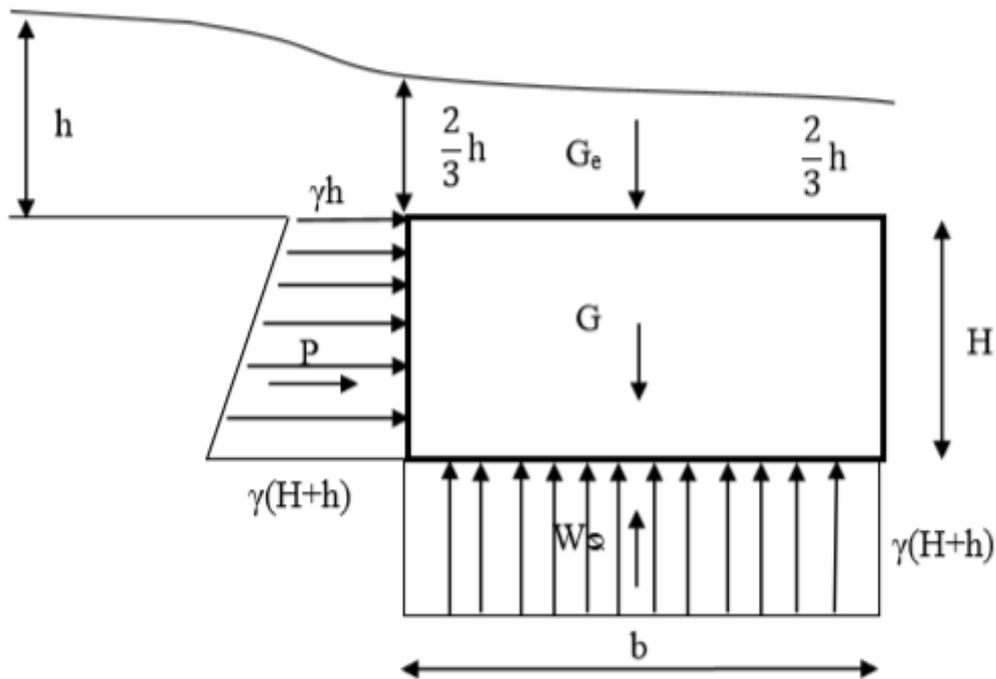


Figure (I.42) Schéma de calcul de stabilité du bloc fusible.

La relation aboutie 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.

$$b = H \sqrt{\frac{(H + 3h)}{3 \frac{\gamma b}{\gamma} H - 3H - h}} \quad (\text{I.16})$$

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.4.7 Résultats expérimentaux

I.4.8 Description d'écoulement

L'écoulement sur le déversoir en blocs fusibles est similaire à celui d'un seuil épais, ceci est remarqué avant le basculement des blocs. Cependant quand l'un des blocs bascule, au début l'écoulement ressemble à celui à travers une brèche, ensuite quand la charge augmente, l'écoulement redevient semblable à celui d'un seuil épais.

I.4.9 Vérification du coefficient de débit d'un bloc fusible

Pour vérifier le mode d'écoulement sur les blocs fusibles installé sur un déversoir, plusieurs séries d'essais ont été réalisées après le blocage des blocs pour déterminer le couple des valeurs du débit en fonction de la charge d'eau sur les blocs. Les résultats obtenus représentés sur un graphe fig. (I.43)

La représentation graphique des résultats expérimentaux obtenus sous forme de débit en fonction de la hauteur d'eau sur les blocs montre que le débit qui transite par les blocs peut être considéré comme celui qui passe sur un déversoir à seuil épais. La différence entre les valeurs théoriques et expérimentales paraît être logique étant donné que dans une expérimentation d'un écoulement sur des blocs il y aura souvent un faible débit qui passe entre les murs séparateurs et les blocs. Cette différence qui atteint environ 7% pour les grandes valeurs de la charge qui dépasse 1,5 fois la hauteur des blocs. Il est à signaler que la charge de fonctionnement du système fusible ne dépasse en aucun cas la valeur de la hauteur des blocs.

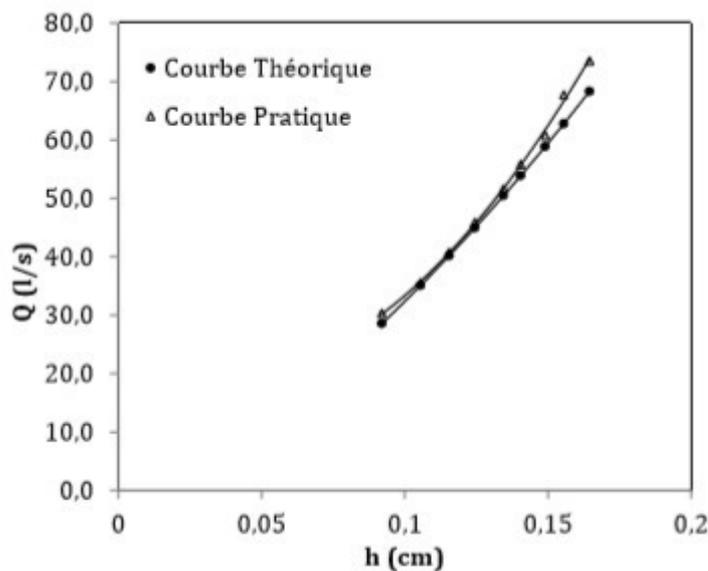


Figure (I.43) le coefficient de débit en fonction de la hauteur d'eau sur les blocs

Les résultats montrent aussi que le coefficient de débit varie entre 0,377 et 0,402, ce qui correspond à l'intervalle des valeurs de coefficient de débit défini par Bazin pour un déversoir à seuil épais (0,37 ÷ 0,39). (SEKKOUR. I)

I.4.10 La relation entre la hauteur de basculement et largeur du bloc

Des essais ont été effectués sur une série de blocs fusibles de largeur différente. Pour la vérification de la relation qui existe entre la largeur du bloc et la hauteur d'eau sur le bloc

qui provoque son basculement. Les valeurs obtenues de la charge d'eau sur le bloc pour plusieurs essais sont présentées sur le graphe fig. (I.44).

La représentation graphique des résultats obtenus sur une série de blocs montre que la tendance de la courbe se rapproche d'une droite (I.44). Cependant, ceci ne peut être vrai que si le poids volumique et le même pour tous les blocs. Le graphe suivant 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)

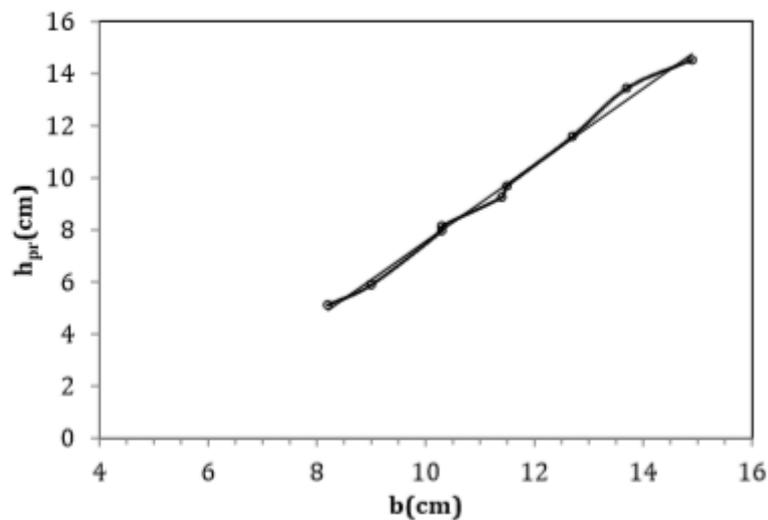


Figure (I.44) Courbe pratique de la variation de la charge de basculement en fonction de la largeur de bloc.

Le graphique de la figure (I.44), 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. La représentation graphique (I.45) de la relation théorique obtenue dans l'étude théorique (I.16) 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.

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

$$H = \frac{3H \left(\frac{\gamma b}{\gamma} \right) b^2 - H^3}{b^2 + 3H^2} \quad (I.17)$$

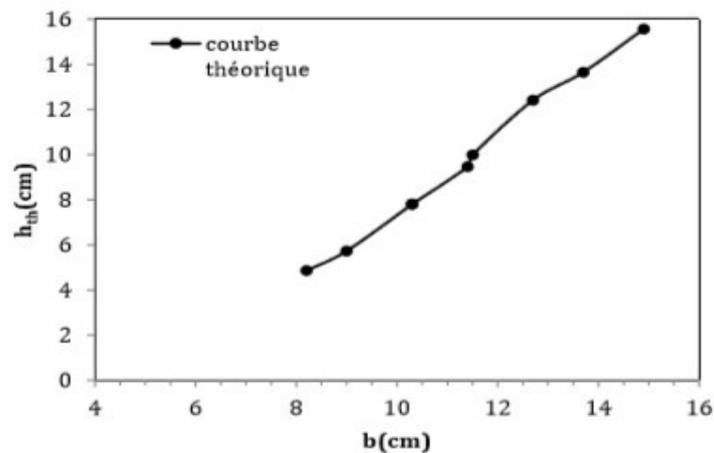


Figure (I.45) Courbe théorique de la variation de la charge de basculement en fonction de la largeur de bloc.

Cependant, la représentation de cette courbe théorique avec celle où le poids volumique est le même (figure I.46), montre que la hauteur de basculement des blocs varie d'une façon linéaire à condition que le poids volumique est le même pour tous les blocs. (SEKKOUR. I)

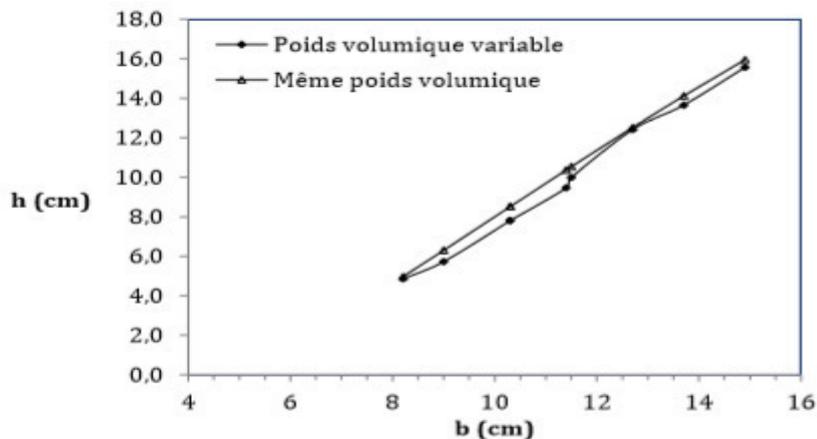


Figure (I.46) Variation de la hauteur de basculement en fonction de la variation du poids volumique

Pour vérifier la validité de la relation (I.16), il est utile de procéder à une confrontation des résultats théoriques avec ceux obtenus expérimentalement. A cet effet, le graphique (I.47) représente une comparaison entre les deux courbes théorique et expérimentale.

La lecture de ce graphique (I.47) qui représente les hauteurs de basculement pratiques h_{pr} et théoriques h_{th} en fonction de la largeur des blocs, 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 Vérification expérimentale de l'effet de la forme de l'arête amont des blocs fusibles sur L'écoulement.

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.

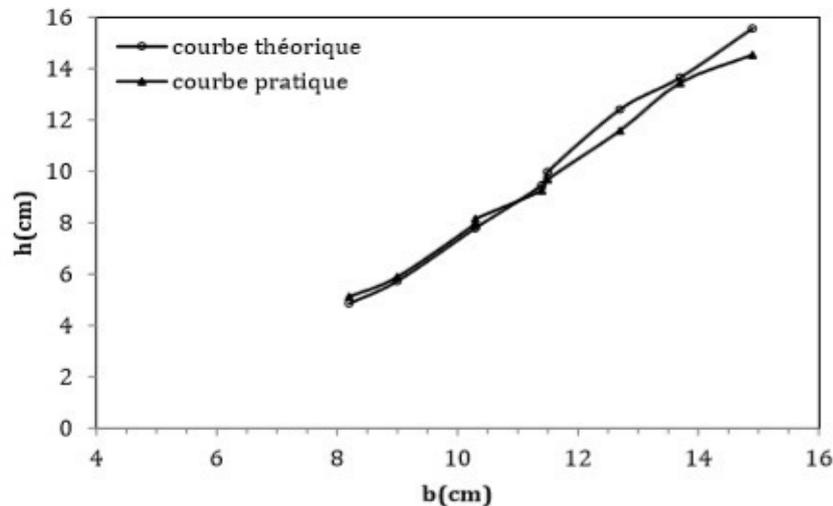


Figure (I.47) Comparaison entre la charge théorique et pratique.

Cependant, pour les valeurs de la hauteur de basculement inférieure à la hauteur des blocs la différence n'est que d'environ 4%. Ainsi, on peut conclure que la relation théorique donne une bonne estimation de la hauteur de basculement et elle peut être utilisée pour le pré-dimensionnement des blocs fusibles. 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.16) avec la pratique.

I.4.11 effet de la disposition des blocs sur le seuil selon leur largeur

Trois séries de trois blocs de largeur différente ont été testés avec deux combinaisons de disposition des blocs. Ces combinaisons ont concerné les deux blocs disposés aux deux extrémités du déversoir, sans le changement de l'emplacement du bloc central (fig. I.48).

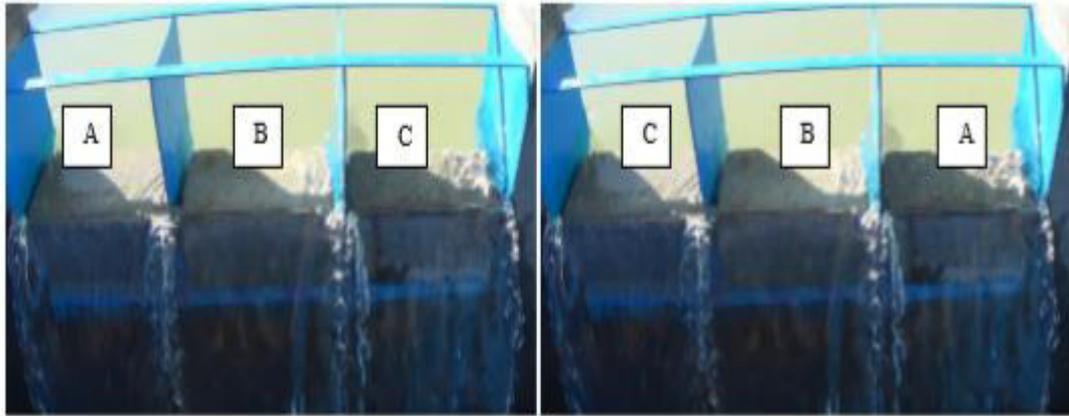


Figure (I.48) Schéma d'alignement d'une série de trois blocs sur le seuil.

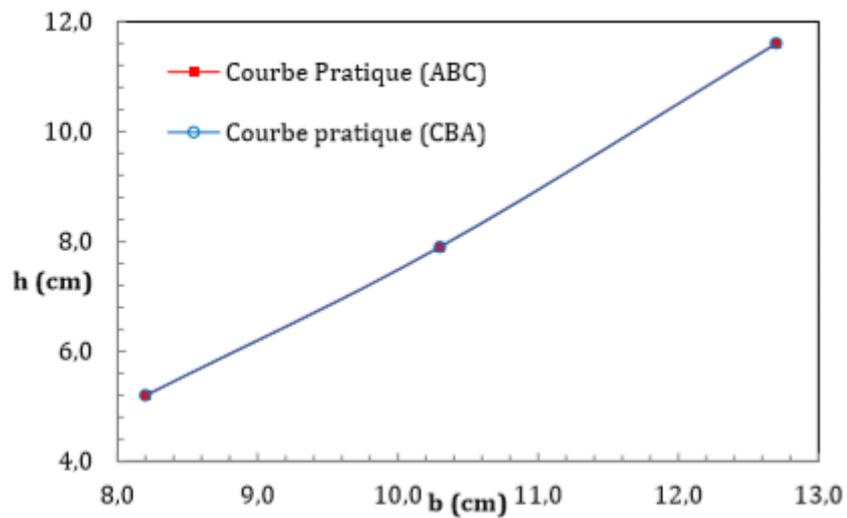


Figure (I.49) Disposition direct et inverse des blocs de la série (01).

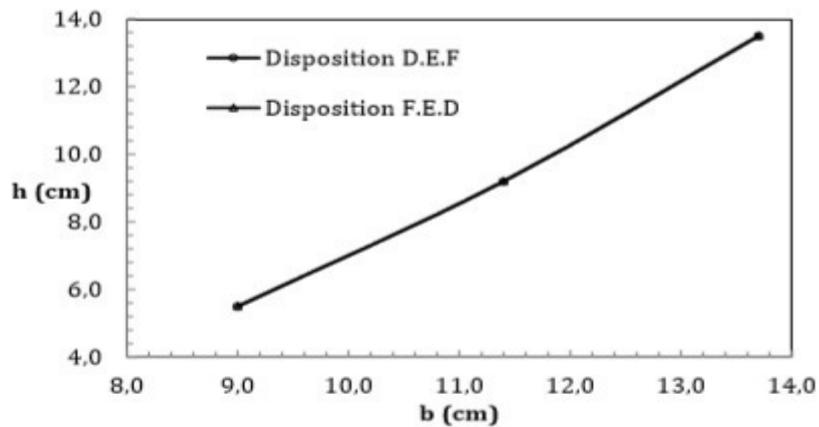


Figure (I.50) Disposition direct et inverse des blocs de la série (02).

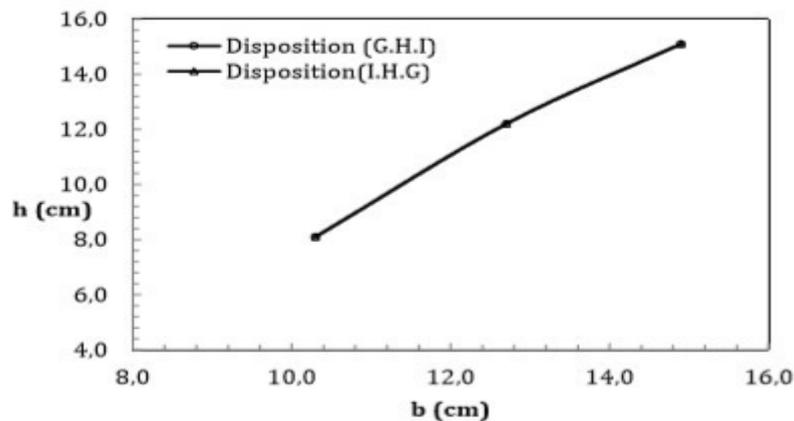


Figure (I.51) Disposition direct et inverse des blocs de la série (03).

Les résultats obtenus sur les trois séries et avec les deux combinaisons évoquées précédemment ont montré que la disposition des blocs n'a pas d'effet sur la hauteur de basculement. En d'autres termes, le basculement du bloc ne dépend pas de sa position sur le seuil du déversoir, par contre, il est directement lié aux caractéristiques géométriques du bloc et à son poids volumique. (SEKKOUR. I)

I.5 CONCLUSION

L'étude bibliographique a eu pour objectif d'identifier les différents travaux de recherche effectués dans le domaine des déversoirs auto stables, concernant les hausses et les blocs fusibles, c'est un état de connaissance sur le système auto stable, la définition, la géométrie, le principe de fonctionnement et le but d'utilisation de ce système.

Les dispositifs fusibles sont souvent considérés comme un déversoir supplémentaire placé sur le déversoir d'origine de type rectiligne pour l'élévation du niveau d'eau dans le réservoir. L'origine de fonctionnement est que le système reste stable pendant une certaine hauteur d'eau, avant de basculer. L'efficacité de ce système est la précision de calcul de la cote de renversement pour chaque élément.

Les hausses fusibles ont été inventées par François Lempérière en 1989, ce sont des éléments indépendants, sous forme labyrinthe ou droite, placé sur le seuil de déversoirs existants, dans le but de faire augmenter la capacité de stockage et/ou d'améliorer l'évacuation du déversoir. La bibliographie montre aussi que ce système est utilisé dans les nouveaux barrages afin de réduire le coût de la construction et de réduire la longueur du seuil du déversoir et la hauteur du barrage.

CHAPITRE I Etat des connaissances

Les blocs fusibles sont des masses en béton placés côte à côte sur le bord de déversoir, ils restent stables jusqu'à un certain niveau d'eau dans le réservoir puis ils commencent à basculer quand l'eau dépasse ce niveau.

Il existe deux types de blocs, le premier avec sous pression, le déversement s'amorce avant le basculement, le deuxième sans sous pression et son déversement avant le basculement. Selon la bibliographie, il est remarqué qu'il n'y a que peu de travaux qui sont intéressés au pré-dimensionnement de ce type de déversoir qui a un avenir prometteur. Ainsi, le laboratoire Aménagements Hydrauliques et Environnement de l'université de Biskra a pris en charge des études détaillées sur ce type de déversoir à cause de sa forme géométrique simple et le coût réduit de construction et de reconstruction des blocs basculés.

Des résultats obtenus par la combinaison de l'étude théorique et expérimentale est une première dans le domaine de dimensionnement des blocs fusibles surtout qu'on connaît qu'il n'y a pas de méthode de dimensionnement de ce type de déversoir.

Le présent travail est une contribution que d'autres travaux futurs doivent être entrepris pour améliorer cette méthode est aboutir à une méthode simple de dimensionnement des déversoirs en blocs fusibles.



**CHAPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE SUR
DES MODELES REDUITS DES
BLOCS FUSIBLES**



CHAPITRE II

Etude théorique pour le dimensionnement des blocs fusibles

(Arête amont chanfreinée et arrondie)

II.1 Introduction

Le système des blocs fusibles est un nouveau type des déversoirs auto stables, de ce fait il est encore en phase d'étude, ce dispositif peut devenir une alternative efficace et économique, en raison de la facilité de réalisation et le cout réduit des matériaux de construction.

Les blocs sont des éléments en béton ordinaire, placés sur un seuil de déversoir rectiligne à surface libre, ce déversoir peut être soit existant ou nouveau après un aménagement du seuil. La mise en place des blocs sur le seuil, augmente le niveau d'eau dans le réservoir.

L'objectif de ce travail est de vérifier l'effet de la forme de l'arête amont (chanfreinée et arrondie) sur l'écoulement au-dessus du bloc fusible et puis sur la hauteur de renversement de chaque bloc.

Pour atteindre cet objectif, le type du bloc choisi pour cette étude correspond au cas avec sous- pression qui permet le déversement avant le basculement.

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, en tenant compte de la variation de la forme de l'arête amont du bloc.

II.2 Description des blocs fusibles

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

Ces éléments 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. Les blocs fusibles sont posés le long de la crête du déversoir

Vérification expérimentale de l'effet de la forme de l'arête amont des blocs fusibles sur L'écoulement.

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 éviter leur glissement.

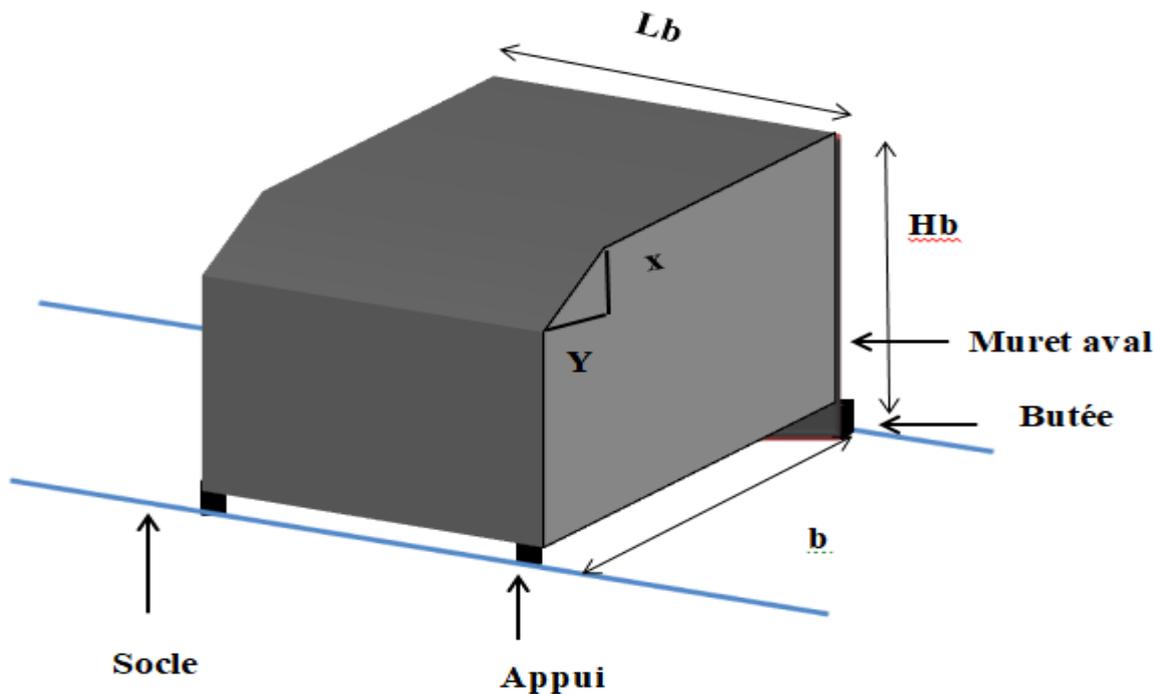


Figure (II.1) Schéma descriptif d'un bloc fusible

II.3 Objectif de conception des blocs fusibles

Les blocs fusibles s'appliquent aux déversoirs construits transversalement à la direction de l'écoulement, que ces derniers soient existants ou pour prévus. Dans le cas des déversoirs existants, les blocs peuvent augmenter la capacité de stockage du réservoir (fig. II.3), ils peuvent aussi améliorer la sécurité du barrage moyennant qu'on recoupe le seuil existant pour abaisser la côte de calage (figure II.4). Pour les nouveaux barrages, l'utilisation des blocs à la place de seuil Creager permet pour chaque mètre cube par seconde additionnel évacué l'économie d'un mètre cube de béton (Hydrocoop, 2013).

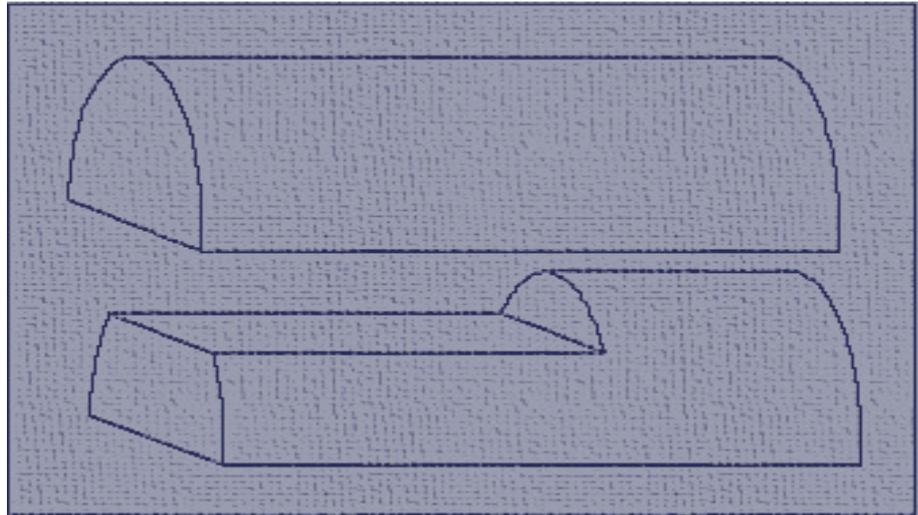


Figure (II.2) Arasement du seuil pour l'emplacement des blocs fusible

II.3.1 Augmentation de la capacité des barrages

En plus de l'envasement précoce des retenues, la demande accrue en eau pour la consommation domestique, l'irrigation et l'industrie, obligent les gestionnaires des barrages à chercher des solutions pour accroître la capacité de stockage. Dans la plupart des cas, les barrages sont équipés d'un évacuateur de crues à seuil libre, qui 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 perdu de l'eau, en augmentant la hauteur du seuil, tout en conservant la capacité d'évacuation par un seuil à surface libre.

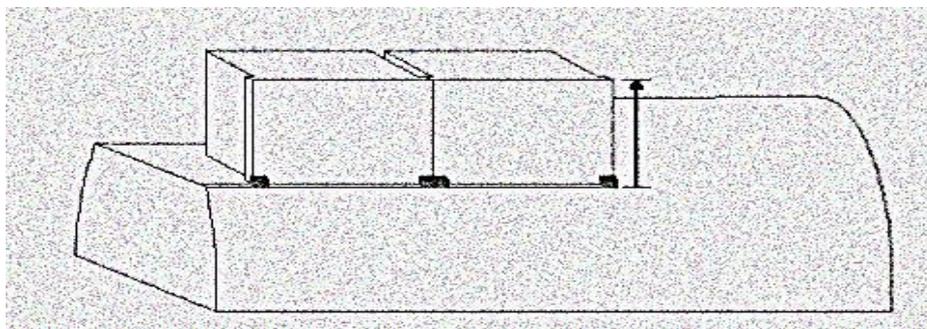


Figure (II.3) Blocs fusibles pour augmenter la capacité des barrages

II.3.2 Amélioration de la sécurité des évacuateurs de crues

La révision de la crue de projet des barrages anciens, et surtout avec les changements climatiques actuel est devenu une nécessité pour éviter les dangers probables, au fort débit de crues, par rapport à la crue de projet. Ceci exige la recherche de solutions pour augmenter la capacité de l'évacuateur de crues. Dans le cas d'évacuateur de crue à seuil libre, les blocs fusibles sont l'une des solutions efficaces qui permet d'augmenter la capacité du déversoir, en faisant abaisser le seuil, pour obtenir une charge plus grande que l'initiale et par conséquent, 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.

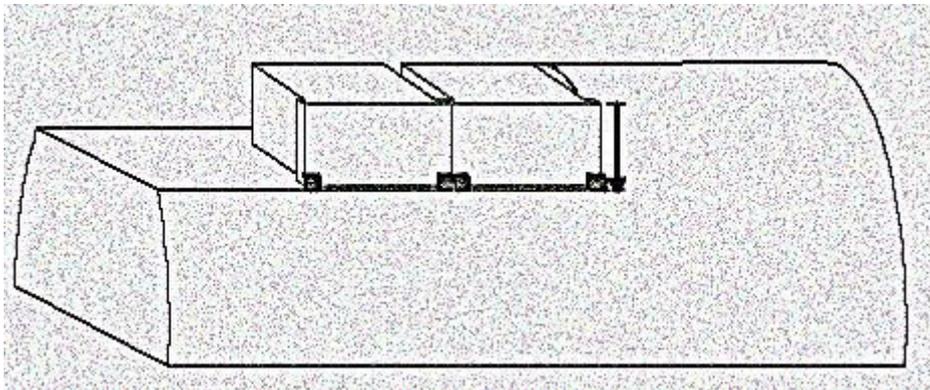


Figure (II.4) Blocs fusibles pour améliorer la sécurité des évacuateurs de crues

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/ les blocs fusibles fonctionnent comme un barrage lorsque le niveau de l'eau est inférieur ou égal le niveau d'arase des blocs. Chaque bloc est largement auto stable et résiste à la poussée hydrostatique grâce à son poids propre.

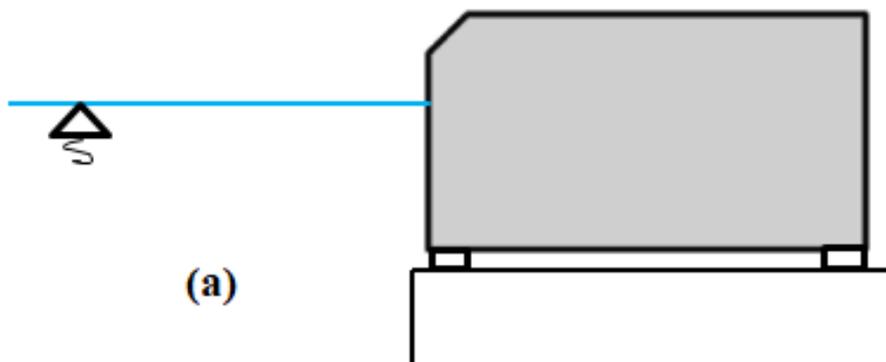


Figure (II.5) (a) Bloc fusible fonctionne comme un barrage

b/ les blocs fusibles fonctionnent comme un déversoir à large seuil lorsque le niveau de l'eau s'élève au-dessus de la cote d'arase des blocs, jusqu'à une certaine épaisseur de la lame d'eau écoulée sur les blocs. Pendant cette phase de fonctionnement chaque blocs reste largement auto stable comme dans la phase précédente.

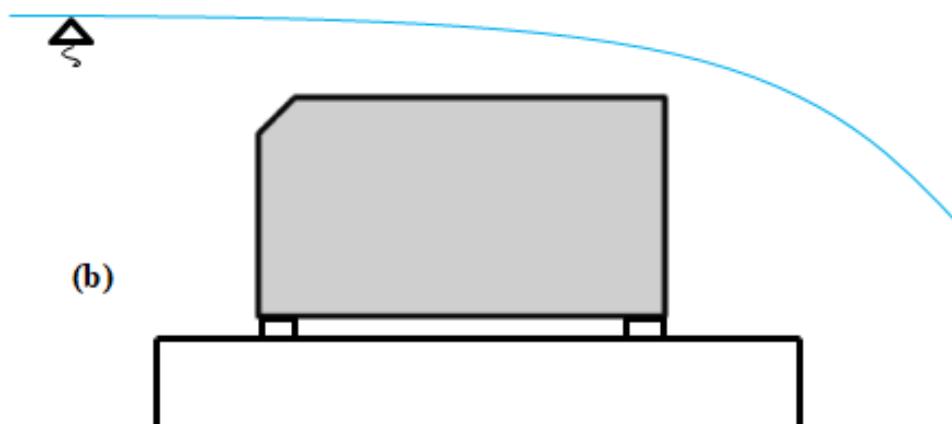


Figure (II.5) (b) Bloc fusible fonctionne comme un déversoir

c/ en cas de grand débit, au-delà d'une fréquence choisie, 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.

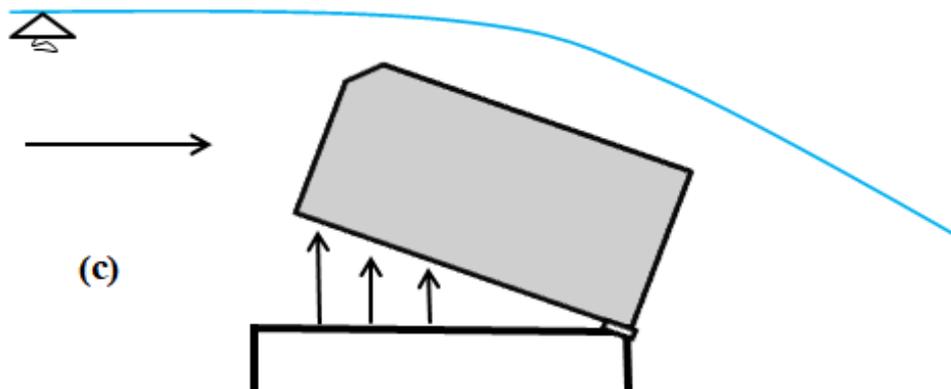


Figure (II.5) (c) Bloc fusible fonctionne comme un fusible.

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 changement climatique dans le monde, et surtout en ce qui concerne les précipitations, avoir un effet direct sur les barrages et les retenues, ce qui nécessite souvent une révision hydrologique qui a précédé la construction de ces ouvrages, les grandes quantités de matières solides portées par l'eau de pluie, en raison de l'intensité d'érosion, conduisent à une diminution de la quantité de stockage plus rapide que considérée comme moyenne.

L'utilisation des blocs fusibles au-dessus du déversoir, permet de conserver la stabilité du barrage, en parallèle avec la révision de la crue de projet.

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 un important 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 adaptée 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

Vérification expérimentale de l'effet de la forme de l'arête amont des blocs fusibles sur L'écoulement.

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 Calcul théorique des dimensions d'un bloc fusible à arête amont chanfreinée

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 laquelle ce dernier 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 prend pour cette étude un chanfrein identique de pente $i=1$, $X=Y$.

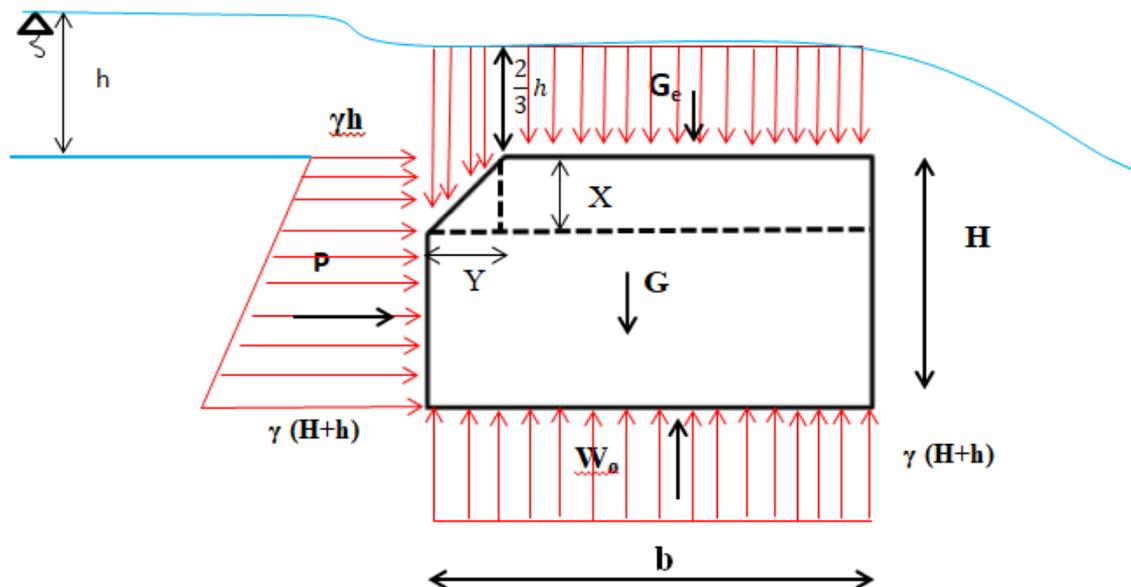


Figure (II.6) Schéma de calcul de stabilité du bloc fusible chanfreiné

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

H : Hauteur du bloc.

b : Largeur du bloc.

γ : Poids volumique de l'eau.

γ_b : Poids volumique du béton.

Vérification expérimentale de l'effet de la forme de l'arête amont des blocs fusibles sur L'écoulement.

CHAPITRE II Dimensionnement théorique des modèles réduits

G_e : Poids de l'eau sur le bloc.

G : Poids du bloc.

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

W_{∞} : Pression exercée par l'eau sur la base du bloc (Sous-pression).

- Forces appliquées au bloc fusible :

Le bloc fusible est soumis à l'action du poids de l'eau sur son sommet (G_e), de son poids propre (G), de la pression hydrostatique (P) appliquée sur sa face amont et à la sous pression qui s'exerce sur sa base (W_{∞}). 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 $\frac{2}{3}h$.

Calcul de la stabilité du bloc fusible avec arête amont chanfreinée :

$$G_e = G_{e1} + G_{e2}$$

$$G_{e1} = \gamma_e \left[\frac{2}{3} hb \right]$$

$$XG_{e1} = b/2$$

$$MG_{e1} = \gamma_e \left[\frac{1}{3} hb \right].b$$

$$G_{e2} = \gamma_e \left(\frac{x^2}{2} \right)$$

$$XG_{e2} = b - \frac{1}{3}x$$

$$MG_{e2} = \gamma_e \left(\frac{x^2}{2} \right).b - \frac{1}{3}x$$

$$G_e = \gamma_e \left[\frac{2}{3} hb + \frac{x^2}{2} \right] \quad XG_e = \frac{\frac{1}{3}hb^2 + \frac{1}{2}.x^2b + \frac{1}{6}.x^3}{\frac{2}{3}hb + \frac{x^2}{2}}$$

$$MG_e = \frac{1}{3}\gamma_e . hb^2 + \frac{1}{2}\gamma_e . x^2b - \frac{1}{6}\gamma_e . x^3 \quad (II.1)$$

$$G = G_1 + G_2 + G_3 \quad G_1 = \gamma_b . b(H - x) \quad XG_1 = \frac{b}{2}$$

$$MG_1 = \gamma_b b (H - x) . \frac{b}{2}$$

Vérification expérimentale de l'effet de la forme de l'arête amont des blocs fusibles sur L'écoulement.

$$\begin{aligned}
 G_2 &= \gamma_b \times (b - x) & XG_2 &= \frac{b - x}{2} & MG_2 &= \gamma_b \times (b - x) \cdot \frac{b - x}{2} \\
 G_3 &= \gamma_b \frac{x^2}{2} & XG_3 &= \left(b - \frac{2}{3}x\right) & MG_3 &= \gamma_b \frac{x^2}{2} \left(b - \frac{2}{3}x\right) \\
 G &= \gamma_b \left[bH - \frac{x^2}{2}\right] & XG &= \frac{\frac{1}{2}b^2H - \frac{1}{2}bx^2 + \frac{1}{6}x^3}{bH - \frac{1}{2}x^2} \\
 MG &= \frac{1}{2}\gamma_b b^2H - \frac{1}{2}\gamma_b bx^2 + \frac{1}{6}\gamma_b x^3
 \end{aligned} \tag{II.2}$$

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

$$W\emptyset = \gamma(H + h)b \quad XW\emptyset = \frac{b}{2} \quad MW\emptyset = \frac{\gamma(H + h)}{2}b^2 \tag{II.4}$$

Le moment de renversement est exprimé par la relation suivante :

$$Kr = \frac{MGe + MG}{MP + MW\emptyset} \tag{II.5}$$

En substituant les relations des moments des forces (1), (2), (3), et (4) dans la relation (5) et en considérant le cas de la stabilité limite, après les calculs et les simplifications en 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.

$$\left(\frac{1}{2}\gamma_b H - \frac{1}{6}\gamma_e h - \frac{1}{2}\gamma_e H\right)b^2 + \left(\frac{1}{2}\gamma_e x^2 - \frac{1}{2}\gamma_b x^2\right)b - \frac{1}{2}\gamma_e h H^2 - \frac{1}{6}\gamma_e H^3 + \frac{1}{6}\gamma_b x^3 - \frac{1}{6}\gamma_e x^3 = 0 \tag{II.6}$$

Vérification expérimentale de l'effet de la forme de l'arête amont des blocs fusibles sur L'écoulement.

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

II.5.5 Calcul théorique des dimensions d'un bloc fusible à arête amont arrondie

Le calcul se fait par la même méthode précédente, On prend pour cette étude l'arête amont arrondie d'un quart de cercle à un rayon R .

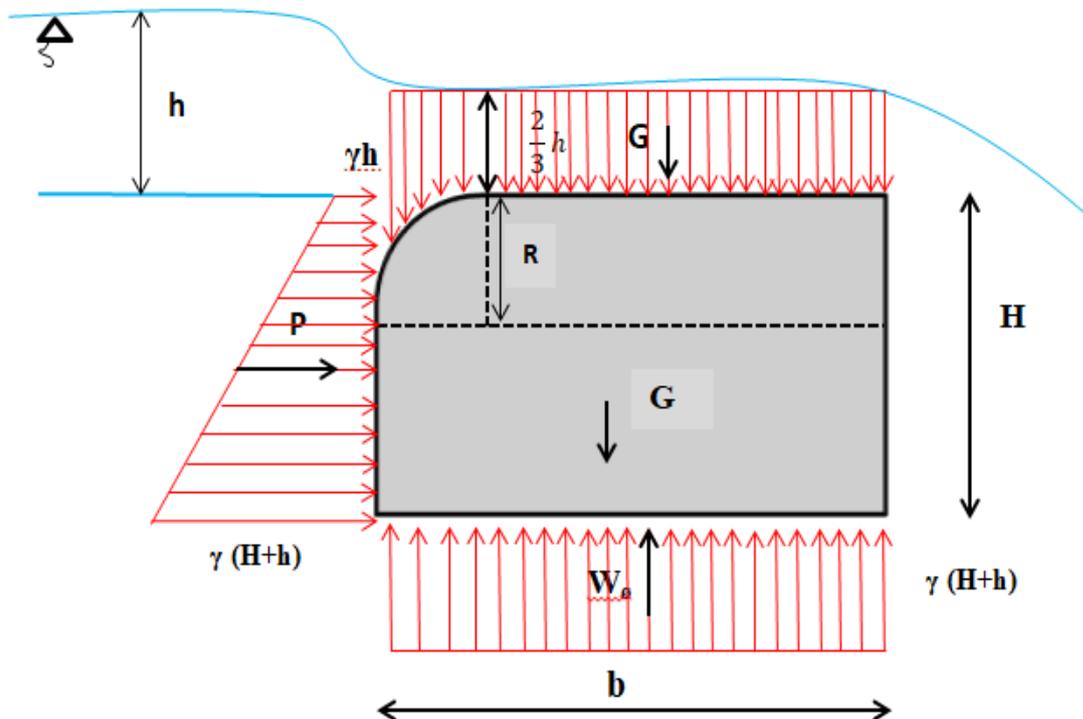


Figure (II.7) Schéma de calcul de stabilité du bloc fusible arrondi

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

H : Hauteur du bloc.

b : Largeur du bloc.

R : rayon d'un quart de cercle.

γ : Poids volumique de l'eau.

γb : Poids volumique du béton.

G_e : Poids de l'eau sur le bloc.

G : Poids du bloc.

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

CHAPITRE II Dimensionnement théorique des modèles réduits

W_{∞} : Pression exercée par l'eau sur la base du bloc (Sous-pression).

- Forces appliquées au bloc fusible :

Le bloc fusible est soumis à l'action du poids de l'eau sur son sommet (G_e), de son poids propre (G), de la pression hydrostatique (P) appliquée sur sa face amont et à la sous pression qui s'exerce sur sa base (W_{∞}). 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 $\frac{2}{3}h$

Calcul de la stabilité du bloc fusible avec angle arrondi :

$$G_e = G_{e1} + G_{e2}$$

$$G_{e1} = \gamma_e \left[\frac{2}{3} hb \right] \quad XG_{e2} = \frac{b}{2} \quad MG_{e1} = \gamma_e \left[\frac{1}{3} hb \right] \cdot b$$

$$G_{e2} = \gamma_e \frac{1}{4} R^2 \quad XG_{e1} = b - \frac{1}{3} R \quad MG_{e2} = \gamma_e R^2 \left(b \frac{1}{4} - \frac{1}{12} R \right)$$

$$G_e = \gamma_e \left[\frac{2}{3} hb + \frac{1}{4} R^2 \right] \quad XG_e = \frac{\frac{1}{3} hb^2 + \frac{1}{4} R^2 b - \frac{1}{12} R^3}{\frac{2}{3} hb + \frac{1}{4} R^2}$$

$$MG_e = \gamma_e \left(\frac{1}{3} hb^2 + \frac{1}{4} R^2 b - \frac{1}{12} R^3 \right) \quad (II.7)$$

$$G = G_1 + G_2 + G_3$$

$$G_1 = \gamma_b \cdot b(H - R) \quad XG_1 = \frac{b}{2} \quad MG_1 = \frac{\gamma_b b^2 (H - R)}{2}$$

$$G_2 = \gamma_b R (b - R) \quad XG_2 = \frac{b - R}{2} \quad MG_2 = \frac{\gamma_b (b - R)^2}{2}$$

Vérification expérimentale de l'effet de la forme de l'arête amont des blocs fusibles sur L'écoulement.

$$G_3 = \gamma_b \frac{\pi R^2}{4} \quad XG_3 = \left(b - R + \frac{4R}{3\pi} \right) \quad MG_3 = \gamma_b \frac{\pi R^2}{4} \left(b - R + \frac{4R}{3\pi} \right)$$

$$G = (Hb - R^2 + \frac{1}{4}\pi R^2) \quad XG = \frac{\frac{1}{2}b^2H - bR^2 + \frac{1}{4}\pi R^2b - \frac{1}{4}\pi R^3 + \frac{5}{6}R^3}{Hb - R^2 + \frac{1}{4}\pi R^2}$$

$$MG = \gamma_b \left(\frac{1}{2}b^2H - bR^2 + \frac{1}{4}\pi R^2b - \frac{1}{4}\pi R^3 + \frac{5}{6}R^3 \right) \quad (II.8)$$

$$P = \frac{\gamma(H + 2h)H}{2} \quad YP = \frac{H(H + 3h)}{3(H + 2h)} \quad MP = \frac{\gamma(H + 3h)}{6}H^2 \quad (II.9)$$

$$W\emptyset = \gamma(H + h)b \quad XW\emptyset = \frac{b}{2} \quad MW\emptyset = \frac{\gamma(H + h)}{2}b^2 \quad (II.10)$$

Le moment de renversement est exprimé par la relation suivante :

$$Kr = \frac{MGe + MG}{MP + MW\emptyset} \quad (II.11)$$

En substituant les relations des moments des forces (7), (8), (9), et (10) dans la relation (11) et en considérant le cas de la stabilité limite, après les calculs et les simplifications en 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.

$$\left(\frac{1}{2}\gamma_bH - \frac{1}{2}\gamma_eH - \frac{1}{6}\gamma_eh \right) b^2 + \left(\frac{1}{4}\gamma_b\pi R^2 + \frac{1}{4}\gamma_eR^2 - \gamma_bR^2 \right) b - \frac{1}{2}\gamma_ehH^2 - \frac{1}{4}\gamma_eH^3 - \frac{1}{4}\gamma_b\pi R^3 + \frac{5}{6}\gamma_bR^3 - \frac{1}{12}\gamma_eR^3 = 0 \quad (II.12)$$

Cette dernière relation permet de donner les dimensions du bloc fusible à arête amont arrondie 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 les figures (II.6), (II.7). 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 :

$$P = \frac{1}{2} \gamma \cdot H \cdot (H + 2h)$$

II.6 CONCLUSION

L'étude théorique, qui a été effectuée sur deux formes des blocs fusibles avec arête amont chanfreinée et arrondie pour but d'aboutir à des relations mathématiques 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.

Les deux relations (II.6), (II.12) obtenues relient la largeur du bloc b par sa hauteur, de la hauteur d'eau sur le bloc et des poids volumiques du matériau et de l'eau plus les deux dimensions X et Y ($X=Y$) pour la forme chanfreinée et le rayon R du quart de cercle de l'arrondie.

Sur cette base le développement théorique a permis d'aboutir 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 des modèles réduits des blocs fusibles

(Forme d'arête amont chanfreinée et arrondie)

III.1 Introduction

Malgré le développement de la modélisation numérique, les méthodes de calcul ne permettent que de donner des résultats de première estimation.

Ainsi, il est fondamental de procéder à des essais expérimentaux sur modèles réduits physiques pour vérifier les résultats donnés par le calcul numérique. Le modèle réduit physique est le seul moyen qui représente la réalité tridimensionnelle et permet de donner des résultats exacts et plus efficace par rapport aux autres méthodes.

A cet effet, le présent chapitre a pour but de présenter l'étude expérimentale qui a été réalisée sur deux formes de blocs fusibles, la première forme à arête amont chanfreinée et la deuxième arrondie. 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 48m³, 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

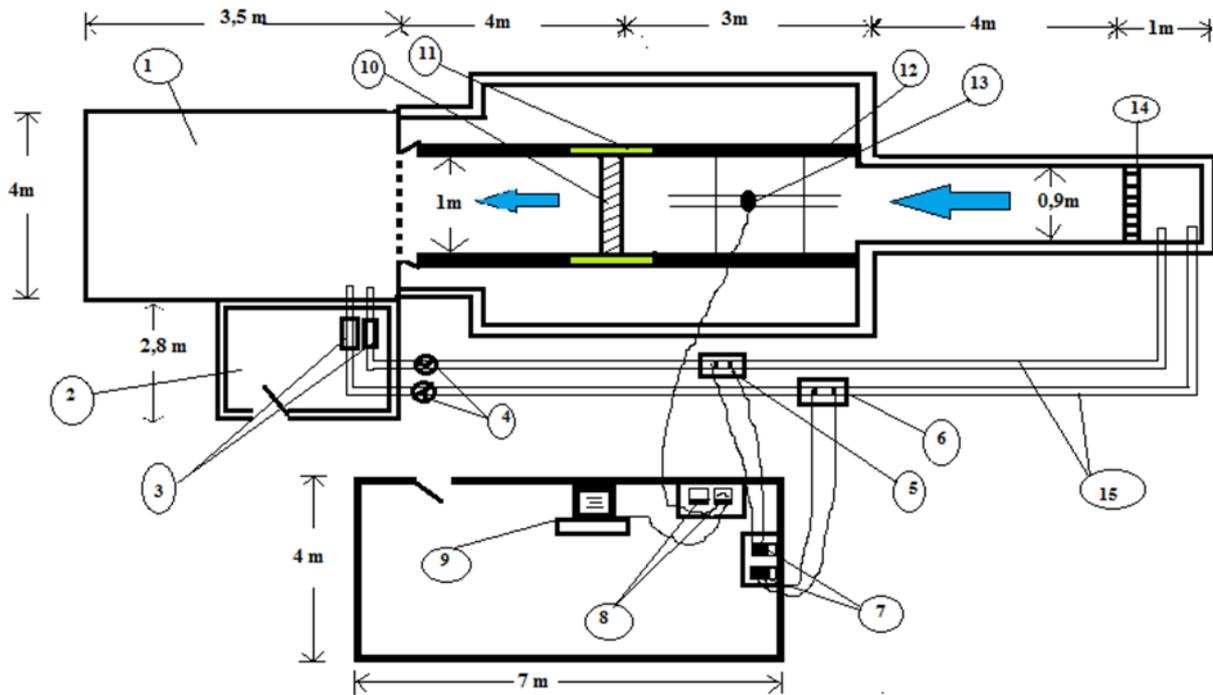


Figure (III.3) Schéma de la station d'expérimentation

- | | |
|---------------------------------|--|
| 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 à 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 Instruments de mesure de la charge d'eau sur les blocs

Généralement l'écoulement sur un déversoir est exprimé par le débit (Q) de transite et la hauteur d'eau sur le seuil (h).

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'on appelle le réseau piézométrique.

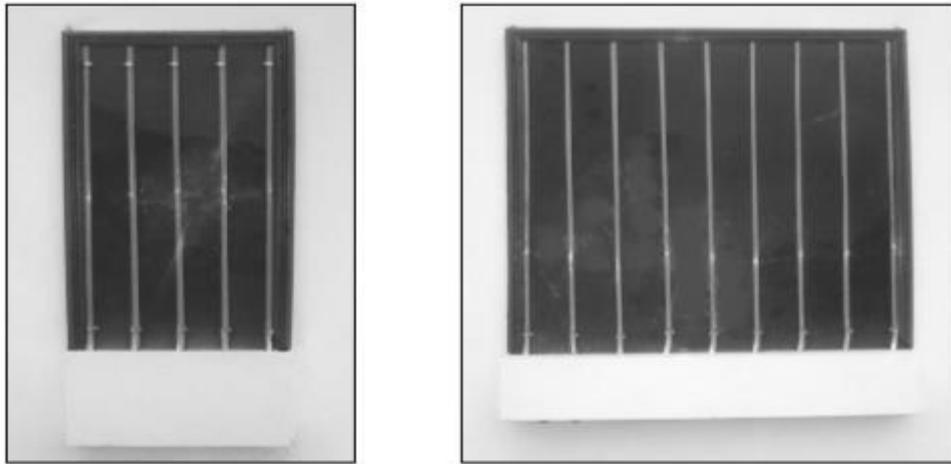


Figure (III.4) Tableaux des manométriques de mesure des niveaux d'eau

III.2.2 Instruments de mesure du débit qui transite sur les blocs

On a choisi des instruments de mesure de précision pour avoir des résultats fiables, L'écoulement sur un déversoir s'exprimé par ces deux paramètres le débit (Q) de transite et la hauteur d'eau sur le seuil (h).

Pour la mesure d'un débit volume on doit le déterminée avec précision. De ce fait, les débits ont été mesurés par un débitmètre à ultrasons dont la précision est de l'ordre de 0,1 l/s.

Le débitmètre (Prosonic Flow) fonctionne selon le principe de la différence de temps de parcours d'un signal acoustique (ultrason) envoyé dans les deux sens d'un capteur à l'autre. Etant donné que la vitesse de propagation de l'onde sonore est inférieure si le signal est émis contre le sens d'écoulement, on est en présence d'une différence de temps de parcours. Cette différence est directement proportionnelle à la vitesse d'écoulement.

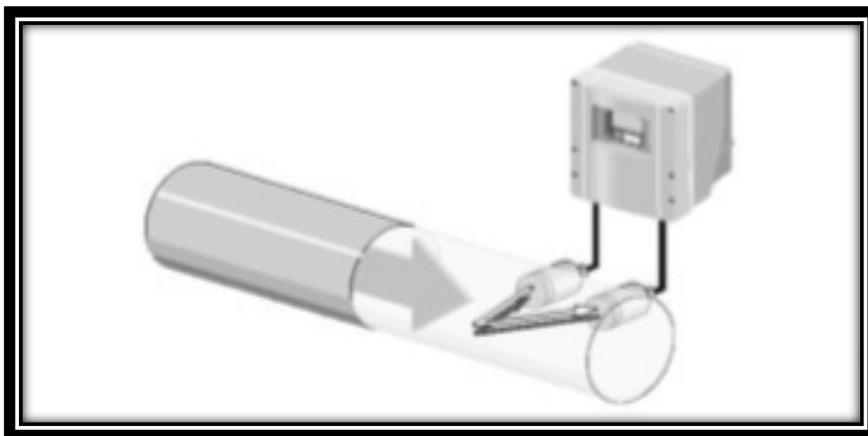


Figure (III.5) Schéma du principe de mesure du débit par débitmètre à ultrason

Le débitmètre à ultrason calcule le débit à partir de la section de la conduite et de la différence du temps de parcours mesurée, il transmette les lectures des débits directement au transmetteur et au PC par le biais d'un adaptateur de type Commubox FXA et du logiciel COMMUWIN II.

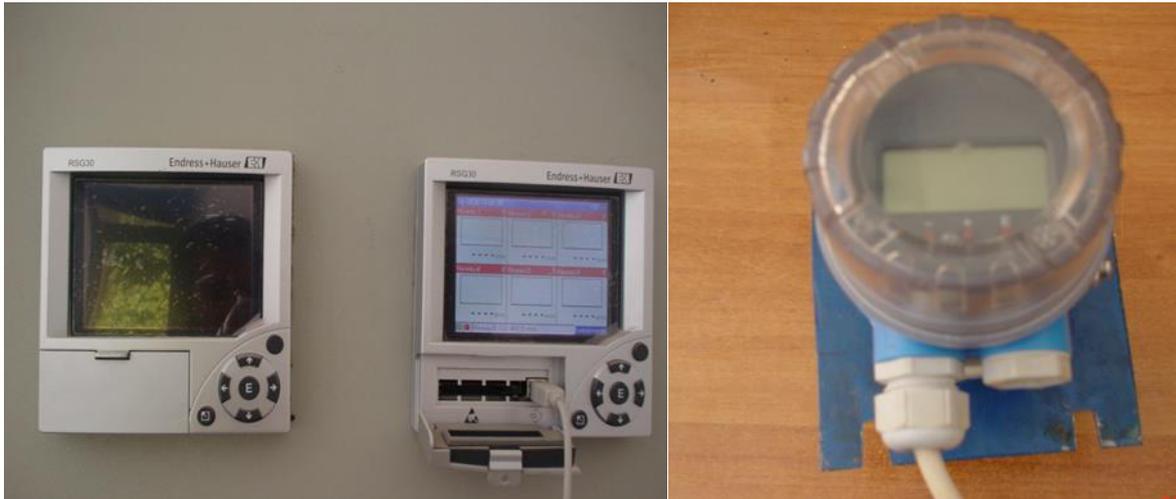


Figure (III.6) Débitmètre à ultrason Flowmeter 93W2

Le transmetteur sert de commande pour les capteurs de mesure. L'électronique et le logiciel du transmetteur servent au traitement et à l'exploitation des signaux des capteurs, ainsi qu'à leurs transformations dans la grandeur de mesure souhaitée.

III.2.3 Instrument de mesure des profondeurs d'eau

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.



enregistreur du niveau

b- capteur du niveau

Figure (III.7) Capteur de niveau PROSONIC T

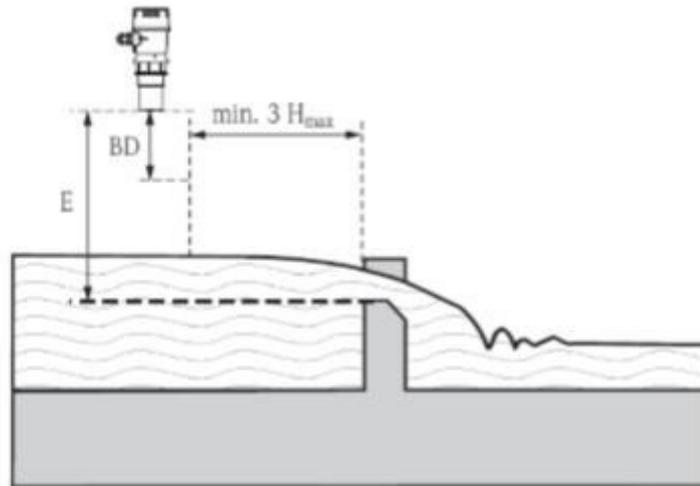


Figure (III.8) Schéma d'installation du Capteur de niveau dans un canal à écoulement libre

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.

Vérification expérimentale de l'effet de la forme de l'arête amont des blocs fusibles sur l'écoulement.



Figure (III.9) DéTECTEUR de niveau à ultrason au niveau du canal

III.3 Dispositif expérimental

Le but principal de ce travail est d'étudier l'effet de la forme de l'arête amont du bloc fusible sur l'écoulement au-dessus de ce type de déversoir et en suite la vérification de la hauteur de basculement du bloc qui a été déjà étudié par des travaux précédents au niveau de notre laboratoire de recherche (LAHE) dans la station d'expérimentation.

Le dispositif a été établi pour réaliser des essais sur des blocs de deux formes chanfreinée et arrondie avec des largeurs différentes.

III.3.1 Modèles réduits des blocs fusibles

Pour réaliser l'étude expérimentale, deux groupes de blocs fusibles en béton ont été construits, le premier groupe a une forme chanfreinée à l'amont de pente $i=1$ (45°), contient deux séries chacune avec un chanfrein de hauteur et largeur égaux, successivement de 1cm et 2cm

Le deuxième groupe a une forme arrondie, contient deux séries de blocs, chacune avec une courbure au sommet amont, d'un quart de cercle du rayon R égal 1cm et 2cm.

Les blocs ont été dimensionnés à partir des relations développées dans la partie théorique. Pour éviter le frottement entre les blocs, un socle muni de murs séparateurs a été installé sur le seuil du déversoir avec une butée en aval.

La hauteur des blocs a été choisie égale à 10 cm pour tous les modèles, en tenant compte de la hauteur de la chambre de sous-pression qui est de 0,5 cm.

Tandis que la longueur des blocs a été choisie égale à deux fois la hauteur, soit $L= 20$ cm. Une plaque métallique de longueur 20 cm 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. La largeur est déterminée par le calcul des solutions de l'équation de deuxième groupe développée pour chaque forme dans la partie théorique.

Les blocs ont été fabriqués par du béton coulé dans des moules en bois ou en métal chanfreinée et courbé à l'amont. Une plaque métallique de dimensions supérieures aux dimensions du bloc a été fixée sur la face aval du moule. Ceci dans le but de permettre la création d'un vide sous le bloc, permettant ainsi la création d'une chambre de sous pression.

Le béton a été réalisé avec un dosage équivalent à 2,4t/m³ en utilisant un béton composé de 1,2kg de gravier, 0,650kg de sable, 0,350kg de ciment et un volume d'eau de 0,2 Kg.



Figure (III.10) Moules en bois et métallique

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 (forme chanfreinée)

Caractéristique s	H	L	X	Y	h	γ_e	γ_b	b
N° Bloc								
(1)	10	20	1	1	5	1	2,4	8,02
(2)	10	20	1	1	7	1	2,4	9,21
(3)	10	20	1	1	9	1	2,4	10,39
(4)	10	20	1	1	11	1	2,4	11,59
(5)	10	20	1	1	13	1	2,4	12,83
(1)	10	20	2	2	5	1	2,4	8,18
(2)	10	20	2	2	7	1	2,4	9,39
(3)	10	20	2	2	9	1	2,4	10,58
(4)	10	20	2	2	11	1	2,4	11,80
(5)	10	20	2	2	13	1	2,4	13,06

Tableau (III.2) Caractéristiques initiales des modèles réduits des blocs (forme arrondie)

Caractéristiques N° Bloc	H	L	R	h	Y	Y _b	b
(1)	10	20	1	5	1	2,4	7,98
(2)	10	20	1	7	1	2,4	9,17
(3)	10	20	1	9	1	2,4	10,35
(4)	10	20	1	11	1	2,4	11,55
(5)	10	20	1	13	1	2,4	12,79
(1)	10	20	2	5	1	2,4	8,05
(2)	10	20	2	7	1	2,4	9,24
(3)	10	20	2	9	1	2,4	10,43
(4)	10	20	2	11	1	2,4	11,63
(5)	10	20	2	13	1	2,4	12,87

Après la fabrication des blocs, il a été remarqué une légère différence avec les caractéristiques proposées initialement. Les tableaux (III.3) et (III.4) récapitule les caractéristiques réelles des modèles réduits.



Figure (III.11) Blocs fusibles à arête amont chanfreinée après fabrication

Tableau (III.3) Caractéristiques réelles des modèles réduits (forme chanfreinée) après fabrication

Caractéristiques N° Bloc	H	L	X	Y	b	Y	Y _b	h
(1)	10	20	1	1	8,1	1	2,58	5,7
(2)	10	20	1	1	9,6	1	2,47	7,7
(3)	10	20	1	1	10,8	1	2,47	9,8
(4)	10	20	1	1	12,1	1	2,42	11,7
(5)	10	20	1	1	13,2	1	2,42	13,5
(1)	10	20	2	2	8,8	1	2,52	6,3
(2)	10	20	2	2	9,5	1	2,61	8,1
(3)	10	20	2	2	11,1	1	2,47	10,1
(4)	10	20	2	2	12,4	1	2,42	11,8
(5)	10	20	2	2	13,6	1	2,44	13,9



Figure (III.12) Blocs fusibles à arête amont arrondie après fabrication

Tableau (III.4) Caractéristiques réelles des modèles réduits (forme arrondie) après leur fabrication

Caractéristiques N° Bloc	H	L	R	b	Υ	Υ_b	h
(1)	10	20	1	8,05	1	2,51	5,3
(2)	10	20	1	9,3	1	2,47	7,2
(3)	10	20	1	10,4	1	2,48	9,3
(4)	10	20	1	11,6	1	2,46	11,2
(5)	10	20	1	12,8	1	2,46	13,3
(1)	10	20	2	8,2	1	2,51	5,4
(2)	10	20	2	9,5	1	2,48	7,5
(3)	10	20	2	10,5	1	2,48	9,3
(4)	10	20	2	11,9	1	2,45	11,5
(5)	10	20	2	13,05	1	2,43	13,2

III.3.2 Socle de basculement des blocs

Dans la section transversale du canal 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 1,035m, sa hauteur 0,26m, 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.13) Socle de basculement des blocs

III.3.3 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.14) Support métallique

III.4 Procédure expérimentale

Après la construction du socle en béton dans la section transversale du canal d'écoulement puis la fixation du support métallique sur le seuil. La procédure expérimentale s'effectue en trois phases :

- Installation des modèles réduits dans les pertuis (ouvertures).
- Vérification du bon fonctionnement des instruments de mesure et de l'ensemble du système expérimental.

Vérification expérimentale de l'effet de la forme de l'arête amont des blocs fusibles sur l'écoulement.

- Démarrage des essais par l'amorçage de la pompe et la mesure du débit et de la hauteur d'eau.

Avant d'entamer la procédure expérimentale, les blocs en béton doivent être posés sur le seuil chacun dans un pertuis tout en assurant son horizontalité par l'insertion d'un petit cube en béton au-dessous du bloc comme support à son extrémité amont. Ceci permet la création d'une chambre sous le bloc. 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 (figure III.), ensuite on fait amorcer la pompe et laissant l'eau s'écouler dans le canal, le niveau d'eau s'élève graduellement jusqu'à ce qu'il atteigne le seuil du socle, puis pénètre dans les chambres des sous pression 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 reste, on augmente le débit qui transite par le déversoir jusqu'à un niveau qui provoque le renversement du deuxième bloc.

La même procédure est répétée pour le basculement du dernier bloc.



Figure (III.15) Vue amont et 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, 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 :

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

Avec :

C_d : coefficient de débit

h : la lame d'eau écoulée sur le bloc

L : longueur du seuil

g : accélération de la gravité

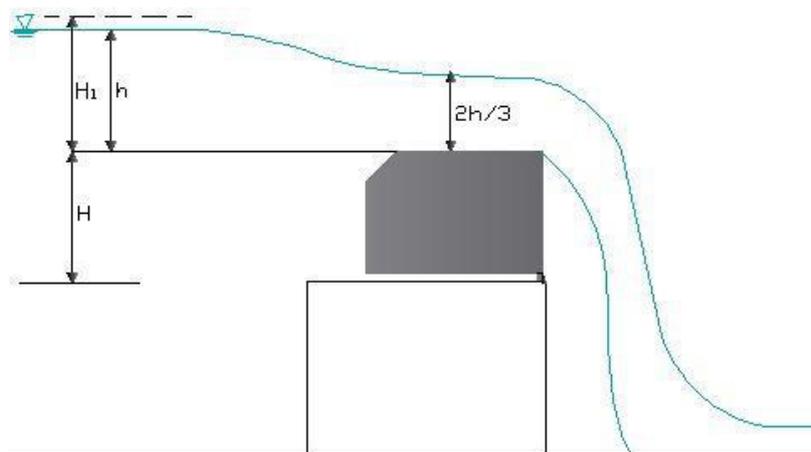


Figure (III.16) déversoir à seuil épais en écoulement dénoyé

III.5.2 Calcul du coefficient de débit expérimental de chaque forme de blocs

Le coefficient de débit du déversoir en blocs fusibles peut être calculé après le blocage des blocs, plusieurs séries d'essais ont été réalisés sur les deux formes choisies (chanfrein et arrondie) pour déterminer le couple des valeurs du débit en fonction de la charge d'eau sur les blocs. Les résultats obtenus ont été présentés dans les tableaux (III.5.6.7.8).

Les résultats expérimentaux obtenus permettent de calculer le coefficient de débit à partir de la relation (III.1). La hauteur d'eau sur les blocs et la longueur de ce dernier permettent de dire

que le débit qui transite par les blocs peut être considéré comme celui qui passe sur un déversoir à seuil épais

Les résultats montrent que le coefficient de débit varie entre 0.302 et 0.431 pour les quatre séries de blocs, Il a noté que les valeurs moyennes appartiennent à l'intervalle des valeurs de coefficient de débit défini par Bazin pour un déversoir à seuil épais (0,37 ÷ 0,39), alors que les grandes et les petites valeurs sont en dehors de l'intervalle défini par Bazin.



Figure (III.17) Essai de calcul du coefficient de débit

Tableau (III.5) Coefficient de débit pour des blocs à arête amont chanfreinée (1cm)

h(cm)	5,93	8,67	10,82	12,73	14,35	15,95	17,13
Q _{exp} (l/s)	20,1	40,2	60,5	80,15	100,2	120,06	139,67
Cd _{exp}	0,303	0,344	0,371	0,385	0,402	0,411	0,430
h/p	0,59	0,87	1,08	1,27	1,44	1,60	1,71

Tableau (III.6) Coefficient de débit pour des blocs à arête amont chanfreinée (2cm)

h(cm)	5,85	8,57	10,68	12,45	14,08	15,63	17,23
Q _{exp} (l/s)	19,7	40,04	60,3	79,9	99,16	119,96	139,4
Cd _{exp}	0,304	0,348	0,377	0,397	0,409	0,423	0,425
h/p	0,59	0,86	1,07	1,25	1,41	1,56	1,72

Tableau (III.7) Coefficient de débit pour des blocs à arête amont arrondie (1cm)

h(cm)	5,8	8,6	10,7	12,6	14,2	15,7	16,9
Q _{exp} (l/s)	20	40	60	80	100	120	135
Cd _{exp}	0,314	0,345	0,375	0,390	0,406	0,421	0,425
h/p	0,58	0,86	1,07	1,26	1,42	1,57	1,69

Tableau (III.8) Coefficient de débit pour des blocs à arête amont arrondie (2cm)

h(cm)	5,9	8,7	10,8	12,6	14,35	15,9	16,9
Q _{exp} (l/s)	20	40	60	80	100	120	135
Cd _{exp}	0,303	0,341	0,371	0,390	0,401	0,413	0,424
h/p	0,59	0,87	1,08	1,26	1,44	1,59	1,69

Vérification expérimentale de l'effet de la forme de l'arête amont des blocs fusibles sur l'écoulement.

III.5.3 Comparaison du coefficient de débit des deux formes expérimentées

Pour les petites charges, les valeurs du coefficient de débit paraissent être logiques étant donné que dans une expérimentation d'un écoulement sur des blocs, il y a souvent une perte de rendement à cause de la tension superficielle entre la faible lame d'eau et la surface de contact du bloc. Cependant pour les grandes charges qui dépassent 1,5 fois la hauteur des blocs, l'interaction entre la lame d'eau et la surface du bloc devient insignifiante, alors le coefficient de débit croît.

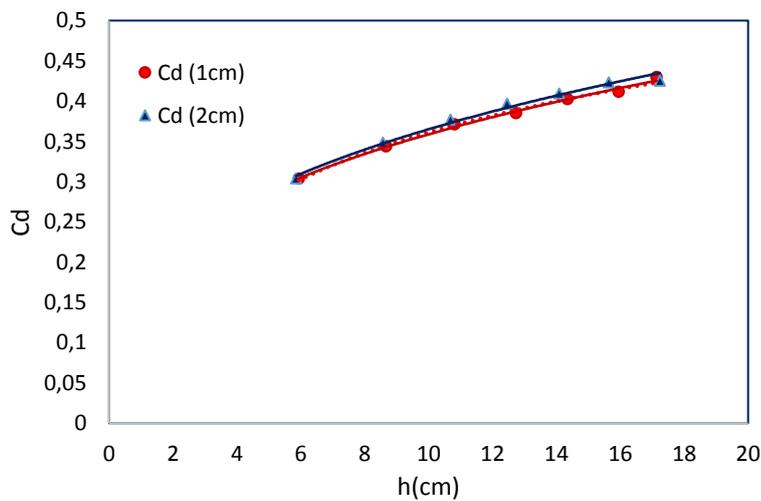


Figure (III.18) Coefficient de débit d'un déversoir en blocs fusibles à arête amont chanfreinée en fonction de la charge

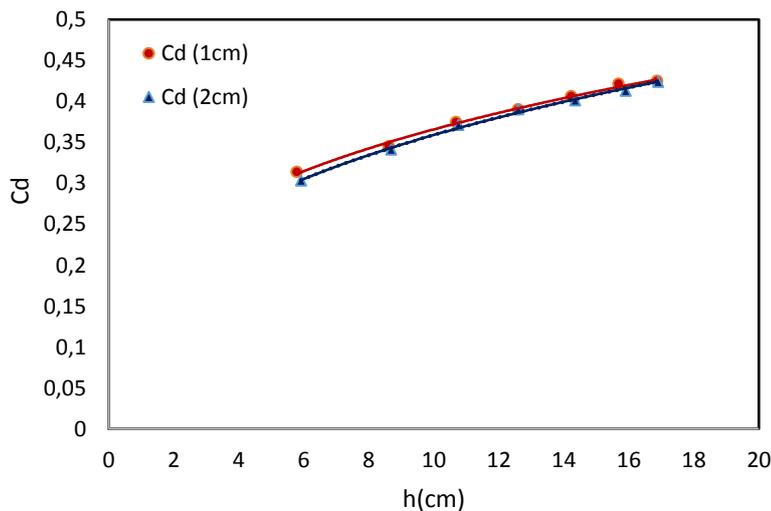


Figure (III.19) Coefficient de débit d'un déversoir en blocs fusibles à arête amont arrondie en fonction de la charge

La représentation graphique des résultats obtenus pour les blocs à arête amont chanfreinée montre que le coefficient correspondant aux blocs avec sommet amont chanfreiné sur une longueur de 2cm est légèrement plus grand que celui avec un chanfrein de 1,0cm fig. (III.18), ceci montre l'effet des dimensions du chanfrein sur l'écoulement par contre pour les blocs à arête amont arrondie, on constate que le coefficient de débit des blocs chanfreinés sur 2cm est légèrement plus faible que celui des blocs chanfreinés sur 1,0 cm fig. (III.19).

III.5.4 Comparaison entre la charge de basculement théorique et pratique

Les essais expérimentaux ont été effectués sur deux formes de blocs fusibles, la première à une arête amont chanfreinée en deux séries de blocs. Le chanfrein est identique de 1cm pour la première série des blocs (1) et 2cm pour la deuxième série des blocs (2). Chaque série est constituée de cinq blocs fusibles de largeur différente qui est déterminée par calcul à partir des relations théoriques développées sur la base de la stabilité limite de bloc, en prenant en considération la variation de la forme.

La deuxième forme de blocs, se caractérise par une arête amont arrondie d'un quart de cercle de rayon R égal à 1cm et 2cm successivement pour les deux séries de blocs (1) et (2). Chaque série est constituée de cinq blocs fusibles de largeur différente qui est déterminée par calcul.

La différence dans 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. Ainsi, la valeur pris en compte correspond à la valeur moyenne.

Il est à remarquer que ces résultats sont obtenus sur un déversoir constitué d'une série de cinq blocs de forme identique et de largeurs différentes.



Figure (III.20) Déversoir avant et après le basculement d'un bloc

Après avoir placé chacun des blocs dans le pertuis correspondant et en assurant l'étanchéité et l'horizontalité de l'ensemble, on opère à l'amorçage de la pompe. Lorsque l'eau atteint un certain niveau, le bloc de la largeur la plus faible bascule, aussitôt, enregistre la hauteur d'eau, 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 deux blocs qui reste, 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.

Le premier bloc de la série (1) de la forme chanfreinée a été rejeté à cause de la déformation après sa réalisation.

Les valeurs moyennes mesurées sur les quatre séries des essais sont présentées sur les tableaux suivants :

Tableau (III.9) Caractéristiques géométriques et résultats théoriques et pratiques obtenus pour la forme chanfreinée sur les deux séries de (1cm) et (2cm) successivement

Caractéristiques	$\gamma_b(t/m^3)$	H(cm)	L(cm)	b(cm)	$h_{th(cm)}$	$h_{pr(cm)}$	$h_{th}-h_{pr}(cm)$	Diff(%)
N° Bloc								
(1)	2,58	10	20	8,1	5,7	-	-	-
(2)	2,47	10	20	9,6	7,7	7,5	0,2	3,19
(3)	2,47	10	20	10,8	9,8	9,1	0,8	8,47
(4)	2,42	10	20	12,1	11,7	11,6	0,1	0,68
(5)	2,42	10	20	13,2	13,5	12,9	0,5	4,18
(1)	2,52	10	20	8,8	6,3	6,2	0,1	1,89
(2)	2,61	10	20	9,5	8,1	7,5	0,7	8,95
(3)	2,47	10	20	11,1	10,1	9,6	0,5	4,73
(4)	2,42	10	20	12,4	11,8	11,4	0,4	3,57
(5)	2,44	10	20	13,6	13,9	13,5	0,4	3,19

Tableau (III.10) Caractéristiques géométriques et résultats théoriques et pratiques obtenus pour la forme arrondie sur les deux séries de (1cm) et (2cm) successivement

Caractéristiques N° Bloc	$\gamma_b(t/m^3)$	H(cm)	L(cm)	b(cm)	$h_{th}(cm)$	$h_{pr}(cm)$	$h_{th}-h_{pr}(cm)$	Diff(%)
(1)	2,51	10	20	8,8	5,3	5,1	0,2	3,58
(2)	2,47	10	20	9,5	7,2	7,2	0,1	0,74
(3)	2,48	10	20	11,1	9,3	9,3	0,0	0,49
(4)	2,46	10	20	12,4	11,2	11,0	0,2	2,22
(5)	2,46	10	20	13,6	13,3	13,0	0,3	2,24
(1)	2,51	10	20	8,2	5,4	5,0	0,4	8,27
(2)	2,48	10	20	9,5	7,5	6,9	0,6	8,79
(3)	2,48	10	20	10,5	9,3	8,9	0,4	4,77
(4)	2,45	10	20	11,9	11,5	11,2	0,3	2,43
(5)	2,43	10	20	13,05	13,2	13,7	-0,5	-3,35

Pour évaluer les résultats expérimentaux obtenus, il est utile de procéder à une confrontation avec les résultats calculés par voie théorique. Les représentations graphiques (III.21.22.23.24) montrent la comparaison entre les deux courbes théorique et expérimentale de chaque série.

La lecture de ces graphiques (III. 21.22.23.24) qui représentent les hauteurs de basculement pratiques h_{pr} et théoriques h_{th} en fonction de la largeur des blocs, montre un bon accord entre les valeurs théoriques et ceux obtenues expérimentalement. La différence maximale entre les valeurs théoriques et pratiques ne dépasse pas 9% sur toute la gamme de la charge pour les quatre blocs des quatre séries, tandis que le reste des blocs ne dépasse pas les 5%.

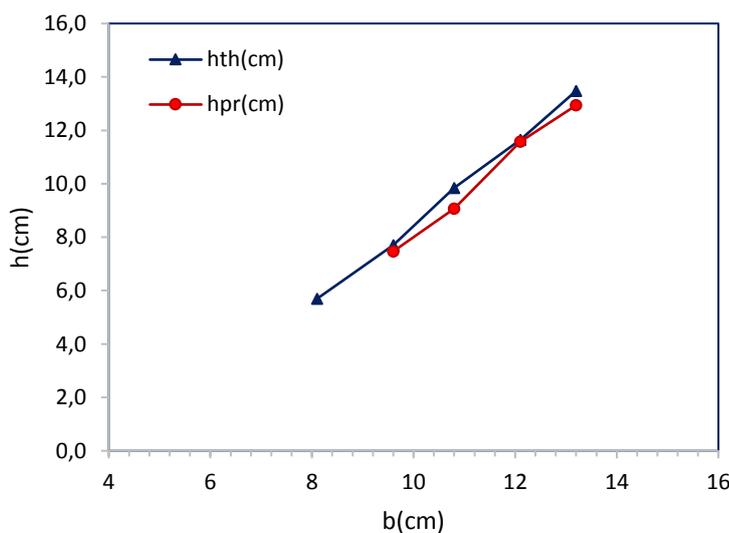


Figure (III.21) Comparaison entre la charge théorique et pratique de la forme chanfreinée (1cm)

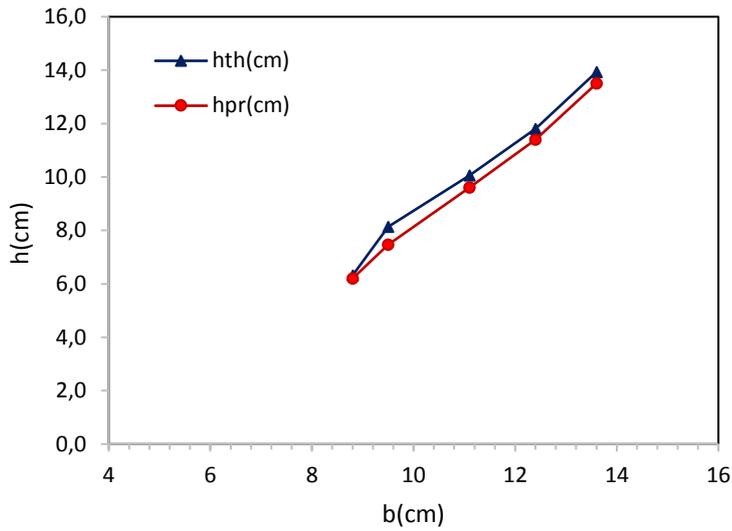


Figure (III.22) Comparaison entre la charge théorique et pratique de la forme chanfreinée (2cm)

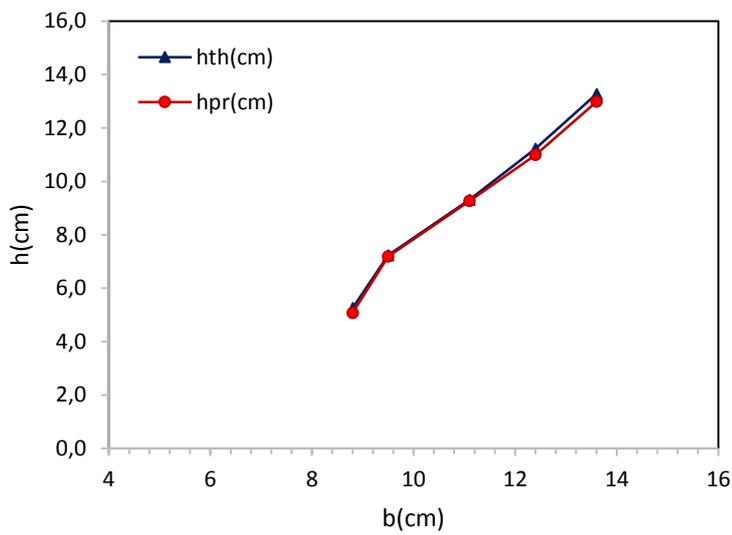


Figure (III.23) Comparaison entre la charge théorique et pratique de la forme arrondie (1cm)

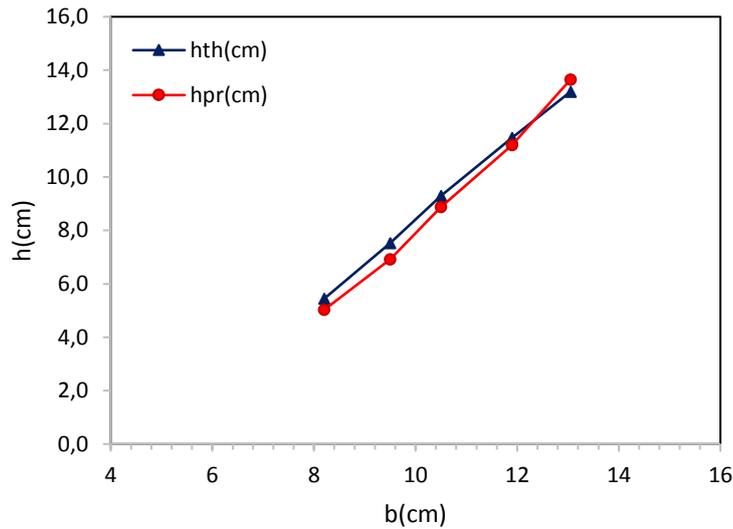


Figure (III.24) Comparaison entre la charge théorique et pratique de la forme arrondie (2cm)

III.5.5 Comparaison de la charge de basculement des deux formes expérimentées

Les résultats obtenus par les calculs théoriques et les résultats expérimentaux pour les deux formes choisies confirment celui que nous avons obtenue dans l'étude précédente, que le basculement des blocs fusibles est lié au poids volumétrique et à la largeur de chaque bloc.

La comparaison entre deux blocs avec la même charge de basculement proposée, si l'on prend comme exemple le bloc 03 de la première forme pour les deux séries, on constate qu'ils ont le même poids volumique après la fabrication et que la hauteur des blocs est fixe, les dimensions du chanfrein entraîne une différence de largeur, et donc une charge de basculement théorique et pratique plus grand, la différence entre le théorique et expérimental est de 0,8cm dans la première série et 0,5cm dans la deuxième série.

Pour la même comparaison entre les deux quatrièmes blocs pour les deux séries de la forme chanfreinée, qui ont le même poids volumique, on constate que la différence entre la hauteur de basculement théorique et pratique est de 0,1cm dans la première série et 0,4cm dans la deuxième série.

Ce contraste dans les résultats n'indique pas clairement l'effet de la forme de l'arête amont du bloc, par rapport à l'effet de la largeur et du poids volumique.

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 les 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.

III.6 CONCLUSION

L'étude expérimentale qui a été effectuée sur deux formes de modèles réduits des blocs fusibles, avec des largeurs différentes. Cette expérimentation a été menée en deux phases. La première a concerné le calcul du coefficient de débit d'un déversoir qui comporte une série de cinq blocs de même forme, et la seconde phase d'essai a été réalisée pour la vérification des résultats obtenus par la relation théorique pour les deux formes choisies.

Les résultats obtenus du coefficient de débit des deux séries de chaque forme montrent que le coefficient de débit augmente pour les grandes charges d'eau sur le déversoir, tandis que les blocs basculent avant d'atteindre des charges égale 1.5 fois la hauteur des blocs.

La comparaison des résultats montre que le déversoir qui porte des blocs fusibles à une arête amont chanfreinée de 2cm donne le meilleur rendement.

La vérification expérimentale des résultats obtenue par voie théorique a montré un bon accord entre les deux méthodes théorique et expérimentale, l'écart le plus remarquable est d'environ 9%, et ne concerne que quatre blocs, tandis qu'il ne dépasse pas 5% pour les autres blocs.

Les valeurs approchées du coefficient de débit des quatre séries de modèles testés pour des charges similaires aux charges de basculement des blocs et l'absence de son impact apparent sur la charge de basculement.

NOTATIONS

A_c	: Surface de la chambre du fond (m ²)
b	: Largeur du déversoir (m)
b	: largeur du bloc (m)
C_d	: Coefficient de débit
C_e	: Coefficient de correction
F_g	: Force nette manifestée par le poids du godet et la base (N)
g	: Accélération de la pesanteur (m/s ²)
G	: Poids propre du bloc (N)
G_e	: Poids de l'eau sur le sommet du bloc (N)
h	: Hauteur d'eau amont (m)
h	: Hauteur d'eau à l'amont par rapport au seuil du bloc (m)
h	: Différence entre le niveau d'eau dans le réservoir et le niveau de la crête (m)
h_1	: Hauteur d'eau à l'aval par rapport au seuil du bloc (m)
\bar{h}_{pr}	: Hauteur moyenne calculée pour une série d'essais d'un bloc (m)
H	: Hauteur de la hausse fusible (m)
H	: Hauteur du bloc (m)
H_1	: Charge totale sur le déversoir à seuil porté des blocs (m)
H_w	: Profondeur d'eau dans le puits (m)
K_r	: Coefficient de stabilité
L	: Longueur du bloc (m)
L_c	: Longueur de la crête de la hausse fusible (m)
L_w	: Longueur du puits (m)
M_G	: Moment du Poids propre du bloc (N.m)
M_{G_e}	: Moment du Poids de l'eau sur le sommet du bloc (N.m)
M_P	: Moment de la Pression hydrostatique appliquée sur sa face amont du bloc (N.m)
M_{W_e}	: Moment de la Pression exercée par l'eau sur la base du bloc (N.m)
P	: Hauteur amont des parois (m)
P	: Pression hydrostatique appliquée sur sa face amont du bloc (N)
Q	: Débit qui transite sur le déversoir (m ³ /s)
R	: Rayon du quart de cercle (m)
V_b	: Volume d'eau dans le godet (m ³)

NOTATIONS

V_c	: Volume du matériau dans la base (m ³)
V_S	: Volume du matériau dans le godet (m ³)
w	: Hauteur de déversoir du fond du canal jusqu' à la crête (m)
W	: Largeur de la hausse fusible (m)
W_w	: Largeur du puits (m)
W_∞	: Pression exercée par l'eau sur la base du bloc (Sous-pression)
X	: Largeur du chanfrein (m)
XG	: Bras de levier de la force de du poids de l'eau (m)
XGe	: Bras de levier de la force de du poids de bloc (m)
XW	: Bras de levier de la force de sous pression (m)
Y	: Hauteur du chanfrein (m)
YP	: Bras de levier de la force hydrostatique (m)
X_{w_∞}	: Bras de levier de la force de Pression exercée par l'eau sur la base du bloc
Yb	: Bras de levier de la force de l'eau dans le godet (m)
YC	: Bras de levier du matériau dans la base (m)
Yg	: Bras de levier de la base et du godet (m)
YS	: Bras de levier du matériau dans le godet (m)
Yu	: Bras de levier au centre de gravité de la pression (m)
Yw	: Bras de levier de la force de l'eau dans le puits (m)
γ_e	: Poids volumique d'eau (kg/m ³)
γ_b	: Poids volumique du béton (kg/m ³)
ρ_c	: Densité du matériau dans la base (kg/m ³)
ρ_s	: Densité du matériau dans le godet (kg/m ³)
ρ_w	: Densité d'eau (kg/m ³)

Conclusion générale

Les blocs fusibles représentent une solution économique pour les retenues des barrages existants qui représentent une insuffisance de capacité de stockage, ou une insuffisance de la capacité de leurs déversoirs. Plusieurs solutions sont proposées pour palier à cette problématique, on peut citer quelques solutions qui sont de pointes telles que les PK-Weir, les hausses fusibles, les déversoirs en labyrinthe et les blocs fusibles. La pose des blocs fusibles sur le seuil d'un déversoir existant permet l'accroissement de capacité de retenue, aussi, le rabaissement du niveau du seuil existant d'une certaine hauteur qui va être remplacée par des blocs auto-stables permet l'accroissement du débit évacué.

L'objectif initial de ce travail, est de vérifier l'effet de la forme de l'arête amont du bloc fusible sur l'écoulement avant leur basculement. Pour atteindre cette objectif le présent travail a été scindé en trois partie.

Une étude bibliographique qui s'est intéressée de passer en revue les différents travaux de recherche qui ont été effectués dans le domaine des déversoirs auto-stables, cette étude a montré que les blocs fusibles non été étudiés que récemment par quelques auteurs.

Le laboratoire Aménagements Hydrauliques et Environnement de l'université de Biskra a pris en charge des études détaillées sur ce type de déversoir à cause de sa forme géométrique simple et le coût réduit de construction et de reconstruction des blocs basculés.

L'étude théorique a permis de présenter la méthode de pré-dimensionnement des blocs par voie mathématique qui permet de calculer la largeur des blocs fusibles pour une hauteur d'eau donnée au-dessus du bloc.

L'étude théorique du présent travail a permis de déterminer la relation entre les différents paramètres géométriques des blocs fusibles, à partir de la méthode de dimensionnement théorique développée précédemment par d'autres auteurs, cette dernière se base sur le principe de la stabilité limite, en prenant compte des deux formes choisies de l'arête amont du bloc (chanfrein et arrondie).

L'étude expérimentale a été effectuée sur deux formes des blocs fusibles, la première à arête amont chanfreinée en deux séries de cinq blocs et la deuxième à arête arrondie avec le même nombre de séries et de modèles réduits.

Conclusion Générale

Cette étude a été menée en deux phases. La première phase a concerné la vérification du coefficient de débit d'un déversoir qui comporte une série de cinq blocs de même forme, et la seconde phase d'essai a été réalisée pour déterminer la hauteur de basculement.

Les résultats obtenus ont montré que le coefficient de débit des deux séries de chaque forme chanfreinée et arrondie augmente avec l'accroissement de la charge, en particulier pour les grandes charges sur le déversoir, tandis que les blocs basculent avant d'atteindre la hauteur d'eau de basculement prévue par les calculs théoriques.

La comparaison des résultats montre que le déversoir qui se distingue par des blocs fusibles à arête amont chanfreinée de 2cm donne des valeurs meilleures du coefficient de débit.

La vérification expérimentale des résultats obtenue par voie théorique a montré un bon accord entre les deux méthodes théorique et expérimentale, l'écart le plus remarquable est d'environ 9%, et ne concerne que quatre blocs, tandis qu'il ne dépasse pas 5%.

Les valeurs approchées du coefficient de débit des quatre séries de modèles testés pour des charges similaires aux charges de basculement des blocs font remarquer qu'il n'y a pas d'impact apparent de la forme sur la charge de basculement. Ceci permet de dire qu'il est plus convenable de choisir des blocs avec une arête amont perpendiculaire (forme rectangulaire) à cause de sa simplicité de point de vue fabrication des blocs.

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.
- 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).
- 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.
- Ho Ta Khanh M., (2009) VNCOLD (Vietnam), Increasing the capacity of Small reservoirs by concrete fuseplugs: The Saloun Dam, ICOLD Congress Brasilia.
- Le Blanc M., (2006). Raising a silted reservoir as an alternative to dredging: The example of Ghrib dam, Algeria Hydroplus, France.
- Lempérière F., Vigny J.P., (2006). Economie et sécurité des déversoirs du Burkina Faso. 1er congrès national des barrages Burkina Faso.
- Lempérière F., Ouamane A., (2003). The Piano Keys Weir: a new cost-effective solution for spillways, The International Journal on Hydropower & Dams, Issue Four.
- Monteil E. S., Piedrahita de Leon R, Le Blanc M., (2009), Maximizing the benefits of urra dam, Colombia. Hydropower & Dams, Issue Three.

Références bibliographiques

- Ouamane A cours Barrage. (2007).
- 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., (2016), Contribution à l'étude des déversoirs auto-stables, Thèse de magister (Biskra)
- Tullis J. P., Amanian N., Waldron D., 1995. Design of Labyrinth Spillways, Journal of hydraulic engineering, Vol. 121, N°3, pp. 247-255.
- Vigny J.P., (2006), Performance, coût, et limites d'emplois de divers déversoirs fusibles ou labyrinthes, Vingt Deuxième Congrès des Grands Barrages, Barcelona, Q84.