

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra

Faculté des Sciences et de la technologie

Département de Génie civil et d'Hydraulique

Réf :



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

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de
Magister

Spécialité : **Hydraulique**

Option : **Hydraulique Urbaine et Ouvrages**

Thème

Contribution à l'étude des déversoirs auto-stables

Présenté par :

SEKKOUR ILYESE

Soutenu publiquement le :

Devant le jury composé de :

Président : DEBABECHE Mahmoud

Professeur

Université de Biskra

Rapporteur : OUAMANE Ahmed

Professeur

Université de Biskra

Examineur : BENMEBAREK Naima

Professeur

Université de Biskra

Examineur : BOUZIANE Med.Tewfik

Professeur

Université de Biskra

Résumé

Les barrages réservoirs sont conçus pour stocker un volume d'eau limité tout en assurant le passage des crues extrêmes prévues. Cependant, l'expérience acquise dans le domaine de la gestion des barrages a montré d'une part que la plupart des barrages ont été affectés par un envasement précoce de leurs retenues et d'autre part que la capacité des évacuateurs de crues d'un grand nombre de barrages est insuffisante. Ces deux problèmes engendrent simultanément une réduction de la capacité de stockage et affecte la sécurité du barrage.

Il est possible de trouver des alternatives qui permettent de compenser la capacité de stockage perdue et d'augmenter le degré de sécurité des barrages existants.

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

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 aux autres, ce qui entraîne l'ouverture de chaque élément pour un niveau d'eau amont différent. Ainsi le débit aval augmente donc progressivement.

Le présent travail représente une étude théorique et expérimentale qui a permis d'aboutir à une approche de pré-dimensionnement du déversoir en blocs fusibles.

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

Abstract

Reservoirs dams are designed to store a limited amount of water while ensuring the passage of extreme floods expected. However, experience in the field of management of dams showed firstly that most dams were affected by early siltation of their deductions and secondly that the capacity of a spillway large number of dams is insufficient. These two problems create a simultaneous reduction of the storage capacity and affect the safety of the dam.

It is possible to find alternatives that can compensate for the lost storage capacity and increase the level of safety of existing dams.

One possible solution is the rehabilitation of the spillway by raising the threshold by the spillway fuse devices to increase the storage capacity or throughput to evacuate.

The fuse plugs are a new economic system self-stable weir allowing increased storage capacity and flow evacuate.

The principle of this system is to place concrete blocks independent of each other, side by side on the spillway sill. These elements have characteristics somewhat different from one another, which lead to the opening of each element to a different upstream water level, and the downstream flow thereby increasing gradually.

The present work is theoretical and experimental studies that lead to an approach to pre-sizing of weir fuse plugs.

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

ملخص

تم تصميم الخزانات والسدود لتخزين كمية محدودة من المياه مع ضمان مرور الفيضانات الشديدة المتوقعة، ومع ذلك أظهرت الخبرة في مجال إدارة السدود أولاً أن معظم السدود تأثرت بترسب الطمي في وقت مبكر من الحجز، وثانياً أن قدرة قناة تصريف عدد كبير من السدود غير كافية. هاتين المشكلتين في وقت واحد خلقت الحد من القدرة على التخزين وتؤثر على سلامة السد.

يمكن أن نجد البدائل التي يمكن أن تعوض سعة التخزين المفقودة وزيادة درجة سلامة السدود القائمة. أحد الحلول الممكنة هو إعادة تأهيل المفيض من خلال رفع عتبة الهدار بواسطة أجهزة صمامات لزيادة سعة التخزين أو التصريف.

الكتل الصمامة هو نظام جديد اقتصادي من الهدارات ذاتية الاستقرار تتيح زيادة سعة التخزين وتدفق التصريف. مبدأ هذا النظام هو وضع كتل خرسانية مستقلة عن بعضها البعض، جنباً إلى جنب على عتبة الهدار. هذه العناصر لها خصائص مختلفة نوعاً ما عن بعضها البعض، مما يؤدي إلى فتح كل عنصر عند مستوى مختلف للماء في المنبع وبالتالي تدفق المصبب يزداد تدريجياً. العمل الحالي يمثل الدراسة النظرية والتجريبية التي أتاحت الوصول إلى مقارنة أولية لحساب أبعاد هدارات الكتل الصمامة.

كلمات مفتاحية: السد، سعة التخزين، هدار، نظام صمامات، كتل صمامات، نظام مستقر ألياً.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents

A mes chères frères et sœurs

A tous mes amis et tous ceux qui m'ont encouragé à finir ce mémoire de magister.

Remerciements

Merci beaucoup à Dieu, qui m'a donné la santé, la volonté et la patience pour terminer ce travail.

Tout d'abord, je tiens à remercier mon promoteur OUAMANE Ahmed professeur à l'université de Biskra pour son aide précieuse, sa patience et pour le temps qu'il m'a consacré durant la réalisation de ce travail.

Mes remerciements vont à tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner et d'apprécier notre travail.

J'adresse mes sincères remerciements à Sahraoui, Bassem et Adel, pour leurs aides et leurs encouragements.

Table de matières

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

CHAPITRE I

ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES DEVERSOIRS AUTO STABLES

I.1 Généralités sur les déversoirs	03
I.2 Déversoirs rectiligne	03
I.2.1 Déversoir en mince paroi	03
I.2.2 Déversoir à seuil épais	04
I.3 Déversoir non rectiligne	05
I.3.1 Déversoir labyrinthe	05
I.3.2 Déversoir en touche de Piano (PK-Weir)	07
1)-PK-Weir type A	07
2)-PK-Weir type B	08
I.4 Déversoirs auto stables	09
I.4.1 Hausses fusibles	09
I.4.1.1 Différents types des hausses fusibles	09
a- Les hausses fusibles à seuil labyrinthe	10
b- Hausses fusibles à seuil rectiligne	12
- Hausses destinées aux très fortes lames d'eau	12
- Hausses spéciales dites "grand froid"	13
- Hausses fusibles de sécurité	13
- Hausses rabattables	13
I.4.1.2 Puits d'alimentation	14
I.4.1.3 Lest d'équilibrage des hausses	15
I.4.1.4 Chambre de mise en pression	15
I.4.2 Domaines d'application des hausses fusibles	15
I.4.2.1 Augmentation de la capacité de stockage des barrages	15
I.4.2.2 Amélioration de la sécurité des évacuateurs de crues	16
I.4.2.3 Moyen de sécurisé un système vanné	17
I.4.2.4 Régulation de l'écoulement dans les rivières	17
I.4.3 Principe de fonctionnement des hausses fusibles	17
I.4.3.1 Caractéristiques du débit	19

I.4.3.2 Stabilité des hausses	21
I.4.3.3 Principes de dimensionnement	21
a. Dimensionnement hydraulique	21
b. Dimensionnement mécanique	22
I.4.3.4 Analyse de la stabilité	22
a. Stabilité au renversement	23
b. Stabilité au glissement	26
I.4.3.5 Effet de la glace	26
I.4.3.6 Effet des séismes	27
I.4.4 Les Blocs fusibles	27
I.4.4.1 Définition	27
I.4.4.2 Blocs fusibles sans sous-pression	28
I.4.4.3 Les blocs fusibles avec sous-pression	28
I.4.4.4 Dimensionnement des blocs	31
I.4.4.5 Construction des blocs fusibles	32
I.4.5 CONCLUSION	33

CHAPITRE II

Etude théorique

II.1 Introduction	35
II.2 Description des blocs fusibles	35
II.3 Objectif de conception des blocs fusibles	36
II.3.1 Augmentation de la capacité des barrages	37
II.3.2 Amélioration de la sécurité des évacuateurs de crues	37
II.4 Principe de fonctionnement des blocs fusibles	38
II.5 Pré-dimensionnement des blocs fusibles	39
II.5.1 Dimensionnement hydraulique	40
II.5.2 Dimensionnement mécanique	40
II.5.3 Hauteur des blocs fusibles	40
II.5.4 Largeur des blocs	41
II.5.5 Développement théorique pour le dimensionnement d'un bloc fusible	41
II.5.5.1 Stabilité au glissement	43
II.6 Conclusion	43

CHAPITRE III
Etude expérimentale

III.1 Introduction	44
III.2 Lois de similitude	44
III.2.1. Similitude géométrique	44
III.2.2 Similitude cinématique	44
III.2.3 Similitude dynamique	45
III.2.3.1. Similitude de Reech-Froude	45
III.2.3.2. Similitude de Reynolds	44
III.3 Description de la station d'expérimentation des modèles réduits	47
III.3.1 Mesure de la hauteur d'eau sur les blocs	49
III.3.2 Appareillage de mesure du débit qui transite sur les blocs	50
III.4 Dispositif expérimental	50
III.4.1 Modèles réduits des blocs fusibles	50
III.4.1.2 Socle de basculement des blocs	52
III.4.1.3 Mur de séparation	52
III.5 Déroulement des essais	53
III.5.1 Préparation du modèle	53
III.5.2 Description de la procédure expérimentale	53
III.6 Résultats et discussion	56
III.6.1 Description d'écoulement	56
III.6.2 Vérification expérimentale du coefficient de débit	56
III.6.2 Détermination de la relation entre la hauteur de basculement et largeur du bloc	58
III.6.3 effet de la disposition des blocs sur le seuil selon leur largeur	62
III.6 Conclusion	65
Conclusion générale	66
Références bibliographique	70

Liste des figures

CHAPITRE I

ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES DÉVERSOIRS AUTO STABLES

Figure I.1 Déversoir rectiligne à échancrure rectangulaire	03
Figure I.2 Déversoir en mince paroi standard	04
Figure I.3 Déversoirs à seuil épais	05
Figure I.4 Définition des paramètres du déversoir en labyrinthe (Lux et al, 1984)	06
Figure I.5 Vue en perspective d'un déversoir labyrinthe	06
Figure I.6 Déversoir en touches de piano (PK-Weir) sur le barrage de Goulours (EDF- Electricité de France. Octobre 2006)	07
Figure I.7 PK-Weir de type A (Lempérière et al, 2003)	08
Figure I.8 PK-Weir de type B (Ouamane et al. 2006c)	08
Figure I.9 vue amont d'une hausse fusible	10
Figure I.10 Hausses fusibles à seuil labyrinthe sur le 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 aval des hausses grand froid	13
Figure I.16 type de hausses en fonction du rapport h/H (Hasan T. Kocahan, 2006)	13
Figure I.17 photo et schémas représentatifs des hausses rabattables (Hydroplus)	14
Figure I.18 schémas de fonctionnement des hausses rabattables (Hydroplus)	14
Figure I.19 Puits d'alimentation solidaire de la hausse (en acier)	15
Figure I.20 Augmentation de la capacité des barrages	16
Figure I.21 Amélioration de la sécurité des évacuateurs de crues	17
Figure I.22 Hausse fusible avec déversement sur la crête pour une crue modérée	18
Figure I.23 Hausse fusible avec déversement est remplissage du puits pour une crue importante	18
Figure I.24 Hausse fusible avec mise en pression de la chambre et basculement	19
Figure I.25 Coefficient de débit pour les trois configurations des hausses fusibles	

en fonction de la charge relative h/H (Falvey et al, 1995)	20
Figure I.26 Forces agissant sur une hausse fusible (Falvey et al, 1995)	23
Figure I.27 Moments dans la hausse fusible Model WLH (Falvey et al, 1995)	24
Figure I.28 Effet de glace sur la hausse fusible	26
Figure I.29 Vue en perspective d'un déversoir Blocs fusibles	28
Figure I.30 Blocs sans sous-pression et basculement avant déversement	28
Figure I.31 Vue en perspective d'un des deux modèles des blocs fusibles avec sous-pression	29
Figure I.32 Bloc avec sous-pression et déversement avant basculement	29
Figure I.33 Géométrie d'un bloc fusible avec sous-pression	30
Figure I.34 Disposition générale et murs séparateurs	31
Figure I.35 blocs fusibles sur un seuil avec des murs séparateurs	31
Figure I.36 Diagramme de stabilité	32
Figure I.37 bloc fusible placé sur un seuil après un arasement	32
Figure I.38 phases de placement du bloc sur un seuil	33

CHAPITRE II

Etude théorique

Figure II.1 Schéma descriptif d'un bloc fusible	36
Figure II.2 Arasement du seuil pour l'emplacement des blocs fusible	36
Figure II.3 Blocs fusibles pour augmenter la capacité des barrages	37
Figure II. 4 Blocs fusibles pour améliorer la sécurité des évacuateurs de crues	38
Figure II.5.a Bloc fusible fonctionne comme un barrage	38
Figure II.5.b Bloc fusible fonctionne comme un déversoir	39
Figure II.5.b Bloc fusible fonctionne comme un déversoir	39
Figure II.6 Schéma de calcul de stabilité du bloc fusible	41

CHAPITRE III

Etude expérimentale

Figure III.1 Vue d'ensemble de la station d'expérimentation des modèles réduits	47
Figure III.2 Vue de l'aval du modèle de déversoir à la station d'expérimentation	48
Figure III.3 Schéma de station d'expérimentation. (Vue en plan)	48
Figure III.4 Schéma du dispositif expérimental (Vue de profil)	49
Figure III.5 Tableaux des manométriques de mesure des niveaux d'eau	49
Figure III.6 Débitmètre à ultrason Flowmeter 93W2	50
Figure III.7 Vue amont du modèle de déversoir pour un bloc	52
Figure III.8 Vue aval du modèle de déversoir pour un bloc	52
Figure III.9 Support métallique avec murs séparateurs	53
Figure III.10 Système d'étanchéité du bloc	53
Figure III.11 Vue de l'aval de l'écoulement sur le bloc fusible avant basculement	54
Figure III.12 Vue de l'aval d'un support qui se compose de trois blocs	54
Figure III.13 Installation des trois blocs sur le déversoir	55
Figure III.14 déversoir à seuil épais en écoulement dénoyé	56
Figure III.15 le coefficient de débit en fonction de la hauteur d'eau sur les blocs	57
Figure III.16 Courbe pratique de la variation de la charge de basculement en fonction de la largeur de bloc	59
Figure III.17 Courbe théorique de la variation de la charge de basculement en fonction de la largeur de bloc	59
Figure III.18 Variation de la hauteur de basculement en fonction de la variation du poids volumique	60
Figure III.19 Comparaison entre la charge théorique et pratique	61
Figure III.20 Schéma d'alignement d'une série de trois blocs sur le seuil	62
Figure III.21 Disposition direct et inverse des blocs de la série (01)	63
Figure III.22 Disposition direct et inverse des blocs de la série (02)	63
Figure III.23 Disposition direct et inverse des blocs de la série (03)	64

Liste des tableaux

CHAPITRE I

ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES DÉVERSOIRS AUTO STABLES

Tableau I.1 Charge de basculement en fonction du rapport largeur/hauteur	11
--	----

CHAPITRE III

Etude expérimentale

Tableau III.1 Caractéristiques initiales des modèles réduits des blocs	51
Tableau III.2 Caractéristiques réelles des modèles réduits après leur fabrication	51
Tableau III.3 Caractéristiques des modèles des blocs de la première série (01)	55
Tableau III.4 Caractéristiques des modèles des blocs de la deuxième série (02)	55
Tableau III.5 Caractéristiques des modèles des blocs de la troisième série (03)	55
Tableau III.6 le coefficient de débit du déversoir porté des blocs fusibles	57
Tableau III.7 Hauteurs d'eau sur les blocs obtenus expérimentalement	58
Tableau III.8 Caractéristiques géométriques et résultats théoriques et pratiques des essais obtenus sur les neuf blocs	58
Tableau III.9 Caractéristiques du bloc à charge d'eau nulle	61
Tableau III.10 Caractéristiques des blocs de la première série en disposition direct et inverse	62
Tableau III.11 Caractéristiques des blocs de la deuxième série en disposition direct et inverse	63
Tableau III.12 Caractéristiques des blocs de la troisième série en disposition direct et inverse	64

NOTATIONS

A	: Demi-longueur des parois frontales (m)
Ac	: Surface de la chambre du fond (m ²)
B	: Largeur de la crête (m)
b	: Largeur du déversoir (m)
b	: largeur du bloc (m)
B	: Longueur du mur latéral (m)
Cd	: Coefficient de débit
Ce	: Coefficient de correction
D	: Hauteur aval des parois(m)
Fg	: Force nette manifestée par le poids du godet et la base (N)
Fr	: Nombre de Froude
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'	: Hauteur d'eau à l'aval par rapport au seuil du bloc (m)
\bar{h}_{pr}	: Hauteur moyenne calculée pour une série d'essais d'un bloc (m)
H	: Hauteur piézométrique en amont (m)
H	: Hauteur de la hausse fusible (m)
H	: Hauteur du bloc (m)
H'	: Charge totale sur le déversoir à seuil porté des blocs (m)
Ho	: Charge totale de chute (m)
Hd	: Hauteur piézométrique en aval (m)
Hw	: Profondeur d'eau dans le puits (m)
Kr	: Coefficient de stabilité
L	: Longueur du bloc (m)
L	: Longueur d'un cycle de crête (m)
L1, L2	: les dimensions linéaires dans le prototype et le modèle (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_{Ge}	: 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)
$M_{w\infty}$: 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)
Re	: Nombre de Reynolds,
t_1	: Temps mis à parcourir la distance L_1 dans le prototype (s)
t_2	: Temps mis à parcourir la distance L_2 homologue de L_1 dans le modèle (s)
T	: Epaisseur du mur (m)
v_1, v_2	: Vitesses d'écoulement dans le prototype et le modèle (m/s)
V_b	: Volume d'eau dans le godet (m ³)
V_c	: Volume du matériau dans la base (m ³)
V_S	: Volume du matériau dans le godet (m ³)
W	: Largeur de cycle (m)
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_G	: Bras de levier de la force de du poids de l'eau (m)
X_{Ge}	: Bras de levier de la force de du poids de bloc (m)
Y_P	: Bras de levier de la force hydrostatique (m)
X_W	: Bras de levier de la force de sous pression (m)
$X_{w\infty}$: Bras de levier de la force de Pression exercée par l'eau sur la base du bloc
Y_b	: Bras de levier de la force de l'eau dans le godet (m)
Y_C	: Bras de levier du matériau dans la base (m)
Y_g	: Bras de levier de la base et du godet (m)
Y_S	: Bras de levier du matériau dans le godet (m)
Y_u	: Bras de levier au centre de gravité de la pression (m)
Y_w	: Bras de levier de la force de l'eau dans le puits (m)

γ	: Poids volumique d'eau (kg/m ³)
γ_b	: Poids volumique du béton (kg/m ³)
α	: Angle du mur (°)
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)
λ	: Echelle du modèle
λ_q	: Echelle des débits
λ_t	: Echelle des temps
λ_v	: Echelle des vitesses
λ_γ	: Echelle des accélérations
λ_ν	: Rapport du coefficient de viscosité cinématique

Introduction Générale

Introduction générale

Les barrages participent d'une manière fondamentale à la satisfaction des différents besoins en eau par le stockage d'un volume d'eau limité, Ceci nécessite une obturation de l'écoulement du cours d'eau et par conséquent, l'accumulation d'une énergie hydraulique très importante. Cette énergie hydraulique peut présenter pendant une crue extrême un risque pour les personnes et les biens en cas d'accident survenu au barrage. Ainsi la sécurité du barrage doit être assurée par un dispositif qui permet le passage des crues extrêmes.

Ce dispositif, appelé généralement évacuateur de crue représente l'ouvrage principal de protection du barrage contre les effets des crues. Cependant, le coût de cet ouvrage reste une préoccupation majeure pour les concepteurs.

Une nouvelle solution qui permet de réduire le coût d'évacuateur de crue sans pour autant réduire son efficacité a été mise au point récemment.

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

Les éléments qui appartiennent aux déversoirs auto stables sont simples et sûrs par rapport aux autres déversoirs tels que les déversoirs vannés, en raison de leur principe de fonctionnement qui ne nécessite pas d'intervention humaine et sans utilisation d'énergie.

Le dimensionnement des blocs fusibles signifie la méthode de calcul de ses dimensions d'une façon qui assure son bon fonctionnement. Les blocs ont la même hauteur et la même longueur, ces dimensionnements dépendent de la lame déversante sur le bloc, selon l'importance de débit évacué et la longueur du seuil du déversoir.

La largeur du bloc est différente d'un bloc à un autre de façon à permettre le basculement de chaque élément à partir d'une charge d'eau limitée.

Les blocs fusibles comme une alternative de réhabilitation n'ont pas encore été suffisamment étudiés d'une manière qui permet d'aboutir à une forme géométrique optimale.

Ainsi, le présent travail représente une étude théorique et expérimentale qui permet d'aboutir à une approche de pré-dimensionnement du déversoir en blocs fusibles. Cette étude se base essentiellement sur le principe de la stabilité limite et l'expérimentation sur des modèles réduits.

La forme géométrique simple et le coût réduit de construction et de reconstruction des blocs perdus, nous a incité à mettre en évidence et étudier ce type de système. Cette étude a été opérée par le biais d'étude théorique basée sur le principe de la stabilité limite qui est validée par une étude expérimentale menée sur plusieurs modèles réduits de blocs fusibles différents pour parvenir à déterminer les dimensions appropriées de chaque bloc.

La méthode de dimensionnement théorique basée sur le principe de la stabilité limite aide à déterminer les premières dimensions des blocs, qui seront vérifiés par des essais expérimentaux pour aboutir à une approche théorique de pré-dimensionnement du déversoir en blocs fusibles.

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

- Le premier axe sera spécifique à une étude bibliographique détaillée sur 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 deuxième axe représente une étude théorique pour identifier une méthode de pré-dimensionnement des blocs fusibles. Le type de système auto-stable qui fera l'objet d'étude correspond aux blocs fusibles pourvus de sous-pression.
- Le troisième axe se rapporte à une étude expérimentale qui permettra l'expérimentation des blocs qui ont été dimensionnés par la méthode développée dans la partie théorique. L'interprétation et la confrontation des résultats expérimentaux avec la méthode théorique permettent de vérifier et de corriger la théorie par rapport au cas réel.

Chapitre I

Etat des Connaissances sur Les
Déversoirs Auto stables

CHAPITRE I

ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES DÉVERSOIRS AUTO STABLES

I.1 Généralités sur les déversoirs

Les déversoirs auto-stables (fusibles) présentent un système de surélévation efficace, sous forme d'un ouvrage supplémentaire qui s'ajoute au-dessus d'un seuil du déversoir pour améliorer leur efficacité hydraulique ou pour augmenter le volume de stockage d'une retenue. Ce chapitre présente un état de connaissance sur les déversoirs auto-stables prévenu par un rappel concis des différents types des déversoirs à surface libre.

I.2 Déversoirs rectilignes

Ce type de déversoirs se caractérise 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.

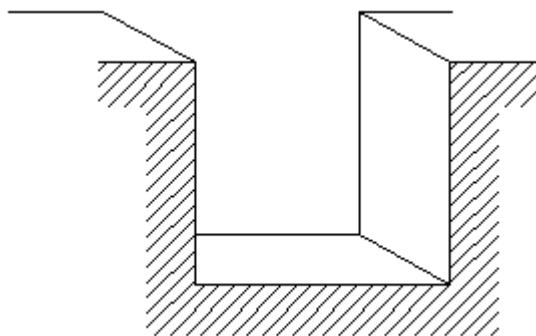


Figure I.1 Déversoir rectiligne à échancrement rectangulaire

I.2.1 Déversoir en mince paroi

Le déversoir est appelé à mince paroi, si l'épaisseur de la crête est inférieure à la moitié, ou même quelquefois aux deux tiers de la charge d'eau sur le seuil, il peut être placé vertical ou incliné. Ce déversoir est caractérisé par la hauteur w du fond du canal jusqu'à la crête, sa largeur b et sa hauteur d'eau amont h figure (I.2). 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).

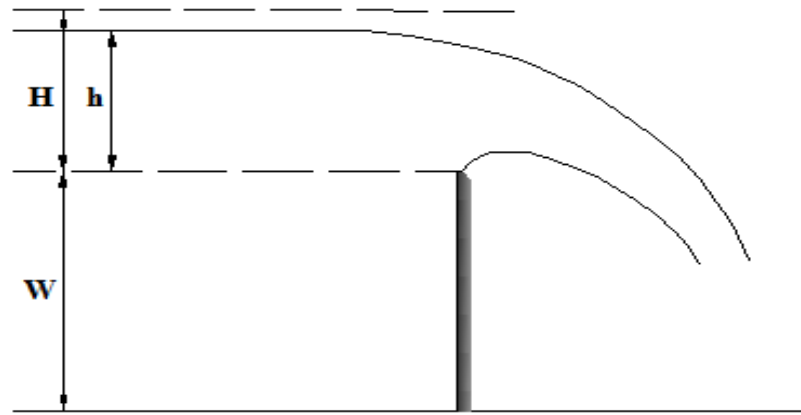


Figure I.2 Déversoir en mince paroi standard

Le déversoir à paroi mince a été étudié avec grand intérêt, notamment par Poleni (1683-1761). En se basant sur des diverses simplifications, le débit Q est corrélé avec la hauteur d'eau amont h par :

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

Q : Débit qui transite sur le déversoir,

b : Largeur de la crête,

h : Hauteur d'eau amont,

g : Accélération de la pesanteur.

I.2.2 Déversoirs à seuil épais :

Les déversoirs à seuil épais se caractérisent par un seuil large qui permet à la nappe déversante de prendre une forme régulière le long du seuil après l'abaissement du niveau d'eau, dans cette partie régulière les filets liquides sont parallèles et horizontaux. Ce type de déversoir à angles vifs, représenté dans la figure (I.3), peut s'imposer notamment pour des phases de construction des barrages en béton. Comparé au déversoir en mince paroi, deux paramètres supplémentaires relatifs à la pente amont θ et à la longueur de la crête L_e du déversoir doivent être considérés. Le calcul simplifié introduit un coefficient de correction C_e dans la formule générale du déversoir en mince paroi.

$$Q = C_d C_e \sqrt{2g} \cdot H^{3/2} \quad (\text{I.2})$$

Q : Débit évacué (m³/s),

H : Charge totale sur le déversoir (m),

C_d : Coefficient de débit,

C_e : Coefficient de correction,

b : Largeur du déversoir (m),

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

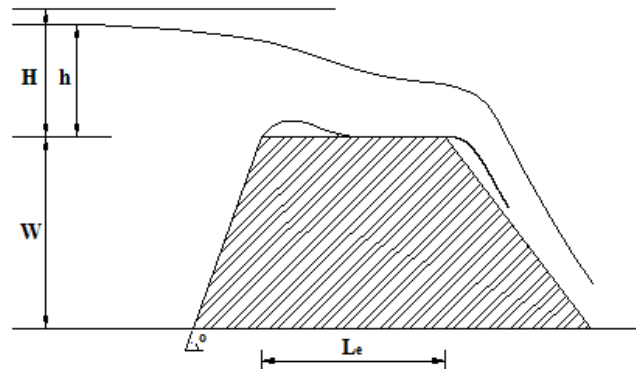


Figure I.3 Déversoirs à seuil épais

I.3 Déversoirs non rectilignes :

Les déversoirs non rectilignes sont caractérisés par un axe de crête discontinu en plan, ce qui donne à la crête une longueur plus importante que la largeur de l'emprise du déversoir. L'objectif est d'augmenter le débit par unité de largeur du déversoir pour une charge de fonctionnement donnée.

I.3.1 Déversoir labyrinthe :

Le déversoir en labyrinthe se caractérise par une forme en plan non linéaire représentée par une répétition de formes en plan le plus souvent trapézoïdale, triangulaire ou rectangulaire (figure I.4). Certainement, cette disposition augmente la longueur de la crête, par conséquent, le débit passant sur un déversoir en labyrinthe devrait augmenter d'une manière significative par rapport à un déversoir rectiligne de la même largeur et sous la même charge. Cependant, ceci n'est valable que pour les charges de dimensionnement relativement faibles (HINCHLIFF, 1984).

La géométrie en plan du déversoir en labyrinthe est définie par la longueur de crête d'un cycle L , la largeur d'un cycle W , la hauteur amont des parois P , la hauteur aval des parois D , le nombre de cycles n , l'angle α formé par la paroi latérale et la direction de l'écoulement.

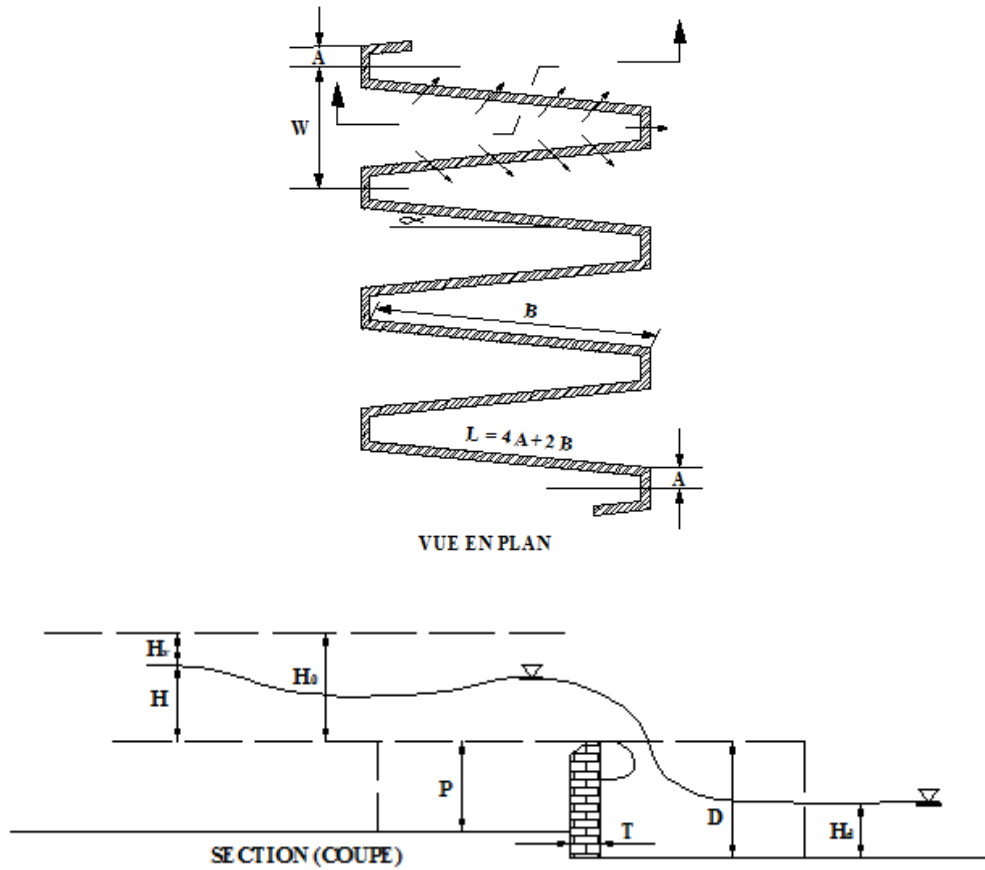


Figure I.4 Définition des paramètres du déversoir en labyrinthe (Lux et al, 1984)

A : Demi-longueur des parois frontales, H_0 : Charge total de chute,
 B : Longueur du mur latéral, H : Hauteur piézométrique en amont,
 α : Angle du mur, D : Hauteur aval des parois,
 W : Largeur de cycle, H_v : Charge cinétique d'approche en amont,
 L : Longueur d'un cycle de crête, H_d : Hauteur piézométrique en aval,
 P : Hauteur amont des parois, T : Epaisseur du mur.

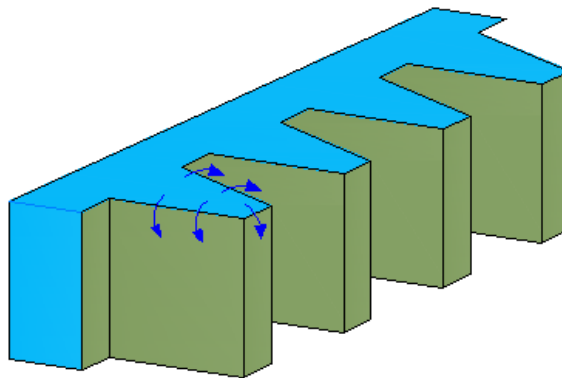


Figure I.5 Vue en perspective d'un déversoir labyrinthe

I.3.2 Déversoir en touche de Piano (PK-Weir)

Le déversoir en touches de piano représente une nouvelle forme de déversoir non rectiligne à écoulement libre. Ce type de déversoir a été baptisé Piano Key Weir, il a été développé par François Lempérière d'Hydrocoop (France) et Ahmed Ouamane du Laboratoire Aménagements Hydrauliques et Environnement de l'Université de Biskra (Algérie), il représente une alternative économique et efficace pour l'évacuation des crues et l'accroissement de la capacité des retenues des barrages (Lempérière et al, 2003).

Ce nouveau type de déversoir non rectiligne permet l'évacuation d'un débit spécifique multiplié par trois ou plus par rapport à celui d'un déversoir Creager pour la même largeur du déversoir et sous la même charge, il permet ainsi l'évacuation d'un débit jusqu'à $100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (Lempérière et al. 2003).

Le PK-Weir Peut être utilisé aux barrages en terres et sur des sections réduites de barrages poids existants ou nouveaux, sa construction est simple et facile et peut être réalisé par des ressources locales de chaque pays, il réduit considérablement le coût de construction de la plupart des nouveaux barrages.



Figure I.6 Déversoir en touches de piano (PK-Weir) sur le barrage de Goulours
(EDF- Electricité de France. Octobre 2006)

Les travaux de Lempérière et Ouamane (2003) ont défini deux types de PK-Weir, type A avec deux porte-à-faux en amont et en aval et le deuxième, type B avec uniquement des porte-à-faux en amont, ceci permet des gains importants de rendement supérieurs à 10% par rapport au type A, les efforts structurels sont moins importants pour les grands débits spécifiques.

1)- PK-Weir type A

Les porte-à-faux amont et aval sont identiques, ceci favorise l'utilisation des éléments préfabriqués en béton armé qui peuvent être utilisés pour des débits spécifiques jusqu'à $20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{ml}$. Ce type de PK-Weir peut être une solution pour l'amélioration de la capacité des retenues et/ou la capacité d'évacuation de plusieurs déversoirs des barrages existants (Lempérière et al. 2003).

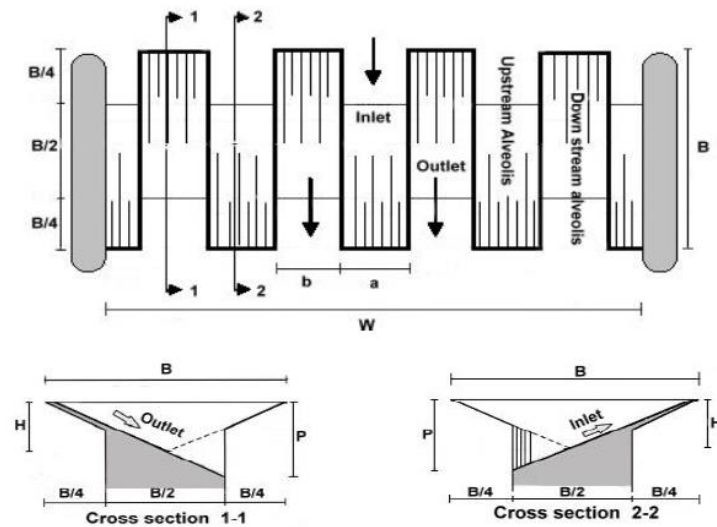


Figure I.7 PK-Weir de type A (Lempérière et al, 2003)

2)- PK-Weir type B

Ce type de PK-Weir se caractérise par des porte-à-faux uniquement en amont, des gains importants en rendement, d'environ 10 % par rapport au type A sont enregistrés (Ouamane, 2006b). Les efforts structuraux sont moins importants pour les grands débits spécifiques. Cela pourrait ainsi être le choix le plus attirant pour plusieurs barrages futurs.

Cependant, le modèle de type B ne favorise pas l'utilisation des éléments préfabriqués qui peuvent être financièrement avantageux pour des débits spécifiques inférieurs à $20\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$. Le modèle B est probablement plus intéressant pour les grands débits spécifiques (Ouamane et al. 2006c).

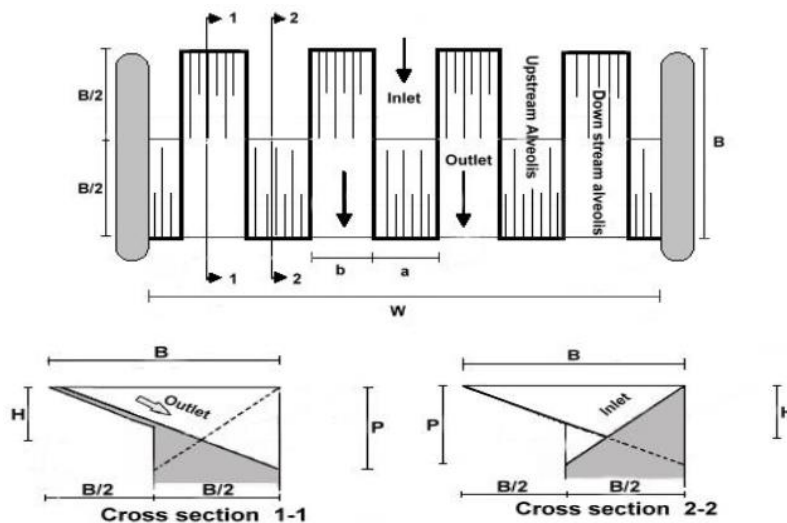


Figure I.8 PK-Weir de type B (Ouamane et al, 2006c)

I.4 Déversoirs auto stables

I.4.1 Hausses fusibles

Parmi les différents dispositifs auto-stables, les hausses fusibles représente une solution adéquate pour accroître le débit évacué d'un déversoir existant ou augmenter la capacité de stockage de la retenue d'un barrage existant. Ce système a été inventé par François Lempérière en 1989, puis a été breveté par Hydroplus aux Etats-Unis, en Europe et la plupart des autres pays (Falvey et al, 1995). Il a été appliqué sur plus de 40 barrages dans plusieurs pays. C'est un système simple, robuste et sûr, il est l'équivalent à 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.

Les hausses fusibles sont des modules indépendants placés sur le seuil libre du déversoir de manière à former un rideau étanche qui permet de relever le niveau normal de la retenue. Les hausses sont maintenues en place par gravité, l'étanchéité est assurée par des joints, d'une part entre les hausses et le seuil et d'autre part, entre les faces verticales des hausses.

Les hausses sont munies de butées sur le bord aval pour empêcher le glissement.

Le basculement des hausses est provoqué automatiquement à une cote précise prédéterminée par la mise en charge d'une chambre aménagée à la base des éléments. Un puits d'entrée sur le côté amont de la crête de la hausse fusible déverse l'eau dans la chambre, des purges drainent leurs interfaces avec le seuil évitant ainsi une mise en pression accidentelle.

Dans les conditions normales de fonctionnement, les hausses fusibles agissent comme une barrière étanche. Pour des niveaux modérés de réservoir, l'eau coule au-dessus de la crête des hausses fusibles d'une manière similaire à celle d'un déversoir à seuil libre. Si le niveau du réservoir dépasse une valeur prédéterminée, l'eau s'écoule dans le puits d'entrée et provoque une pression de soulèvement dans la chambre ce qui déstabilise la hausse fusible et la fait basculer.

I.4.1.1 Différents types des hausses fusibles

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

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

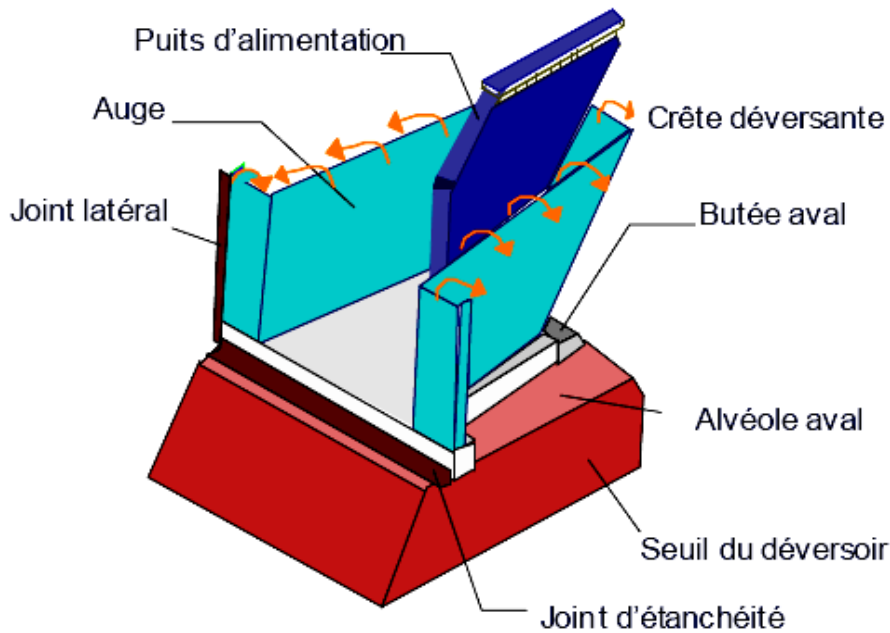


Figure I.9 Vue amont d'une hausse fusible

Toutefois, les hausses sont des éléments qui varient en forme et en dimensions selon l'endroit d'emplacement, et aussi elles varient en poids et en matériaux de fabrication.

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

a- Les hausses fusibles à seuil labyrinthe

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, elles peuvent évacuer des débits à des lames d'eau d'une hauteur comprise entre 30% à 140% de leur propre hauteur (Hasan T. Kocahan, 2006).



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

La hauteur de la hausse est généralement en fonction de l'objectif recherché. Elle est en général de l'ordre de 40% à 80% de la hauteur de la lame déversante en l'absence de hausse. Ainsi, trois configurations standard sont disponibles et sont en fonction de la hauteur de la hausse (Hasan T. Kocahan, 2006) : large (W : Wide) ou étroite (N : Narrow) et suivant la charge de basculement, basse charge (LH : Low Head) et charge élevée (HH : High Head). Les dispositifs de chacune de ses configurations sont donnés sur le tableau I.1, suivant :

Tableau I.1 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%)

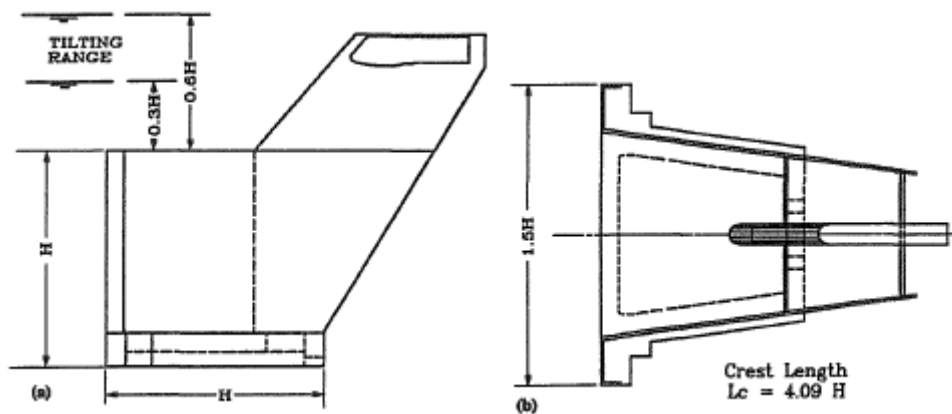


Figure I.11 Hausse labyrinthe à faible lame déversante (Falvey et al 1995)

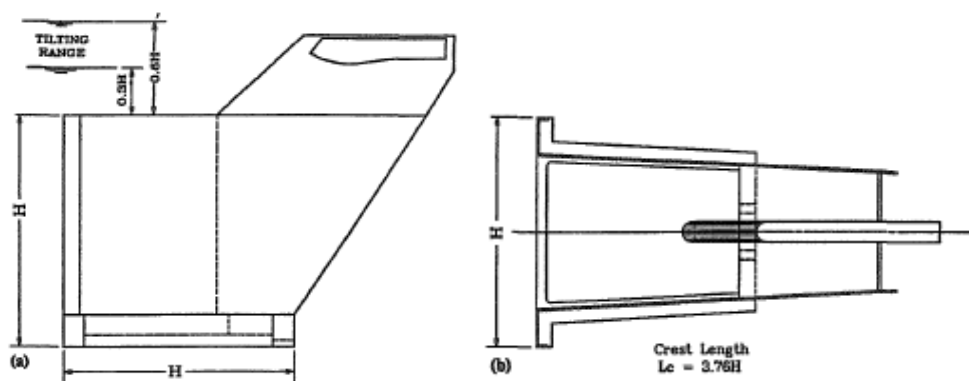


Figure I.12 Hausse labyrinthe à lame déversante modérée (Falvey et al 1995)

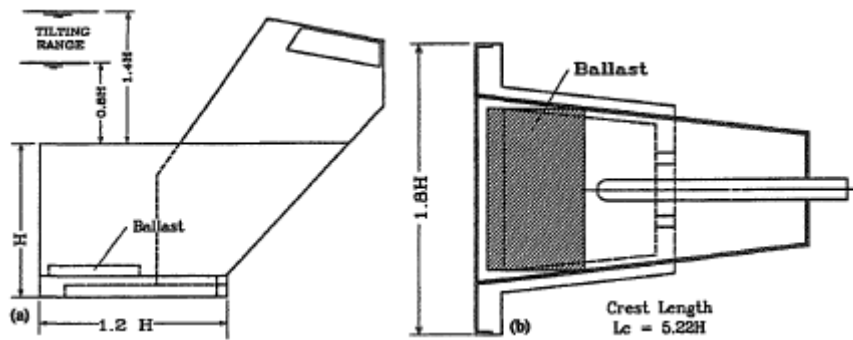


Figure I.13 Hausse labyrinthe à forte lame déversante (Falvey et al 1995)

La hausse de forme labyrinthe est construit en acier ou en béton, elle peut être également réalisée par les deux matériaux à la fois où l'auge est en acier et la chambre en béton, tandis que le puits doit être en acier, ce qui nécessite la protection des parties métalliques par des interventions périodiques de traitement contre la corrosion.

Dans certains cas, où l'accès au site est difficile, les hausses de poids très lourds peuvent être réalisées directement sur place en éléments préfabriqués assemblés sur le seuil.

b- Hausses fusibles à seuil rectiligne

- *Hausses destinées aux très fortes lames d'eau :*

Ces hausses sont utilisées pour supporter des lames d'eau arrivant jusqu'à quatre fois sa hauteur propre, elles se caractérisent par des grandes dimensions.

Ce type de hausse constitue un seuil de forme rectiligne à crête profilée qui permet d'obtenir le meilleur rendement.

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.14).



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

- *Hausses spéciales dites "grand froid" :*

Ces hausses sont conçues pour être utilisées dans des régions qui se caractérisent par des températures trop basses telles que les pays Scandinaves ou le Canada. Leur face amont est profilée et revêtue spécialement de manière à réduire le frottement et l'abrasion de la glace.

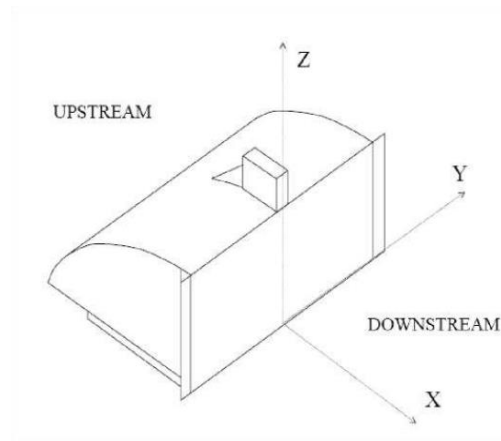


Figure I.15 Vue aval des hausses « grand froid »

- *Hausses fusibles de sécurité :*

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

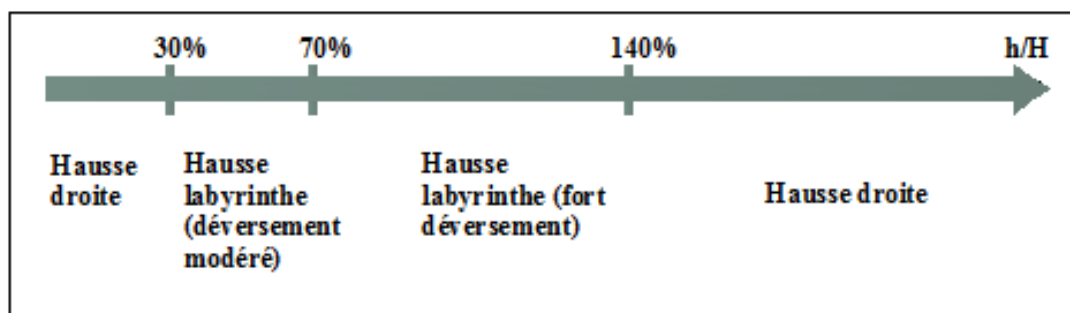


Figure I.16 Type de hausses en fonction du rapport h/H (Hasan T. Kocahan, 2006)

- *Hausses rabattables :*

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

crués normales par le rabatement progressif jusqu'à l'évacuation des grandes crues, puis le système revient à sa situation initial (Hydroplus).

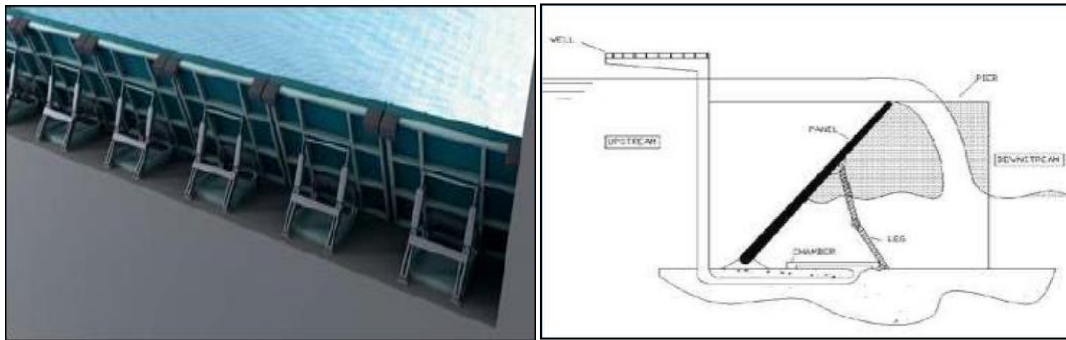


Figure I.17 photo et schémas représentatifs des hausses rabattables (Hydroplus)

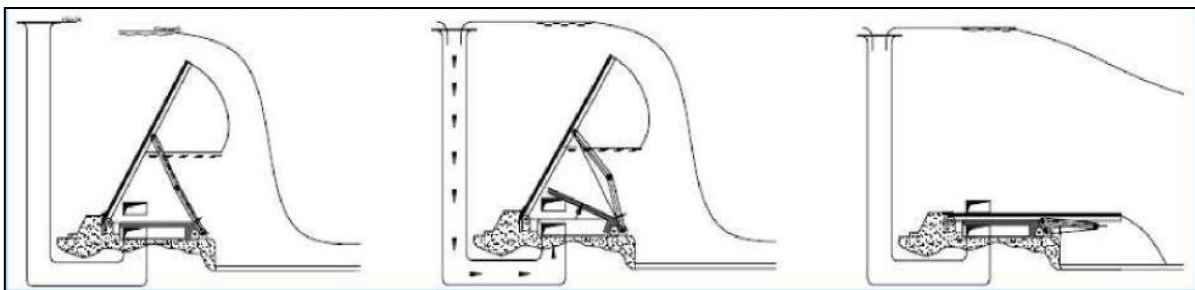


Figure I.18 Schémas de fonctionnement des hausses rabattables (Hydroplus)

I.4.1.2 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 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.19 Puits d'alimentation solidaire de la hausse (en acier)

I.4.1.3 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.4.1.4 Chambre de mise en pression

La chambre de mise en pression est l'endroit où se forme la force de sous pression, qui participe au déséquilibre de la hausse et puis à son basculement.

La chambre est fabriquée en acier ou en béton, elle est reliée directement avec le puits d'alimentation, qui fournit de l'eau lorsque sa hauteur dans le réservoir arrive au niveau de la 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).

I.4.2 Domaines d'application des hausses fusibles

I.4.2.1 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.

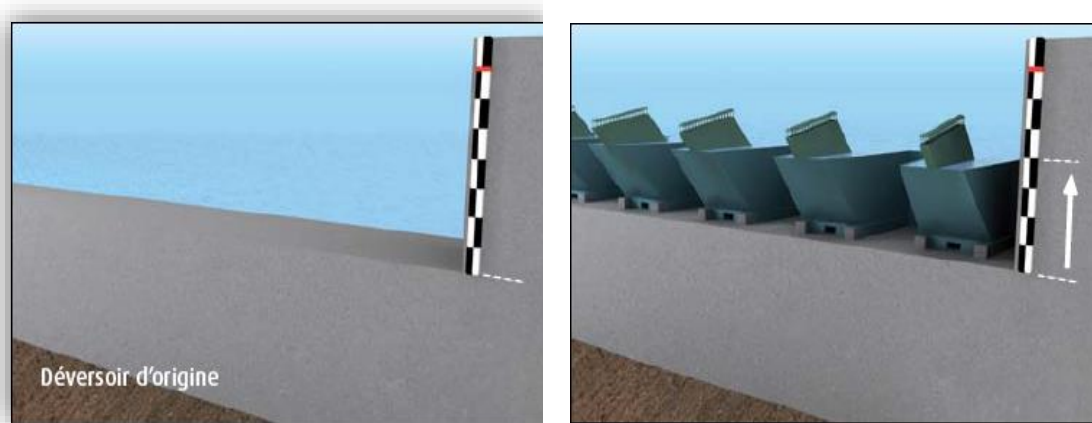


Figure I.20 Augmentation de la capacité des barrages (Hydroplus)

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

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

I.4.2.2 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).

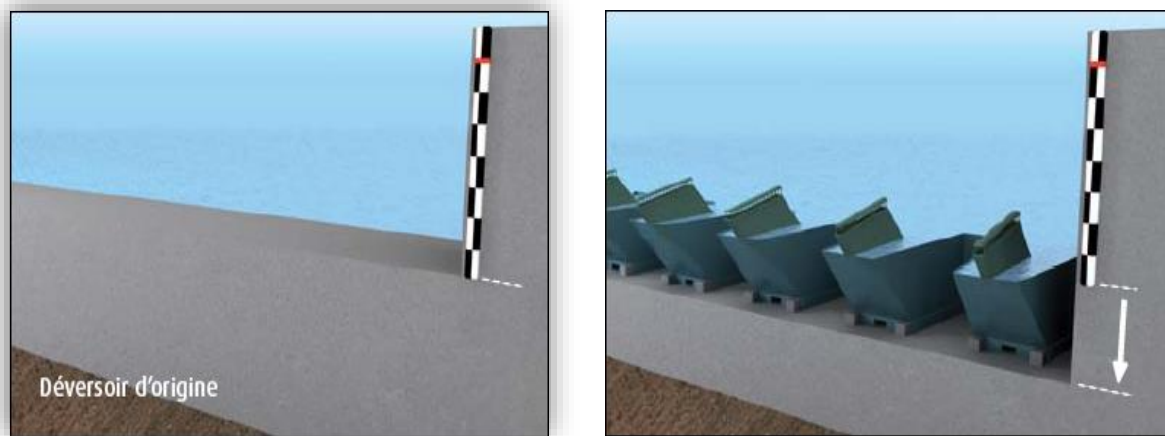


Figure I.21 Amélioration de la sécurité des évacuateurs de crues à seuil libre (Hydroplus)

I.4.2.3 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.4.2.4 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.4.3 Principe de fonctionnement des hausses fusibles

Les hausses fusibles placées au-dessus du seuil pour former un obstacle de hauteur d'un ou de plusieurs mètres qui empêche le passage d'eau, ces hausses sont automatiquement stables jusqu'à une certaine cote du plan d'eau amont.

La hausse bascule vers l'aval en cas de forte crue sans intervention humaine ou l'utilisation d'énergie, le basculement se fait successivement lorsque la hauteur de l'eau augmente dans la retenue, les éléments perdus ne sont pas récupérables, mais ils sont remplacés par d'autres ce qui permet au réservoir de revenir à son état initial.

Le fonctionnement des hausses au-dessus du déversoir varie suivant le niveau de l'eau dans la retenue, elles fonctionnent comme un barrage, un déversoir ou un fusible (Royet et Degoutte, 1992).

a) Lorsque le niveau d'eau dans la retenue est inférieur ou égal au niveau de l'arase, la hausse fonctionne comme un barrage.

Dans ce cas, les hausses sont largement auto stable, elles résistent à la poussée de l'eau grâce à son poids propre, le poids de l'eau dans l'alvéole aval et aux butées.

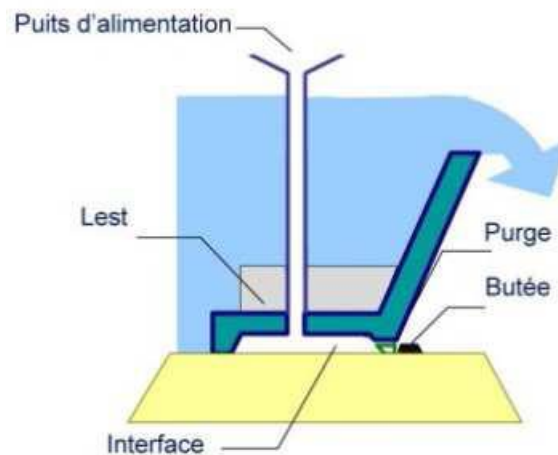


Figure I.22 Hausse fusible avec déversement sur la crête pour une crue modérée

b) Lorsque le niveau d'eau dépasse le niveau du seuil, l'évacuation se fait automatiquement, dans ces conditions, les hausses fonctionnent comme un déversoir à seuil libre et chaque hausse est largement auto stable autant que la forme de labyrinthe permet un allongement de la longueur du déversoir jusqu'à quatre fois la longueur d'origine, ceci augmente la capacité d'évacuation, avec une réduction de la lame d'eau (Royet et Degoutte, 1992).

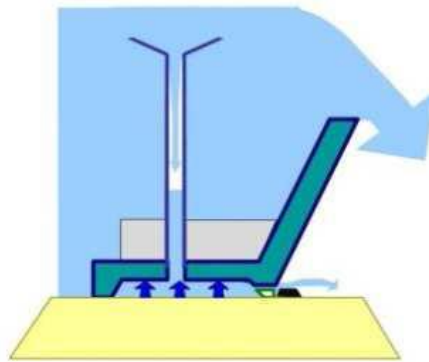


Figure I.23 Hausse fusible avec déversement est remplissage du puits pour une crue importante

c) la continuité d'élévation du niveau d'eau dans le cas de fortes crues jusqu'à atteindre l'ouverture du puits d'alimentation où l'eau s'infiltré à la chambre de mise en pression à la base de la hausse.

Le remplissage de la chambre de l'eau conduit à la formation d'une sous pression contre les forces de stabilité, qu'il fonctionne dans la même direction de la force hydrostatique, la hausse perdu son équilibre et bascule automatiquement.

Afin que les hausses ne se basculent pas à la fois, l'ouverture du puits d'alimentation varié de quelques centimètres d'une manière à renverser successivement, dans ce cas la hausse fonctionne comme un fusible (Royet et Degoutte, 1992).

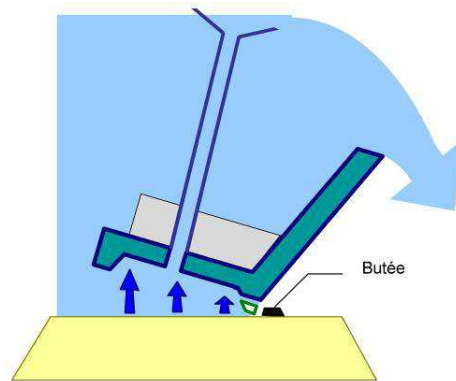


Figure I.24 Hausse fusible avec mise en pression de la chambre et basculement

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.4.3.1 Caractéristiques du débit

Des études ont été effectuées 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 sont exprimées en employant le coefficient de débit (C_d) pour les déversoirs définis par *Rouse* (1960) :

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

Q : débit

g : accélération de l'apesanteur

L_c : longueur de la crête de la hausse fusible

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

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

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

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

Où H : la hauteur de la hausse fusible et C_1 , C_2 et C_3 sont des constantes déterminées expérimentalement pour les valeurs de h/H supérieures à 0.1. Le coefficient C_2 est un facteur de la tension superficielle type qui devient négligeable quand la profondeur d'écoulement sur la hausse fusible augmente. Théoriquement, pour un débit nul la valeur du coefficient de débit doit être 0.611. Une extrapolation linéaire des données empiriques s'approche de cette limite pour les valeurs de h/H moins de 0.1 (Falvey et al, 1995).

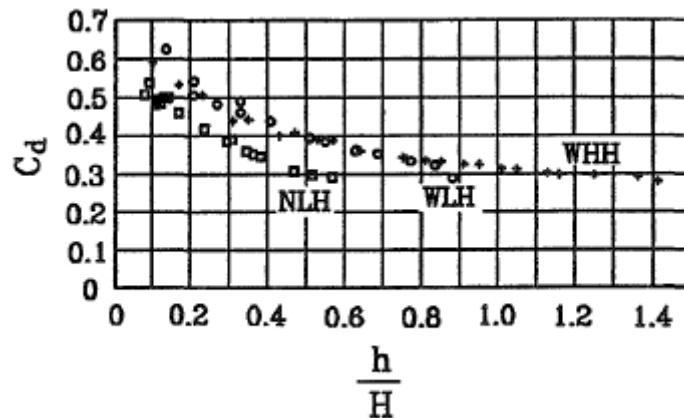


Figure I.25 Coefficient de débit pour les trois configurations des hausses fusibles en fonction de la charge relative h/H (Falvey et al, 1995)

Les hausses fusibles sont conçues pour fonctionner avec une nappe aérée. Les essais à la TVA ont montré que le coefficient de débit était constant jusqu'au point où le niveau d'eau aval devient égal au niveau de la crête. Les effets de la noyade et l'interaction de la nappe sur les coefficients de débit observés avec les déversoirs en labyrinthe ne sont pas significatifs avec les hausses fusibles. L'inclinaison de la face aval et la barre de renforcement au milieu de

la hauteur de la vanne se combine pour maintenir la crête aérée pour les hauts niveaux d'eau aval (Falvey et al, 1995).

I.4.3.2 Stabilité des hausses

L'étude de la stabilité des hausses au-dessus du déversoir est nécessaire pour connaître leur performance sous l'influence des différentes forces. L'analyse de la stabilité d'une hausse au glissement et au renversement dans les conditions normales et extrêmes est spécifique à chaque site. Ceci facilite la détermination des dimensions appropriées qui garantissent le bon fonctionnement des hausses.

I.4.3.3 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 adoptée pendant l'étude de la construction d'un barrage sur un cours d'eau. Cette étude commence par la collecte et l'analyse de données disponibles pour le cours et le bassin versant notamment les précipitations et les apports entrants qui déterminent la capacité de stockage de la retenue du barrage, et la hauteur de l'eau dans le réservoir qui arrive à la cote normale de la retenue, tandis que la crue de projet arrive à une valeur maximale pour l'élévation du niveau d'eau à la cote des plus hautes eaux, qui est considérée comme la cote de stabilité du barrage.

Pendant la période d'exploitation du barrage, l'actualisation de l'étude hydrologique continue, ce qui conduit dans de nombreux cas à revoir la capacité d'évacuation du déversoir existant et prévoir son remodelage pour assurer l'évacuation de la crue actualisée.

L'utilisation des hausses fusibles sur le déversoir a pour objectif de protéger le barrage et préserver sa stabilité suite à la révision de la crue du projet.

Les résultats de l'étude hydrologique selon la révision mettent en évidence deux cas distincts : 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.4.3.4 Analyse de la stabilité

Les hausses fusibles 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 reposent l'analyse de stabilité sont récapitulées dans la figure (I.26).

Forces stabilisatrices :

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

Forces motrices :

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

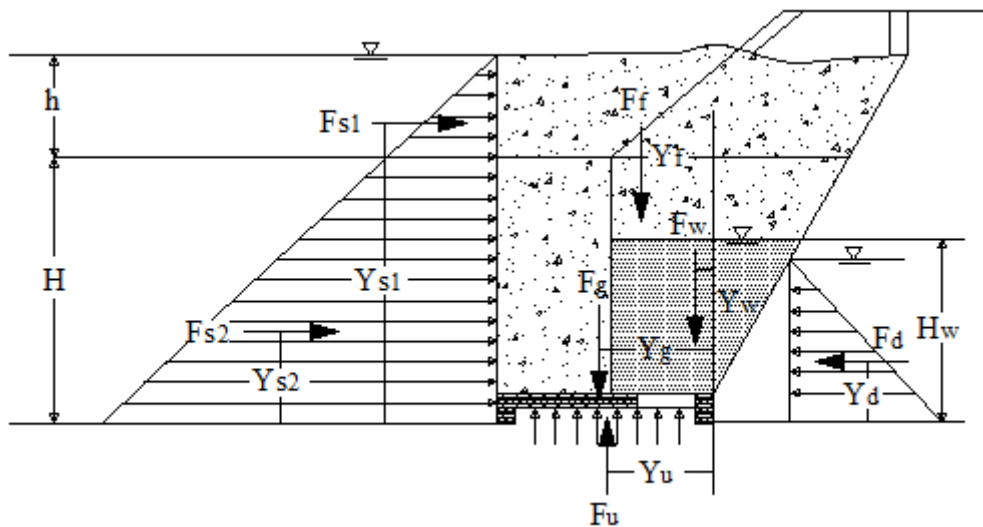


Figure I.26 Forces agissant sur une hausse fusible (Falvey et al, 1995)

a. Stabilité au renversement

Le renversement de la hausse est déterminé on additionne les moments par rapport à l'extrémité aval de la hausse comme indiqué dans la figure (I.26). Les moments de renversement résultent des forces amont sur la hausse (moment amont) et la force de la sous-pression dans la chambre (le moment de sous-pression). La restauration des moments est assurée par la masse de la hausse (moment de la hausse), la masse de l'eau dans la hausse (le moment d'eau) et le niveau d'eau aval (moment en aval). La hausse tourne autour de l'extrémité aval quand les moments de renversement excèdent les moments de restauration.

Le moment amont se compose du moment de la force hydrostatique sur le puits plus celui de la force hydrostatique sur le godet (alvéole). Le moment peut être estimé en négligeant la variation de profondeur d'écoulement par le godet (alvéole). Avec cette supposition, la force sur le godet agit sur une surface qui est égale à la surface de la section transversale du godet (alvéole) comme vu de l'amont. Ainsi, le moment amont est égal à :

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

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

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

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

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

A_c : Surface de la chambre du fond ;

H_w : Profondeur d'eau dans le puits ;

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

ρ_w : Densité d'eau.

A cause de la grande superficie de la chambre du fond, le moment M_u augmente rapidement avec l'accroissement de la hauteur d'eau sur la hausse. L'effet sur le moment est montré dans la figure (I.27) par la ligne continue presque verticale entre les hauteurs d'eau superficielles H_c et H_n .

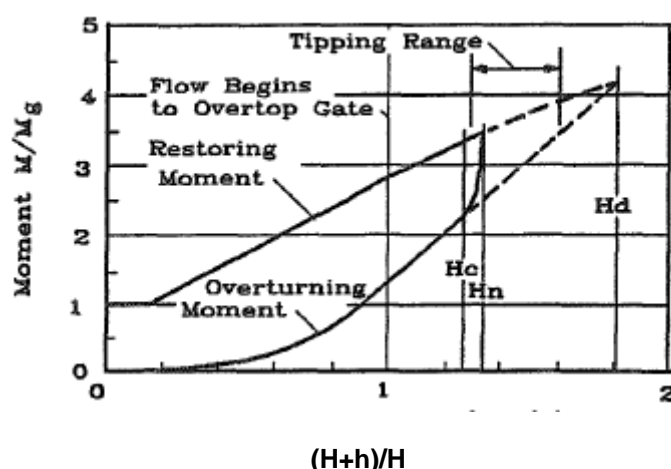


Figure I.27 Moments dans la hausse fusible Model WLH (Falvey et al, 1995)

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:

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

Où :

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

V_c : Volume du matériau dans la base ;

V_s : Volume du matériau dans le godet ;

ρ_c : Densité du matériau dans la base ;

ρ_s : Densité du matériau dans le godet ;

Y_C : Bras de levier du matériau dans la base ;

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

Y_S : Bras de levier du matériau dans le godet.

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

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

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

H_w : Profondeur d'eau dans le puits ;

L_w : Longueur du puits ;

V_b : Volume d'eau dans le godet ;

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

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

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

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

La somme des moments de restauration et de renversement de la hausse fusible est montrée dans la figure (I.27). Les moments sont considérés sans dimensions on les divise par le moment de la hausse. La figure (I.27) montre les moments sur une hausse fusible quand le niveau de réservoir augmente à partir du seuil de la hausse fusible. Le déversement de la hausse fusible commence pour une profondeur de réservoir de $(h + H) / H$ égal à 1. A une profondeur correspondant à (H_C) , l'eau commence à couler dans le puits. Le renversement ne se produit pas à cette profondeur parce que l'eau sort aussi des trous du drain qui sont connectés à la chambre dans la base.

Lorsque la profondeur augmente, le moment de renversement augmente avant que la profondeur (H_c) ne soit atteinte. A cette profondeur, les hausses se renversent. L'augmentation rapide du moment de renversement de (H_c) à (H_n) produit une relation précise entre le point de renversement et la hauteur de la surface d'eau. Si le puits d'admission est colmaté pour quelques raisons, le moment de renversement continue à augmenter à un taux plus lent avant que la profondeur (H_d) ne soit atteint. A la profondeur (H_d). La hausse se renverse même sans le moment de la chambre (Falvey et al, 1995).

b. Stabilité au glissement

La stabilité au glissement est assurée par des butées dans le bord aval du déversoir qui sont ancrées dans le seuil comme indiqué sur la figure (I-9). L'ampleur de la force exercée sur la butée peut être estimée en calculant la force hydrostatique amont appliquée sur la hausse. Comme approximation, la force qui provoque le glissement est donnée par :

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

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.26), cette équation est conservatrice dans laquelle on ignore les forces de frottement entre la hausse et le bord du déversoir.

I.4.3.5 Effet de la glace

Le laboratoire du « National Research Council » de Saint John's (Canada) et le laboratoire « Institute of Energy Structures » de Moscou (Russie) ont réalisé des essais sur un modèle réduit pour savoir 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.

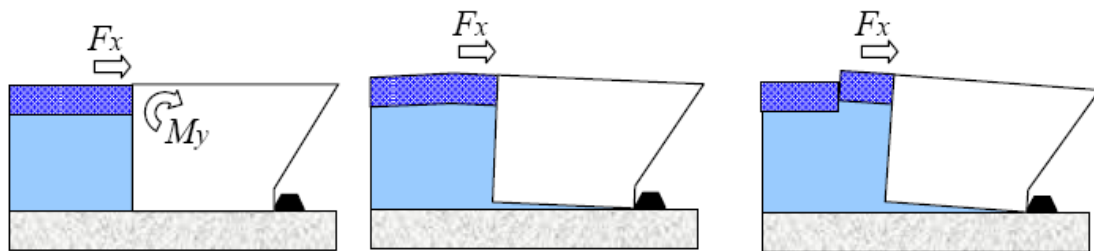


Figure I.28 Effet de glace sur la hausse fusible (Hydroplus)

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 considérés pour dimensionner des structures rigides et de 70 kN par mètre linéaire pour des structures flexibles (telles que les 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.28). 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.

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.4.3.6 Effet des séismes

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

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

I.4.4 Les Blocs fusibles

I.4.4.1 Définition

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

Les blocs posés sur un même seuil 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 communiquant avec l'aval (sous-pression inexistante) (Lempérière et al. 2006).

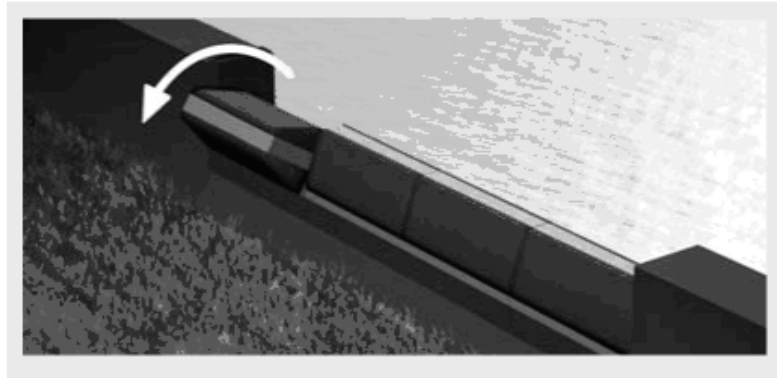


Figure I.29 Vue en perspective d'un déversoir Blocs fusibles (Hydroplus)

I.4.4.2 Blocs fusibles sans sous-pression

Les blocs peuvent être prévus pour basculer avant d'être submergés. Ils sont alors relativement hauts par rapport à leur longueur (hauteur H jusqu'à deux fois la longueur L). Cette solution sans sous-pression permet d'avoir des blocs avec une épaisseur E réduite. Ils forment en quelque sorte une crête fusible qui peut atteindre une hauteur importante et jouer le rôle d'un déversoir de sécurité (Lempérière et al. 2006).

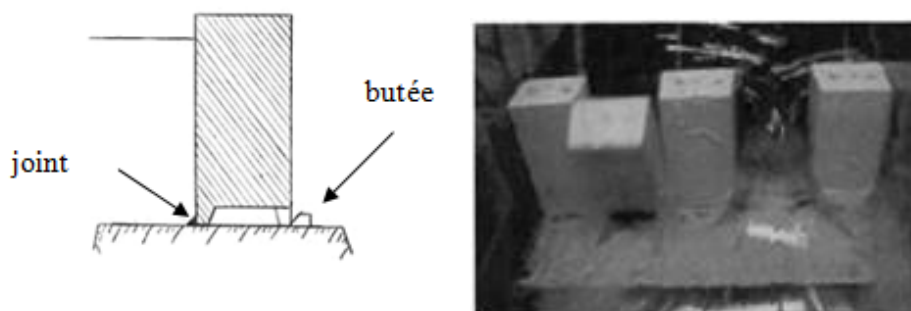


Figure I.30 Blocs sans sous-pression et basculement avant déversement

I.4.4.3 Blocs fusibles avec sous-pression

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

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

La solution (sous-pression totale), bien que consommant plus de béton, paraît plus intéressante dans ce cas car elle donne une meilleure précision au niveau d'eau qui assure le basculement. En outre, cette solution n'exige pas une grande précision pour la position exacte du joint d'étanchéité, celui-ci étant situé à l'aval, 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.

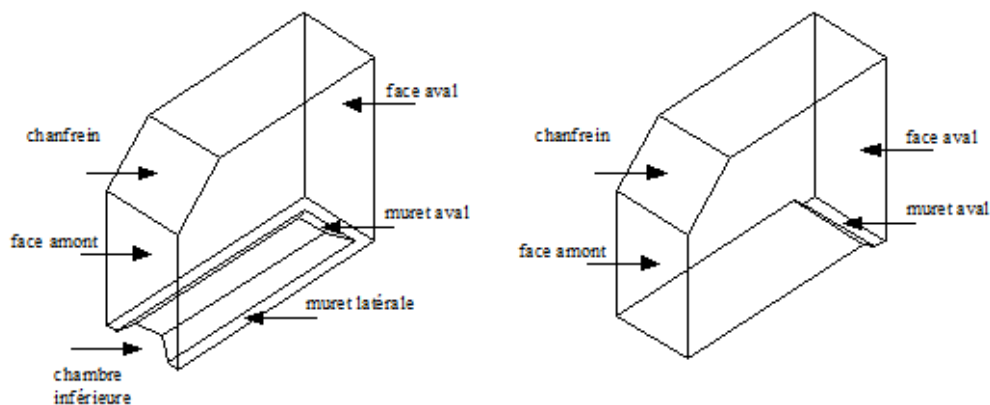


Figure I.31 Vue en perspective d'un des deux modèles des blocs fusibles avec sous-pression

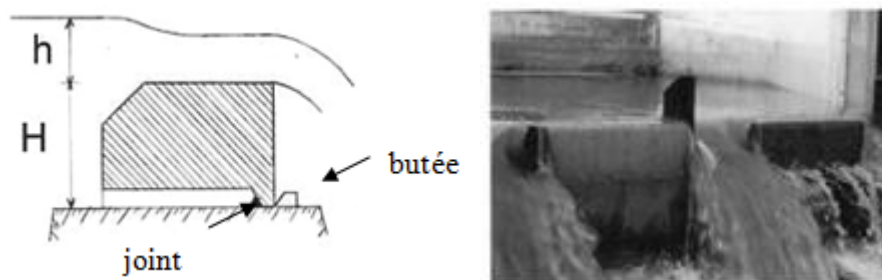


Figure I.32 Bloc avec sous-pression et déversement avant basculement

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

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

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

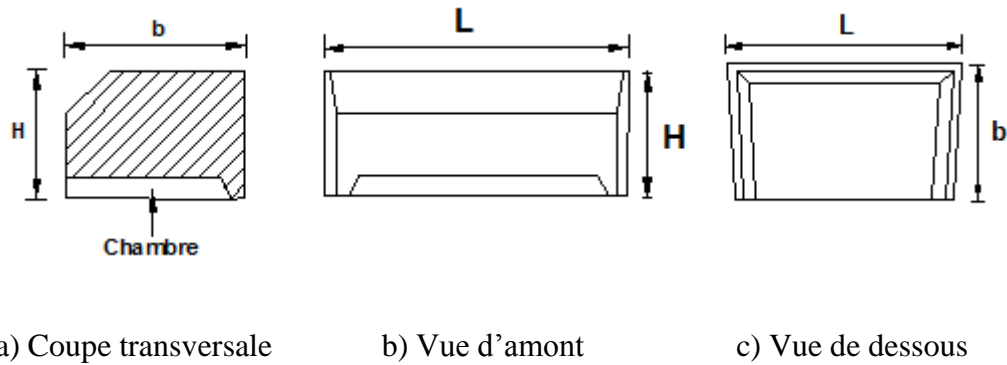
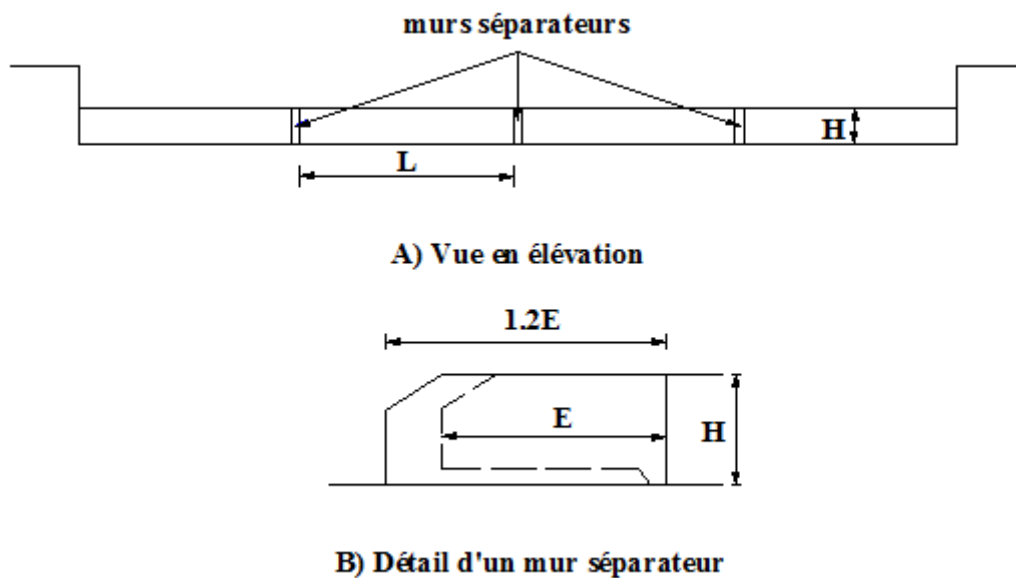


Figure I.33 Géométrie d'un bloc fusible avec sous-pression

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.34).



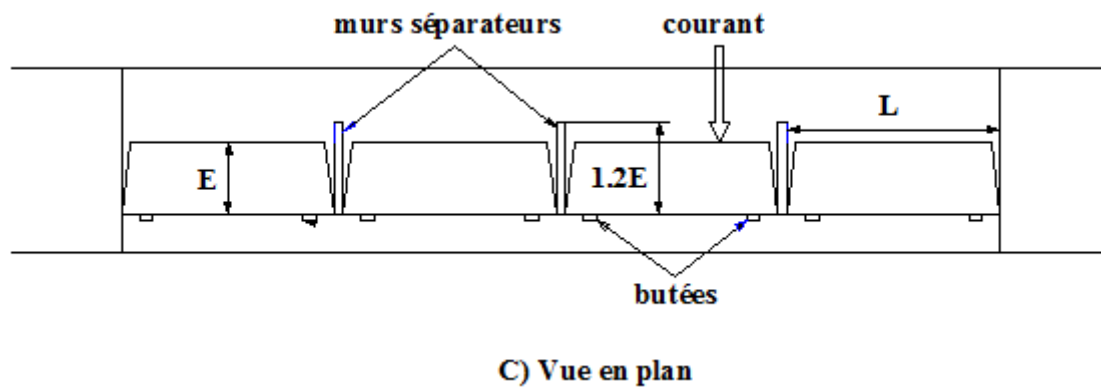


Figure I.34 Disposition générale et murs séparateurs



Figure I.35 Blocs fusibles sur un seuil avec des murs séparateurs

I.4.4.4 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.36) montre les courbes théoriques de stabilité. La lignes brisée MV représente le moment des forces verticales et la courbe MH le moment des forces horizontales (les moments sont calculés par rapport à la butée aval) en fonction d'une charge d'eau totale W à l'amont d'un bloc d'épaisseur E et de hauteur H . Le renversement du bloc correspond au point de rencontre de ces deux courbes. La ligne brisée MV1 en pointillée correspond à une épaisseur de bloc augmentée de 10 %.

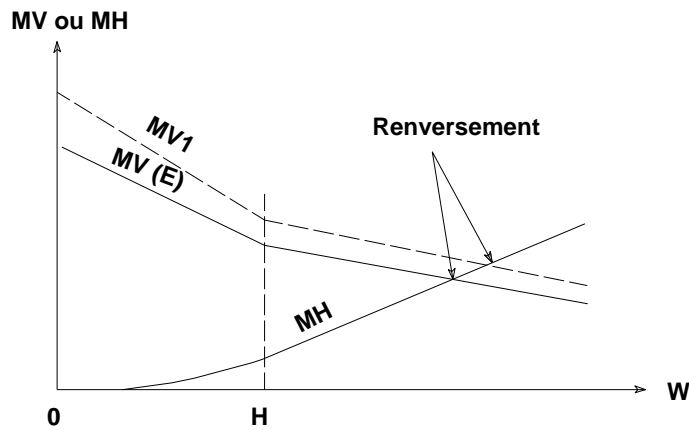


Figure I.36 Diagramme de stabilité

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 :

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

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

Dans la plupart des cas, il faut environ 1 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.37 Bloc fusible placé sur un seuil après un arasement

I.4.4.5 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.38). Si les extrémités latérales restent ouvertes, quelques supports sont nécessaires pour assurer la stabilité du bloc.

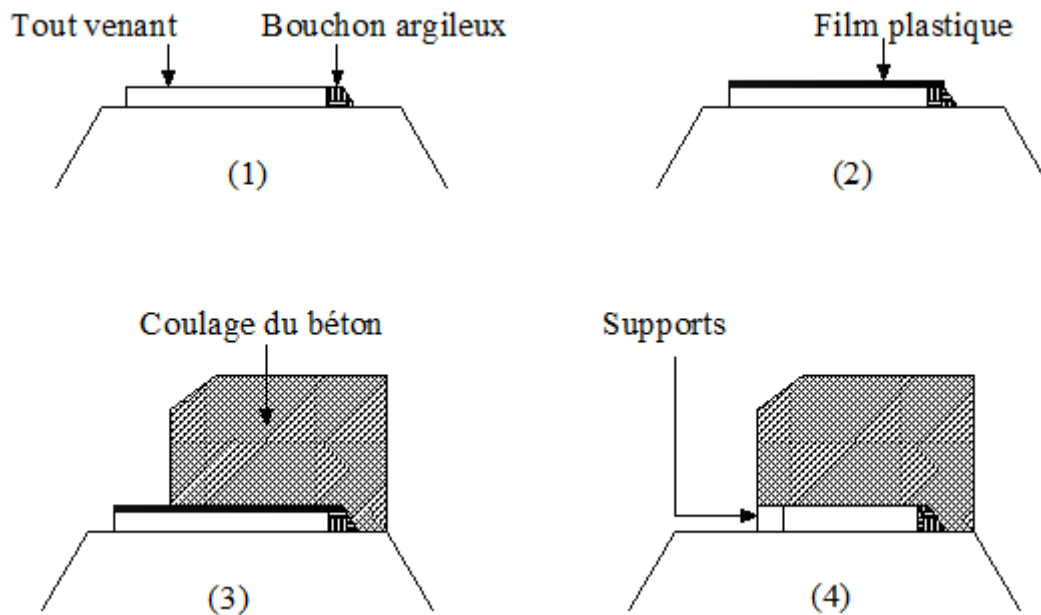


Figure I.38 Différentes phases de construction du bloc sur un seuil

I.4.5 CONCLUSION

L'étude bibliographique a eu pour objectif d'identifier les différents travaux de recherche effectués dans le domaine des déversoirs auto stables, en particulier les hausses et les blocs fusibles, cette étude nous a permis de faire un état de connaissance sur la définition de la géométrie des déversoirs auto stables, sur leur principe de fonctionnement et le but de l'utilisation de ce système.

Pour définir le système des déversoirs auto stables, nous avons examiné le développement de la géométrie des déversoirs rectilignes et non rectilignes, dans le but d'accéder à un modèle parfait, qui combine entre le rendement élevé de l'évacuation et le coût réduit avec un haut degré de sécurité.

Les dispositifs auto stables 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.

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

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.

Pendant les faibles et moyennes crues, les hausses agissent comme une barrière étanche, permet le déversement d'eau comme un déversoir libre. Tandis que pour les fortes crues le niveau du réservoir dépasse une valeur prédéterminée, par conséquent, l'eau s'écoule dans le puits d'entrée et provoque une pression de soulèvement associé à la pression hydrostatique qui déséquilibre la hausse afin de la faire basculer.

Chaque hausse fusible a un niveau de basculement différent qui est déterminé précisément par la hauteur de l'entrée d'eau dans le puits et sa propre stabilité unique.

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

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 sans 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 promoteur. Ainsi, la présente étude va donc aborder la problématique de dimensionnement des blocs fusibles par le biais d'une étude théorique, vérifié par la voie expérimentale.

Chapitre II

Etude Théorique

CHAPITRE II

Etude théorique

II.1 Introduction

Le système des blocs fusibles est un moyen de surélévation auto stables, qui a été inventé ces dernières années, 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 utilisés pour sa 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 déterminer une méthode de dimensionnement de la géométrie des blocs fusibles, qui permet le basculement de ces éléments successivement lorsque l'eau atteint un niveau déterminé sans mettre le barrage en danger.

Pour atteindre cet objectif, on a choisi pour cette étude, la forme du bloc avec sous-pression qui permet le déversement avant le basculement.

La voie théorique est une étape préliminaire pour aboutir à une méthode de dimensionnement des blocs. Le principe de la théorie se base sur le calcul de stabilité et la définition des facteurs déterminants qui contrôlent les dimensions du bloc.

Pour ce faire, il est nécessaire de faire intervenir le principe de la stabilité limite qui marque le point de passage des conditions de stabilité générale à l'instabilité qui engendre le basculement du système.

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 atteint 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 donc des poids différents. Les blocs fusibles sont posés au long de la crête du déversoir existant après un faible arasement du seuil, sous forme d'un rideau qui assure l'obturation de l'écoulement, L'étanchéité entre les blocs fusibles adjacents

est assurée par un joint en plastique, de même entre les blocs et le seuil. A l'aval immédiat des blocs, des butées sont réalisées pour empêcher leur glissement.

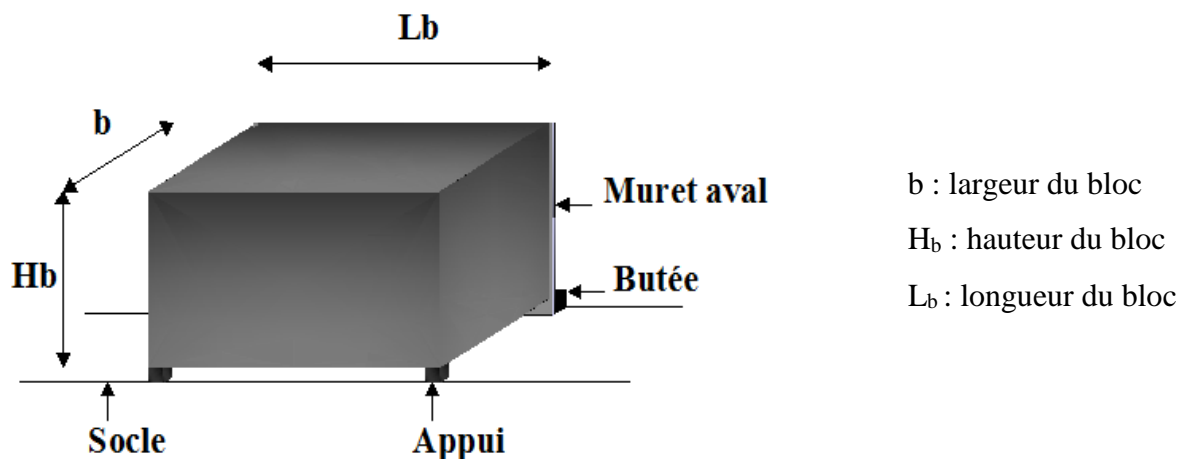


Figure II.1 Schéma descriptif d'un bloc fusible

II.3 Objectif de conception des blocs fusibles

Les blocs fusibles sont conçus pour faire accroître le stockage d'une retenue dans le cas de perte de capacité suite au phénomène d'envasement ou autre. La tranche récupérée est comprise entre le niveau normal de la retenue et le niveau des plus hautes eaux. Les blocs fusibles sont aussi conçus pour augmenter du débit évacué d'un déversoir existant par l'abaissement du seuil ou la combinaison des deux.

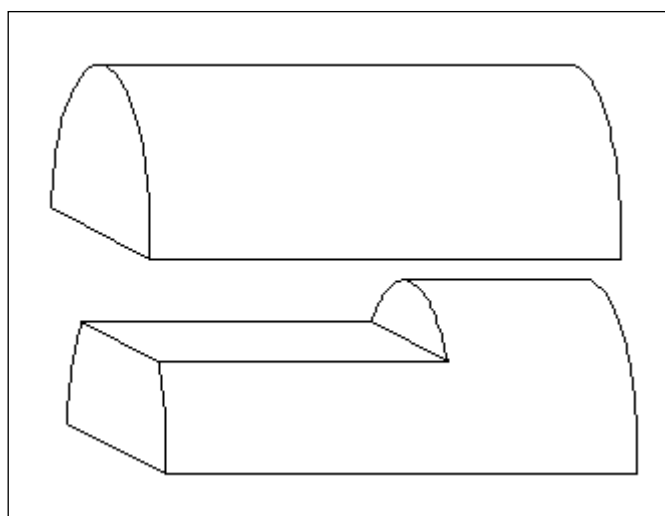


Figure II.2 Arasement du seuil pour l'emplacement des blocs fusibles

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 une solution 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.

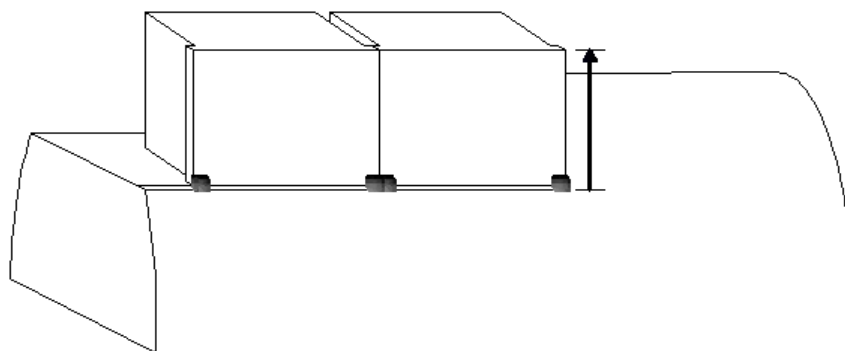


Figure II.3 Blocs fusibles pour augmenter la capacité des barrages

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 dangés probable, 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.

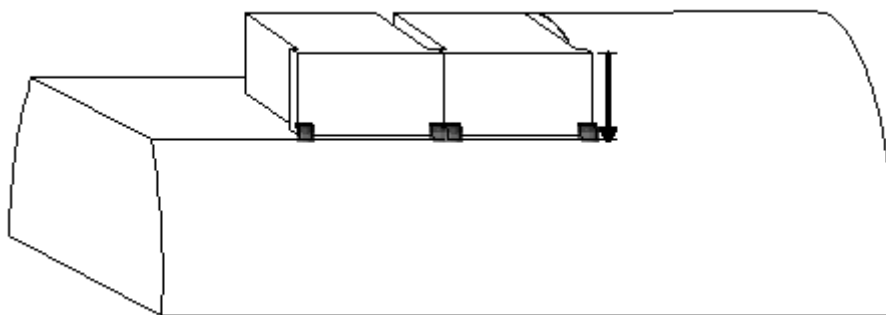


Figure II.4 Blocs fusibles pour améliorer la sécurité des évacuateurs de crues

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 / lorsque le niveau de l'eau est inférieur ou égal le niveau d'arase des blocs celles-ci fonctionnent comme un barrage (figure II.5.a). Chaque élément est largement auto stable et résiste à la poussée hydrostatique grâce à son poids propre.

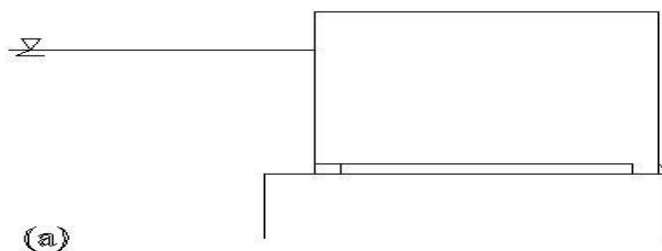


Figure II.5.a Bloc fusible fonctionne comme un barrage

b/ lorsque le niveau de l'eau s'élève au dessus de la cote d'arase des blocs, celles-ci fonctionnent comme un déversoir à large seuil, jusqu'à une certaine épaisseur de la lame d'eau écoulée. Pendant cette phase de fonctionnement chaque élément reste largement auto stable comme dans la phase précédente (figure II.5.b).

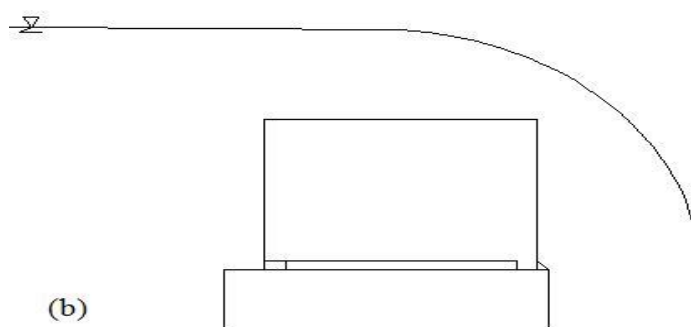


Figure II.5.b Bloc fusible fonctionne comme un déversoir

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).

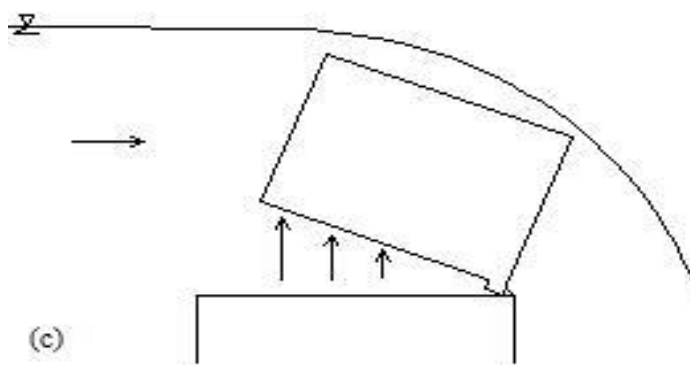


Figure II.5.c Bloc fusible fonctionne comme un fusible

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 une importante tranche de retenue comprise entre le niveau normal et les plus hautes eaux, qui augmente la capacité de stockage, ou à compenser la partie perdue, en raison de l'accumulation de sédiments dans le bassin du barrage.

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

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

II.5.2 Dimensionnement mécanique

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

II.5.3 Hauteur des blocs fusibles

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

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

II.5.4 Largeur des blocs

La largeur des blocs doit être 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 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 abouti et qui se base sur le principe de la stabilité générale d'un objet soumis à la force de pression hydrostatique, à la force des sous-pressions, au poids de l'eau sur l'objet et son poids propre.

II.5.5 Développement théorique pour le dimensionnement d'un bloc fusible

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.

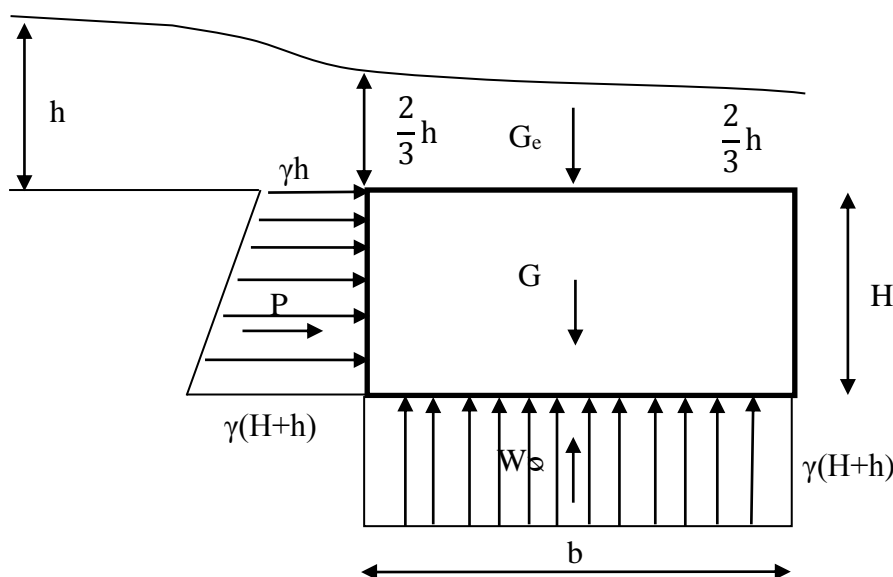


Figure II.6 Schéma de calcul de stabilité du bloc fusible

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

H : Hauteur du bloc.

b : Largeur du bloc.

γ : Poids volumique de l'eau.

γ_b : 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.

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 $2h/3$.

$$G_e = \frac{2}{3} \gamma h b \quad , \quad X_{G_e} = \frac{b}{2} \quad , \quad M_{G_e} = \frac{\gamma H b^2}{3} \quad (\text{II. 1})$$

$$G = \gamma_b H b \quad , \quad X_G = \frac{b}{2} \quad , \quad M_G = \frac{\gamma_b H b^2}{2} \quad (\text{II. 2})$$

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

$$W_\infty = \gamma(H + h)b \quad , \quad X_{W_\infty} = \frac{b}{2} \quad , \quad M_{W_\infty} = \frac{\gamma(H + h)}{2} b^2 \quad (\text{II. 4})$$

Le moment de renversement est exprimé par la relation suivante :

$$K_r = \frac{M_{Ge} + M_G}{M_P + M_{W\emptyset}} \quad (\text{II.5})$$

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, 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.

$$b = H \sqrt{\frac{(H + 3h)}{3 \frac{\gamma_b}{\gamma} H - 3H - h}} \quad (\text{II.6})$$

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

Pour valider cette relation, des essais expérimentaux sur des blocs fusibles se sont avérés nécessaires.

II.5.5.1 Stabilité au glissement

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

$$P = \frac{1}{2} \gamma \cdot H \cdot (H + 2h) \quad (\text{II.7})$$

II.6 CONCLUSION

L'étude théorique, qui a été effectuée sur des blocs fusibles avec sous pression et écoulement sur le bloc avant le basculement avait pour but de proposer une formulation mathématique 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. 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

CHAPITRE III

Etude expérimentale

III.1 Introduction

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

Pour ce faire, il est impératif que le modèle réduit soit similaire au cas réel. Ainsi, il est nécessaire de faire appel aux lois de la similitude pour reproduire les mêmes conditions que celle du prototype.

III.2 Lois de similitude

Tous les phénomènes qui gouvernent un écoulement ne peuvent pas être valablement modélisés analytiquement ou numériquement, en particulier lorsqu'on s'intéresse à des ouvrages hydrauliques.

L'étude des écoulements complexes exige la réalisation de modèles réduits sur lesquels les mêmes conditions d'écoulement dans le cas réel doivent être reproduites.

Les principales forces qui gouvernent l'écoulement à surface libre sont :

- Les forces d'inertie,
- Les forces de pesanteur,
- Les forces de frottements,
- Les forces de tensions superficielles,
- Les forces d'élasticité.

III.2.1. Similitude géométrique

Le modèle est géométriquement semblable au prototype si les dimensions linéaires homologues du modèle (L_2) et du prototype (L_1) sont dans le rapport de l'échelle du modèle λ définie par :

$$\lambda = \frac{L_2}{L_1} \tag{III.1}$$

III.2.2 Similitude cinématique

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

Soient :

$$\lambda_v = \frac{\lambda}{\lambda_r} \quad (\text{III.2})$$

Et

$$\lambda_\gamma = \frac{\lambda}{\lambda_r^2} \quad (\text{III.3})$$

λ_t étant l'échelle des temps définie par :

$$\lambda_t = \frac{t_2}{t_1} \quad (\text{III.4})$$

Où

t_1 : le temps mis à parcourir la distance L1 dans le prototype.

t_2 : le temps mis à parcourir la distance L2 homologue de L1 dans le modèle.

λ_v : l'échelle des vitesses.

λ_γ : l'échelle des accélérations.

III.2.3 Similitude dynamique

Les mouvements du liquide dans le prototype et dans le modèle sont provoqués par des forces.

Pour que le modèle et le prototype soient dynamiquement semblables, il est nécessaire que toutes les forces agissant en des points homologues soient dans le même rapport.

Les principales forces qui interviennent dans les écoulements sont les forces d'inertie, de turbulence, de pesanteur, de viscosité et les forces de capillarité.

Suivant la nature de l'écoulement considéré, ces catégories de forces interviennent d'une manière plus ou moins importante. Il est à noter que les forces d'inertie ne peuvent jamais être négligées en raison qu'il y a toujours une masse liquide en mouvement, les conditions du problème traité permettent souvent, pour les autres catégories de forces, d'en négliger certains par rapport à d'autres.

III.2.3.1 Similitude de Reech-Froude

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

$$\lambda_v = \sqrt{\lambda} \quad (\text{III.5})$$

D'où :

$$\lambda_q = \lambda^{\frac{5}{2}} \quad (\text{III.6})$$

λ_q : l'échelle des débits

La condition de similitude de Reech-Froude revient à réaliser un écoulement possédant le même nombre de Froude aux points homologues du modèle et du prototype, ce nombre est désigné par Fr et défini par :

$$F_r = \frac{v_2}{\sqrt{gL_2}} = \frac{v_1}{\sqrt{gL_1}} \quad (\text{III.7})$$

Où :

v_1, v_2 sont respectivement les vitesses d'écoulement dans le prototype et le modèle.

L_1, L_2 sont respectivement les dimensions linéaires dans le prototype et le modèle.

Il est à maintenir que le nombre de Froude ainsi défini exprime précisément le rapport des forces d'inertie aux forces de pesanteur.

Il faut noter qu'il est pratiquement impossible de faire varier l'accélération de la pesanteur g entre le prototype et le modèle.

III.2.3.2. Similitude de Reynolds

Seules les forces d'inertie, de turbulence et de viscosité sont à considérer dans ce type de similitude.

La condition de similitude de ces forces impose que :

$$\frac{\lambda \lambda_v}{\lambda_v} = 1 \quad (\text{III.8})$$

Où

λ_v est le rapport du coefficient de viscosité cinématique ν_2 dans le prototype et le coefficient de viscosité cinématique ν_1 dans le modèle.

Le nombre de Reynolds désigné par R_e sera défini alors par :

$$R_e = \frac{L_2 v_2}{\nu_2} = \frac{L_1 v_1}{\nu_1} \quad (\text{III.9})$$

v_1, v_2 sont respectivement les vitesses d'écoulement dans le prototype et le modèle.

L_1 , L_2 sont respectivement les dimensions linéaires dans le prototype et le modèle.

Ce qui revient à dire que le nombre de Reynolds caractérisant l'écoulement objet d'étude doit être le même aux points homologues du modèle et du prototype.

Il est à maintenir que le nombre de Reynolds ainsi défini exprime précisément le rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité.

III.3 Description de la station d'expérimentation des modèles réduits

Le dispositif expérimental regroupe un ensemble de canaux à ciel ouvert permettant la réalisation des essais sur des modèles réduits de déversoirs et de simuler les écoulements dans les cours d'eau en amont et en aval des ouvrages hydrauliques. Cette station a été dimensionnée dans le but de permettre la réalisation des essais sur des modèles réduits des évacuateurs de crues avec des différentes dispositions (latérale, frontale, avec contraction et sans contraction). Comme elle peut être utilisée pour la simulation d'autres ouvrages hydrauliques à une échelle suffisante pour produire des conditions d'écoulement similaires à ceux dans un prototype.



Figure III.1 Vue d'ensemble de la station d'expérimentation des modèles réduits

La station d'expérimentation se compose de trois parties fondamentales, une station de pompage qui regroupe une bache à eau de capacité 48 m^3 équipé de deux pompes qui débitent 180 l/s . Une série de canaux de section rectangulaire et de longueurs et largeurs différentes. Une salle pour l'acquisition des données enregistrées par les appareils de mesure et transmis vers un PC pour le stockage et le traitement.

La station de pompage est raccordée par l'intermédiaire de deux conduites de diamètre 200 mm au bassin de tranquillisation de l'écoulement, qui est raccordé à son tour à un canal d'amenée de longueur 5 m , de hauteur 1.2 m et de largeur 0.95 m . L'une des parois de ce canal est conçue en verre afin de permettre la visualisation de l'écoulement. L'eau qui transite par le

canal d'amenée passe dans le bassin de simulation de retenue qui est au faite un canal de largeur 4m et de longueur 5m, sa hauteur est de 1.5m, des vitres en verre sont insérées dans l'une des parois latérales du bassin permettant ainsi la visualisation de l'écoulement. A son extrémité aval le canal de simulation est raccordé à un canal de restitution de largeur 2m et de longueur 3m qui dirige l'écoulement directement vers la bache à eau. Ainsi le système fonctionne en circuit fermé.

Le bassin de simulation de retenue est équipé d'un réseau de prise de pression permettant de déterminer les profondeurs d'eau aux différents endroits du bassin. Ces prises de pression sont raccordées à un tableau manométrique qui permet la lecture directe de la profondeur d'eau en chaque point. Le débit qui transite par le dispositif expérimental est mesuré par un débitmètre à ultrason installé sur les deux conduites d'adduction.



Figure III.2 Vue de l'aval du modèle de déversoir à la station d'expérimentation

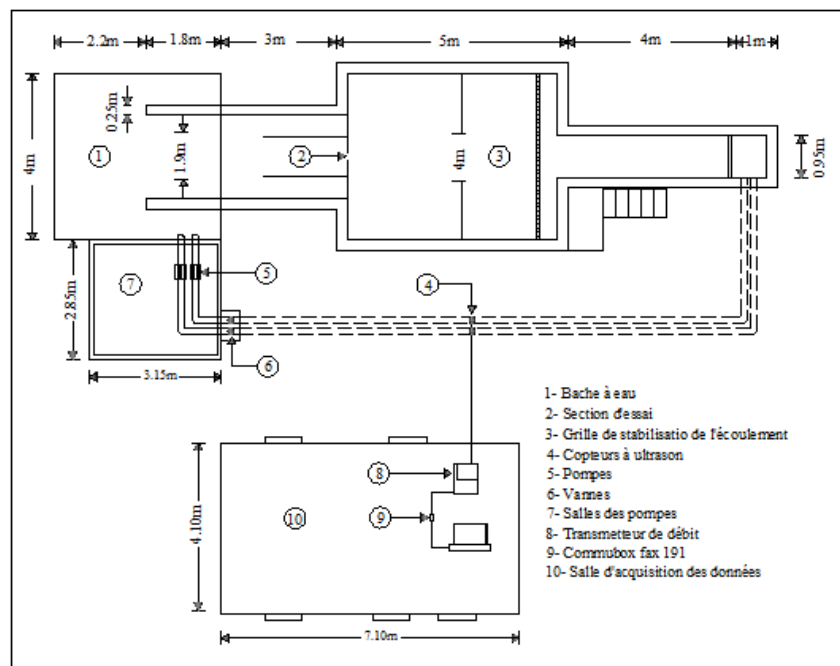


Figure III.3 Schéma de station d'expérimentation (Vue en plan)

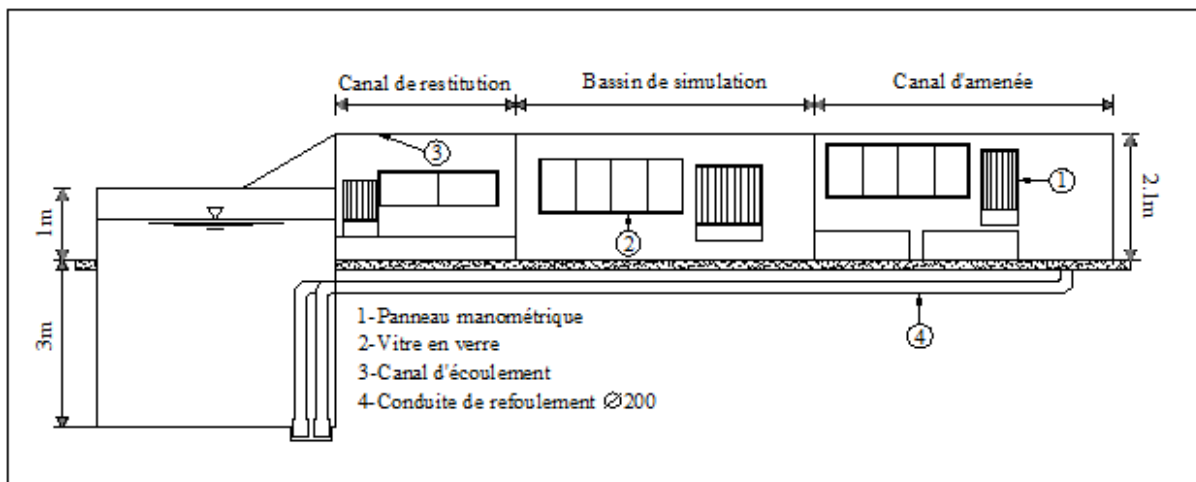


Figure III.4 Schéma du dispositif expérimental (Vue de profil)

III.3.1 Mesure de la hauteur d'eau sur les blocs

Les profondeurs d'eau qui expriment les charges piézométriques aux différents endroits du système sont mesurées par l'intermédiaire d'un réseau de prises de pression inséré au fond des canaux et liés à des tableaux manométriques équipés de tubes transparents indiquant les profondeurs d'eau dans les différents endroits du système expérimental.

Le réseau piézométrique comporte 23 piézomètres implantés d'une manière régulière le long du système expérimental.

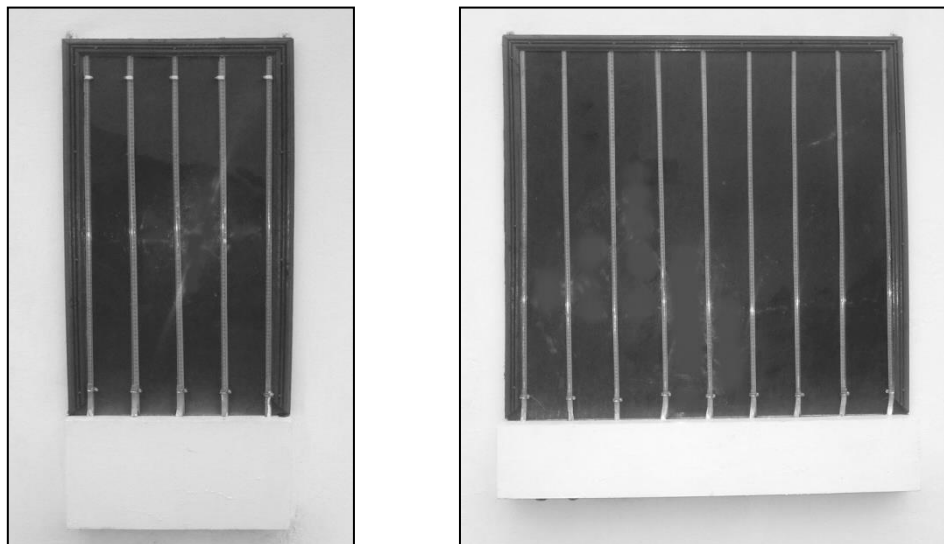


Figure III.5 Tableaux des manométriques de mesure des niveaux d'eau

III.3.2 Appareillage de mesure du débit qui transite sur les blocs

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



Figure III.6 Débitmètre à ultrason Flowmeter 93W2

Le débitmètre à ultrason est constitué de deux parties distinctes :

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

III.4 Dispositif expérimental

III.4.1 Modèles réduits des blocs fusibles

Pour aborder l'étude expérimentale, une série de bloc en béton a été réalisé, ces 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 choisi 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 21 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 à partir de la relation développée dans la partie théorique.

Les blocs ont été fabriqués par du béton coulé dans des moules en bois. 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 $2,4t/m^3$ 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.

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 :

N° Bloc	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
Caractéristiques									
$\gamma_b(t/m^3)$	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
$H_b(cm)$	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$L_b(cm)$	20	20	20	20	20	20	20	20	20
$b(cm)$	8,0	9	10,5	10,5	11,5	11,5	12,5	13,5	14,5
$h_{th}(cm)$	4,6	6,3	8,8	8,8	10,5	10,5	12,2	13,8	15,3

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

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

N° Bloc	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
Caractéristiques									
$\gamma_b(t/m^3)$	2,38	2,31	2,31	2,31	2,30	2,34	2,39	2,36	2,37
$H_b(cm)$	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$L_b(cm)$	20	20	20	20	20	20	20	20	20
$b(cm)$	8,2	9	10,3	10,3	11,4	11,5	12,7	13,7	14,9
$h_{th}(cm)$	4,9	5,1	7,8	7,8	9,5	10,0	12,4	13,7	15,6

III.4.1.2 Socle de basculement des blocs

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

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



Figure III.7 Vue amont du modèle de déversoir pour un bloc



Figure III.8 Vue aval du modèle de déversoir pour un bloc

III.4.1.3 Mur de séparation

Pour éviter le frottement entre les blocs en cas de basculement de l'un des deux, un support métallique a été fabriqué. Ce dernier se compose de trois 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.9 Support métallique avec murs séparateurs

III.5 Déroulement des essais

III.5.1 Préparation du modèle

Le but des premiers essais réalisés sur chaque bloc est de déterminer la hauteur d'eau sur le bloc pour laquelle ce dernier bascule.

Afin de réaliser ce type d'essais avec une précision satisfaisante, le bloc en béton doit être posé sur le seuil tout en assurant son horizontalité par l'insertion d'un petit cube en béton au-dessous du bloc comme support à son extrémité 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.9).

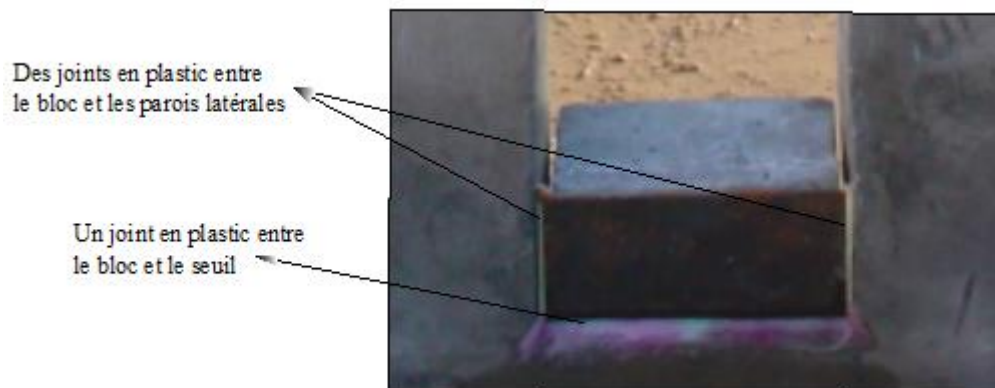


Figure III.10 Système d'étanchéité du bloc

III.5.2 Description de la procédure expérimentale

La procédure expérimentale consiste à amorcer la pompe et de laisser l'eau s'écouler dans le bassin de simulation, le niveau d'eau s'élève graduellement jusqu'à ce qu'il atteigne le seuil du socle, puis pénètre dans la chambre des sous pression et continue à augmenter jusqu'à ce qu'il atteigne la face supérieure du bloc, qui est dans une position stable, formant ainsi une barrière étanche. A cet instant, l'eau commence à s'écouler au-dessus du bloc qui devient un seuil déversant. Le déversement continu jusqu'à ce que le bloc bascule à une charge d'eau

donnée sur le bloc qui est mesurée instantanément par la lecture du niveau d'eau dans les piézomètres. Afin de conserver le bon état des blocs après leur chute suite au basculement, un système d'amortissement de choc a été mis en place.



Figure III.11 Vue de l'aval de l'écoulement sur le bloc fusible avant basculement

Un élargissement du seuil de déversoir a été effectué à l'afin des essais de la première phase qui correspond aux essais sur un seul bloc. Cet élargissement a été réalisé pour contenir à la fois trois blocs de largeur différente.

Pour éviter le frottement entre les blocs et assurer un écoulement stable suite au basculement de l'un des blocs, un support métallique avec des murs séparateurs a été fixé sur le socle. L'ouverture du déversoir a été donc divisée en trois pertuis de largeur égale à celle de chacun des blocs (fig. III.12).



Figure III.12 Vue de l'aval d'un support qui se compose de trois blocs

Tableau III.3 Caractéristiques des modèles des blocs de la première série (01) :

Caractéristiques N° bloc	$\gamma_b(t/m^3)$	$H_b(cm)$	$L_b(cm)$	$b(cm)$	$h_{th}(cm)$
(1)	2,38	10	20	8,2	4,9
(2)	2,31	10	20	10,3	7,8
(3)	2,30	10	20	12,7	12,4

Tableau III.4 Caractéristiques des modèles des blocs de la deuxième série (02) :

Caractéristiques N° bloc	$\gamma_b(t/m^3)$	$H_b(cm)$	$L_b(cm)$	$b(cm)$	$h_{th}(cm)$
(1)	2,31	10	20	9	5,7
(2)	2,30	10	20	11,4	9,5
(3)	2,36	10	20	13,7	13,7

Tableau III.5 Caractéristiques des modèles des blocs de la troisième série (03) :

Caractéristiques N° bloc	$\gamma_b(t/m^3)$	$H_b(cm)$	$L_b(cm)$	$b(cm)$	$h_{th}(cm)$
(1)	2,31	10	20	10,3	7,8
(2)	2,39	10	20	12,7	12,4
(3)	2,37	10	20	14,9	15,6

**Figure III.13** Installation des trois blocs sur le déversoir

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 deux autres blocs restent stables sur le déversoir, après le départ du premier bloc. En conséquence, le niveau d'eau diminue rapidement dans le bassin. Pour augmenter à nouveau la charge d'eau sur les deux blocs qui restent, 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.

III.6 Résultats et discussion

III.6.1 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.

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

$$Q = C_d . L . \sqrt{2g} . h^{\frac{3}{2}} \quad (\text{III.10})$$

Avec :

C_d : coefficient de débit

h : la lame d'eau écoulee sur le bloc

L : longueur du seuil

g : accélération de la gravité

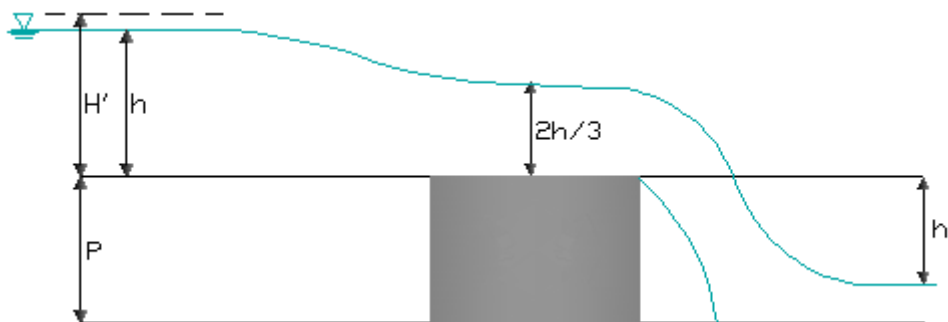


Figure III.14 déversoir à seuil épais en écoulement dénoyé

Les expériences de Basin ont donné pour le coefficient de débit C_d d'un déversoir à seuil épais des valeurs comprises entre 0,37 et 0,39 alors l'équation (III.10) sera :

$$Q = 0,385 . L . \sqrt{2g} . h^{\frac{3}{2}} \quad (\text{III.11})$$

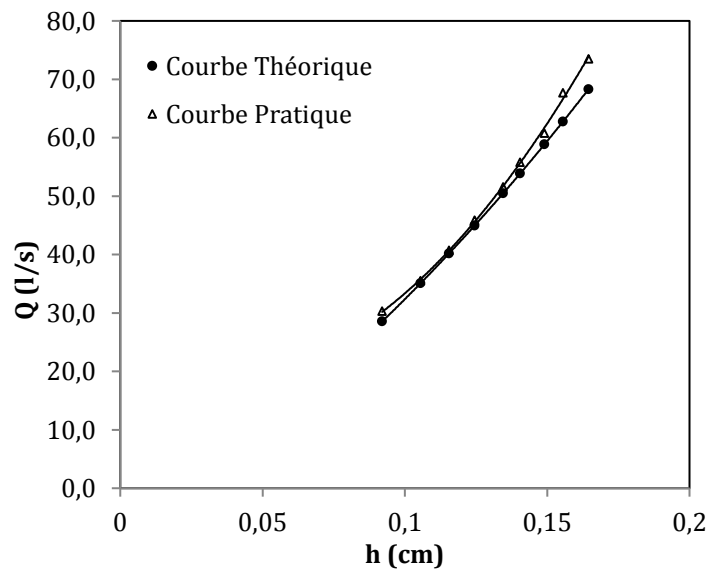
III.6.2 Vérification expérimentale du coefficient de débit

L'écoulement sur les blocs étant considéré comme sur un seuil épais, une vérification expérimentale s'est avérée nécessaire. Ainsi après le blocage des blocs plusieurs séries d'essais ont été réalisées 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 le tableau (III.6).

Tableau III.6 le coefficient de débit du déversoir porté des blocs fusibles :

h(cm)	9,2	10,55	11,55	12,45	13,45	14,05	14,9	15,55	16,45
$Q_{exp}(l/s)$	30,3	35,5	40,7	45,9	51,6	55,8	60,8	67,7	73,5
$Q_{th}(l/s)$	27,6	35,1	40,2	44,9	50,5	53,9	58,8	62,7	68,3
Diff %	5,77	1,23	1,32	2,07	2,19	3,43	3,21	7,32	7,12
Cd_{exp}	0,395	0,377	0,378	0,380	0,381	0,386	0,385	0,402	0,401
Cd_{th}	0,385	0,385	0,385	0,385	0,385	0,385	0,385	0,385	0,385
h/P	0,92	1,055	1,154	1,245	1,345	1,405	1,49	1,555	1,645

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 III.15** 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).

III.6.2 Détermination de la relation entre la hauteur de basculement et largeur du bloc

Le but principal de ce travail est de vérifier la relation qui existe entre la largeur du bloc et la hauteur d'eau sur le bloc qui provoque son basculement. Pour ce faire, des essais ont été effectués sur une série de neuf blocs fusibles de largeur différente. 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 sont semblables. Les valeurs obtenues de la charge d'eau sur le bloc pour plusieurs essais sont presque les mêmes. Ainsi, la valeur prise en compte correspond à la valeur moyenne obtenue par la relation suivante.

$$\bar{h}_{pr} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{h}_j \quad (\text{III.12})$$

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

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

Tableau III.7 Hauteurs d'eau sur les blocs obtenus expérimentalement

J	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\bar{h}_{pr}(cm)$	5,1	5,9	8,0	8,2	9,3	9,7	11,6	13,5	14,5

Il est à remarquer que ces résultats sont obtenus sur un déversoir constitué d'un seul bloc. Les essais ont concerné neuf variantes, soit pour 09 blocs de largeur différente. Les caractéristiques géométriques et les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau (III.4).

Tableau III.8 Caractéristiques géométriques et résultats théoriques et pratiques des essais obtenus sur les neuf blocs :

N° Bloc	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
Caractéristiques									
$\gamma_b(t/m^3)$	2,38	2,31	2,31	2,31	2,30	2,34	2,39	2,36	2,37
$H_b(cm)$	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$L_b(cm)$	20	20	20	20	20	20	20	20	20
$b(cm)$	8,2	9	10,3	10,3	11,4	11,5	12,7	13,7	14,9
$h_{th}(cm)$	4,9	5,7	7,8	7,8	9,5	10,0	12,4	13,7	15,6
$h_{pr}(cm)$	5,1	5,9	8,0	8,2	9,3	9,7	11,6	13,5	14,5
$h_{th}-h_{pr}(cm)$	-0,2	0,2	-0,2	-0,4	0,2	0,3	0,8	0,2	1,1
Diff(%)	-3,92	-3,39	-2,5	-4,88	2,15	3,09	6,9	1,48	7,58

La représentation graphique des résultats obtenus sur les neuf blocs montre que la tendance de la courbe se rapproche d'une droite (III.16). 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 écoulee qui provoque le basculement du bloc (théorique et expérimentale).

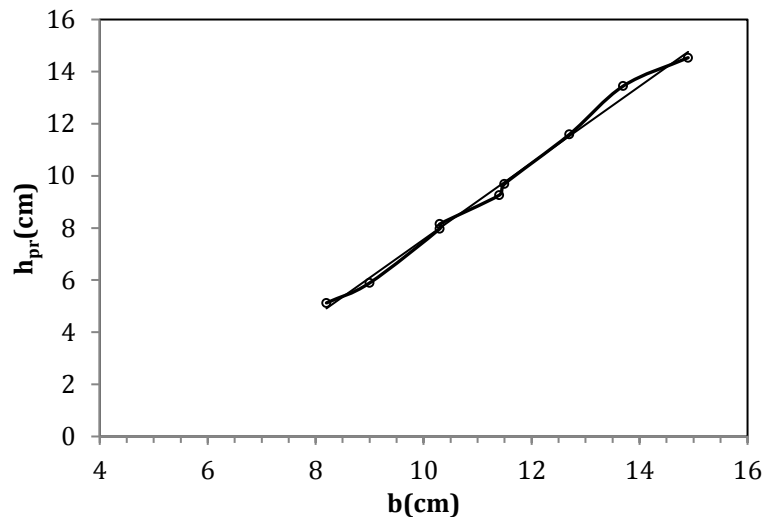


Figure III.16 Courbe pratique de la variation de la charge de basculement en fonction de la largeur de bloc

Le graphique de la figure (III.16), montre aussi que la hauteur de basculement dépend essentiellement de la largeur du bloc, par exemple pour que le bloc bascule pour une faible hauteur d'eau sur le bloc, il suffit de réduire la largeur du bloc. Ceci montre que les blocs fusibles sont plus adaptés aux faibles crues que pour les crues de grande période de retour

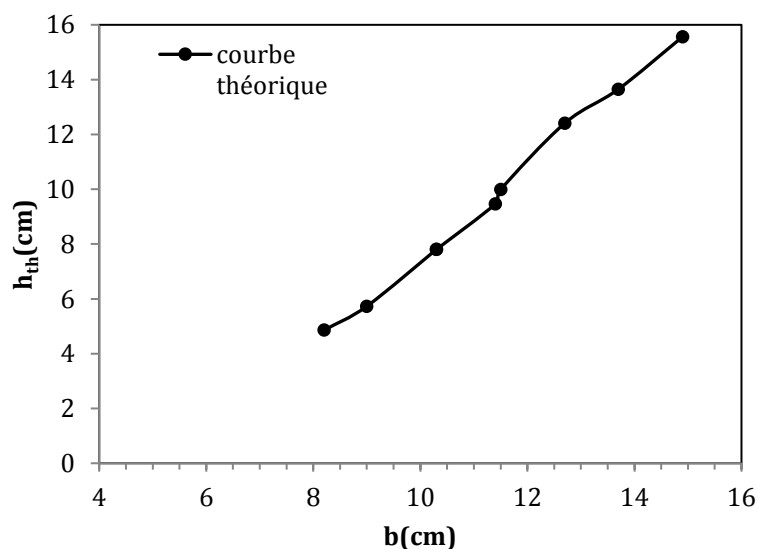


Figure III.17 Courbe théorique de la variation de la charge de basculement en fonction de la largeur de bloc

La représentation graphique (III.17) de la relation théorique obtenue dans le deuxième chapitre (II.6) 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.

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

$$\Rightarrow h = \frac{3H(\frac{\gamma_b}{\gamma} - 1)b^2 - H^3}{b^2 + 3H^2}$$

Cependant, la représentation de cette courbe théorique avec celle où le poids volumique est le même (figure III.18), 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.

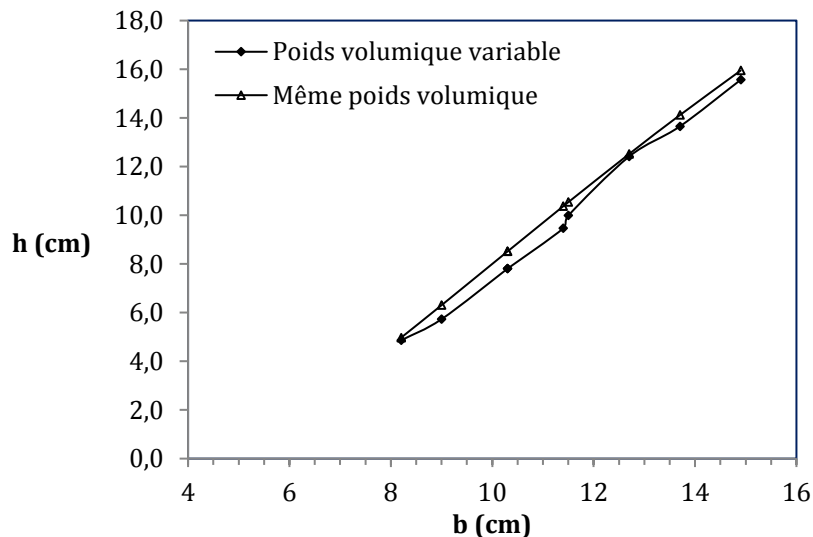


Figure III.18 Variation de la hauteur de basculement en fonction de la variation du poids volumique. Pour vérifier la validité de la relation (II.6), il est utile de procéder à une confrontation des résultats théoriques avec ceux obtenus expérimentalement. A cet effet, le graphique (II.19) représente une comparaison entre les deux courbes théorique et expérimentale.

La lecture de ce graphique (III.19) 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 obtenus expérimentalement. La différence maximale entre les valeurs théoriques et pratiques ne dépasse pas 8% sur toute la gamme de la charge. Il est à remarquer que l'écart le plus grand est enregistré pour des valeurs de la hauteur de basculement supérieures à la hauteur des blocs, c'est-à-dire des valeurs en dehors de l'intervalle d'utilisation des blocs fusibles.

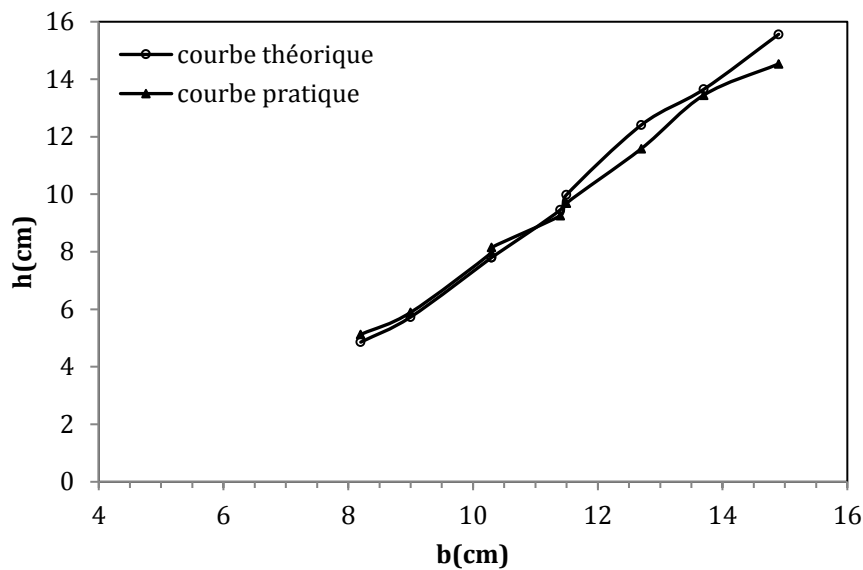


Figure III.19 Comparaison entre la charge théorique et pratique

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.

Pour confirmer la validité de la relation théorique de prédiction de la hauteur de basculement, des essais ont été réalisés sur un bloc avec des dimensions calculées par la relation (II.6) pour un basculement à une charge d'eau nulle ($h_{th}=0$) soit le niveau de l'eau dans le réservoir égale au niveau du seuil des blocs.

Les caractéristiques de ce bloc indiquées dans le tableau suivant :

Tableau III.9 Caractéristiques du bloc à charge d'eau nulle

Caractéristiques	γ_b (kg/l)	H_b (cm)	L_b (cm)	b (cm)	h_{th} (cm)	h_{pr} (cm)
Bloc	2,4	10	20	7,5	0	0

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 (II.6) avec la pratique.

III.6.3 effet de la disposition des blocs sur le seuil selon leur largeur

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

Pour ce faire, 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. III.20).

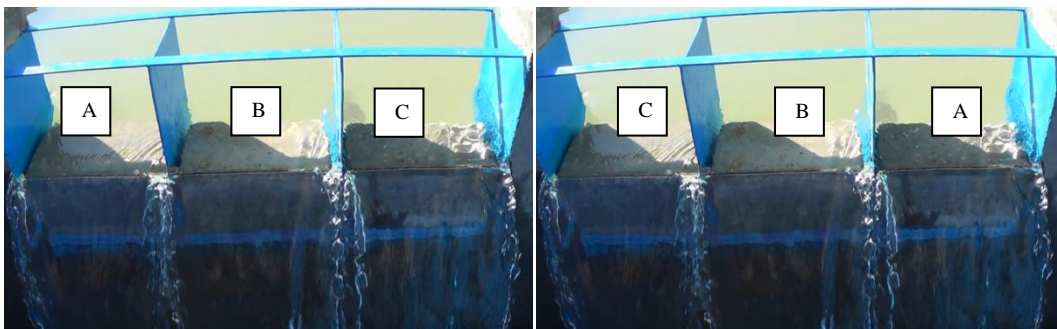


Figure III.20 Schéma d'alignement d'une série de trois blocs sur le seuil

Tableau III.10 Caractéristiques des blocs de la première série en disposition direct et inverse

Caractéristiques	b(cm)	h_{th} (cm)	h_{pr} (cm)
N° Bloc			
(A)	8,2	4,9	5,2
(B)	10,3	7,8	7,9
(C)	12,7	12,4	12,0

Caractéristiques	b(cm)	h_{th} (cm)	h_{pr} (cm)
N° Bloc			
(C)	12,7	12,4	11,6
(B)	10,3	7,8	7,9
(A)	8,2	4,9	5,2

La première disposition a concerné un alignement de trois blocs de gauche vers la droite, du bloc le moins large vers le bloc le plus large, soit respectivement $b = (8,2)$, $(10,3)$, et $(12,7)$. La seconde disposition correspond à un alignement inversé du premier, soit dans l'ordre $b = (12,7)$, $(10,3)$, et $(8,2)$.

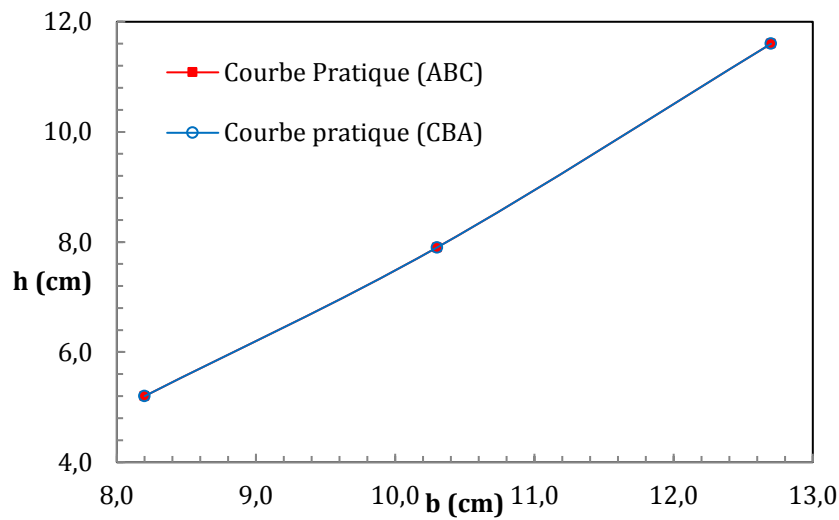


Figure III.21 Disposition direct et inverse des blocs de la série (01)

Tableau III.11 Caractéristiques des blocs de la deuxième série en disposition direct et inverse

Caractéristiques	b(cm)	h _g (cm)	h _{pr} (cm)
N° Bloc			
(D)	9,0	5,7	5,5
(E)	11,4	9,5	9,2
(F)	13,7	13,7	13,5

Caractéristiques	b(cm)	h _{th} (cm)	h _{pr} (cm)
N° Bloc			
(F)	13,7	13,7	13,5
(E)	11,4	9,5	9,2
(D)	9,0	5,7	5,5

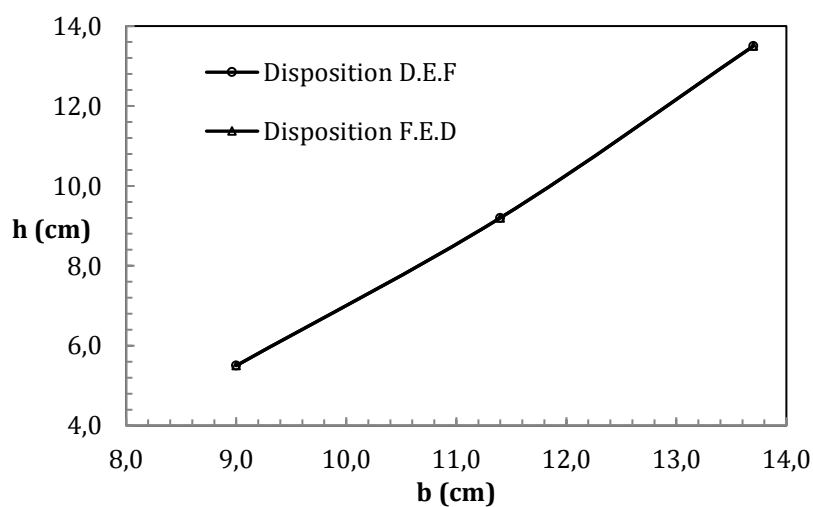
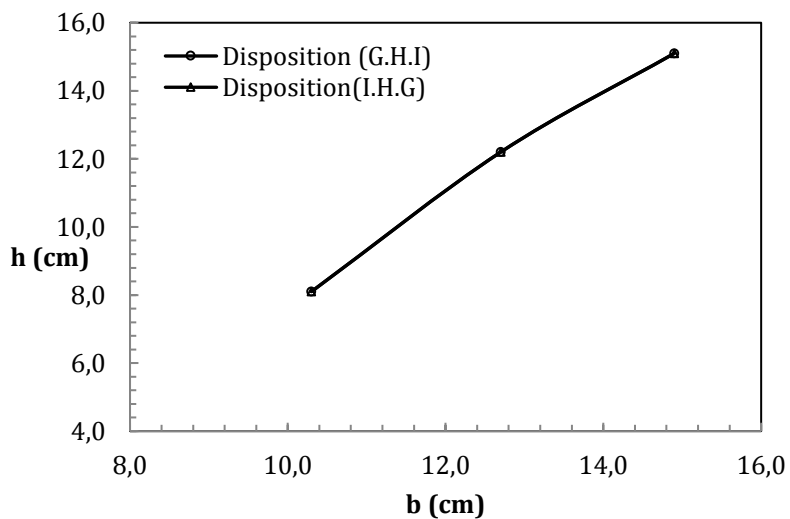


Figure III.22 Disposition direct et inverse des blocs de la série (02)

Tableau III.12 Caractéristiques des blocs de la troisième série en disposition direct et inverse

Caractéristiques	b(cm)	h _{th} (cm)	h _{pr} (cm)
N° Bloc			
(G)	10,3	7,8	8,1
(H)	12,7	12,4	12,2
(I)	14,9	15,6	15,1

Caractéristiques	b(cm)	h _{th} (cm)	h _{pr} (cm)
N° Bloc			
(I)	14,9	15,6	15,1
(H)	12,7	12,4	12,2
(G)	10,3	7,8	8,1

**Figure III.23** 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.

III.6 CONCLUSION

L'étude expérimentale qui a été effectuée sur 09 modèles réduits des blocs fusibles, avec des largeurs différentes a été menée en deux phases. La première a concerné la vérification de la relation théorique pour un déversoir à bloc unique, et la seconde phase d'essai a été réalisée sur un déversoir qui comporte trois blocs.

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

Cependant, la vérification expérimentale de la validité de la relation obtenue par voie théorique a montré un bon accord entre les deux méthodes théorique et expérimentale, l'écart le plus remarquable est d'environ 7%, et ne concerne que les valeurs qui se situent au-delà de la valeur limite en pratique qui est estimée être égale à la hauteur du bloc.

Les essais de vérification qui ont été réalisés sur un bloc avec des dimensions calculées pour un basculement du bloc à une charge d'eau nulle, ont donné des résultats conformes avec les valeurs théoriques.

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

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

Conclusion Générale

Conclusion générale

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

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

L'étude bibliographique, dont l'objectif est de passer en revue les différents travaux de recherche qui ont été effectués dans le domaine des déversoirs auto-stables a montré que les blocs fusibles n'ont été étudiés que récemment par quelques auteurs et qu'ils doivent être identifiés comme des déversoirs rectilignes à seuil libre.

Les déversoirs rectilignes sont caractérisés par une grande lame déversante qui permet l'évacuation des fortes crues, sans compromettre la sécurité du barrage. Par contre, ceci engendre une perte de volume d'eau important, situé entre le niveau normal de la retenue et le niveau des plus hautes eaux. Celui-ci varie de 20 à 50% de la capacité de la retenue. L'installation des blocs fusibles sur le seuil de ces déversoirs, permet de récupérer un grand volume d'eau perdue.

Les déversoirs non rectilignes sont caractérisés par une crête à axe discontinu en plan, ce qui permet d'avoir une longueur de crête plus importante que la largeur de l'emprise du déversoir. Cette solution représente une alternative efficace pour l'évacuation des grands débits, avec une faible lame d'eau, à un coût réduit, cependant, la faible hauteur d'eau sur le seuil ne permet pas l'installation d'un système auto-stable dans le futur.

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

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

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

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

Chacune de hausses fusibles à un niveau de basculement différent, sous lequel la hausse peut résister la traverser des faibles et des moyennes crues, le passage d'une forte crue sur les hausses les fait basculer l'une après l'autre, sous l'influence de la pression de l'eau, afin de libérer le seuil.

Un nouveau dispositif dit « blocs fusibles », représente une alternative économique pour l'augmentation de la capacité de stockage et /ou l'augmentation de la capacité d'évacuation du déversoir, en particulier dans les petits barrages.

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

Les blocs fusibles sont des éléments en béton placés côte à côte sur un rebord de déversoir, ces éléments sont de même longueur et hauteur mais de largeur différente, ces blocs restent stables, jusqu'à ce que le niveau d'eau à l'amont atteint une certaine hauteur, lorsque celle-ci dépasse cette hauteur, les blocs bascule successivement, en fonction de la largeur de la plus petite à la plus grande.

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

Ainsi, Une méthode de dimensionnement théorique, a été développée pour déterminer les premières dimensions des blocs, cette méthode est basée sur le principe de la stabilité limite, lorsqu'il est posé sur le seuil du déversoir et exposé à l'influence de la force hydrostatique et la sous pression. Le résultat de ce développement théorique a permis de présenter une relation

mathématique qui permet de calculer la largeur des blocs fusibles pour une hauteur d'eau donnée au-dessus du bloc.

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

Pour valider cette dernière relation, des essais ont été effectués sur des modèles de bloc fusible dimensionnés par la relation obtenue théoriquement.

L'étude expérimentale a été effectuée sur 09 modèles réduits des blocs fusibles, avec des largeurs différentes. Cette étude a été menée en deux phases. La première phase a concerné la vérification de la relation théorique pour un seul bloc, et la seconde phase d'essai a été réalisée sur un déversoir qui comporte trois blocs.

Les premiers résultats ont fait remarquer que l'écoulement sur les blocs est similaire à celui sur un déversoir épais tant que les blocs n'ont pas basculé.

Les résultats obtenus des essais ont montré un bon accord avec la relation théorique, l'écart le plus grand est d'environ 7%, et concerne des valeurs qui se situent au-delà de la valeur limite en pratique qui est estimée égale à la hauteur du bloc.

Il a été remarqué que la hauteur de basculement augmente avec l'accroissement de la largeur du bloc.

Des essais de vérification qui ont été réalisés sur un bloc avec des dimensions calculé pour un basculement du bloc à une charge d'eau nulle, ses essais ont donnés des résultats conformes avec les valeurs théoriques.

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

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

Ces résultats 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. Ce travail n'est qu'un début, il est nécessaire que d'autre travaux futurs doivent être entrepris pour améliorer cette méthode est aboutir à une méthode simple de dimensionnement des déversoirs en blocs fusibles.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

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

- Royet P., Degoutte G., (1992), Hausses fusibles sur déversoirs de barrages, Augmentation de la capacité utile des retenues ou de la sécurité des évacuateurs de crues, CEMAGREF, n° 15, note 1.
- 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.