

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE**

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
Ecole Nationale Polytechnique



Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Hydraulique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR D'ETAT EN HYDRAULIQUE

Thème :

**Renforcement d'évacuateur de
crues**

Réalisé par :

M^r. LAHRECHE .Adel

Proposé et dirigé par :

M^r. MOULOUDI.Y

Promotion: Juillet 2010

Remerciement

*Merci à notre bon Dieu, notre guide, notre force, notre
bonheur, et la raison
de notre existence. C'est lui qui nous a fait comprendre le but
de cette vie, et
qui nous a donné le pouvoir d'aimer les gens et d'apprécier les
choses. Merci
d'être là dans les moments les plus difficiles.*

*Merci à mon promoteur **M^r Mouloudi.Y**, pour tout le
temps qu'il m a consacré, et tout l'intérêt qu'il m a accordé,
pour
tous les conseils qu'il m a donné, et les remarques qu'il m a
fait.
Il était toujours présent et prêt à m' aider. Les mots ne sont
pas
suffisants pour vous remercier.*

Merci

*Je remercie très chaleureusement toutes les personnes ayant
contribué,
de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.*

Merci

Dédicaces

A ma formidable mère qui m'a toujours soutenu, qui m'a toujours encouragé et qui n'a jamais cessé de croire en moi.

A mon père qui a toujours su me donner les meilleurs conseils pour ma réussite.

A mon frère Sami à qui je souhaite beaucoup de réussite dans la vie.

A ma petite sœur Hanan à qui je souhaite beaucoup de réussite.

A mon petit frère Marouan à qui je souhaite la joie et la réussite dans la vie.

A mes tantes, mes oncles et tous mes cousins.

A la mémoire de ma grande mère, mon cousin Faissal, j'aurai aimé qu'ils soient là pour voir ce que je suis devenu.

A toute la famille lahreche et chalabi.

A la promotion d'Hydraulique 2010 à qui je rends hommage pour la formidable ambiance qui a régné parmi nous durant ces trois merveilleuses années, et qui va énormément me manquer.

A ceux qui étaient toujours là pour moi.

A toutes ces personnes, je dédie ce modeste ouvrage.

Résumé :

La mobilisation des eaux de surface est assurée en grande partie par les barrages réservoirs, néanmoins, ces ouvrages de mobilisation sont confrontés à deux problèmes d'importance fondamentale. Le premier se rapporte aux risques de l'insuffisance de la capacité d'évacuation de l'évacuateur de crues et le second correspond aux effets néfastes de l'envasement.

Pour cela, le renforcement de l'évacuateur de crues par des bouchures mobiles constitue une solution intéressante. Car elle permet d'améliorer la capacité d'un évacuateur sans perdre sur le volume de la retenue et elle permet de stocker une quantité supplémentaire d'eau sans perdre sur la capacité de l'évacuateur.

Mots clés : l'envasement, la submersion, renforcement, évacuateur de crues, les vannes, les boudins gonflables, les hausses fusibles, Hydroplus.

Abstract :

The mobilization of water surface east mainly assured by the stopping's tanks, nevertheless, these works of mobilization are confronted with two problems of fundamental importance. The first refers to the risks of the insufficiency of the capacity of evacuation of the crest gate of believed and the second corresponds to the harmful effects of the silting.

For that, the reinforcement of the crest gate of believed by mobile hedges constitutes an interesting solution. Because it makes it possible to improve the capacity of a crest gate without losing on the volume of reserve and it makes it possible to store an additional quantity of water without losing on the capacity of the crest gate.

Keywords: the silting, the immersion, reinforcement, crest gate of risings, valves, inflatable rolls, fusible rises, Hydroplus.

ملخص :

تعبئة المياه السطحية يتم إلى حد كبير عن طريق السدود والخزانات، إلا أن هذه الأعمال تثير مشكلتين ذات أهمية الأولى يتعلق بمخاطر عدم كفاية قدرة التفريغ لهذا المصب ، والثاني يتوافق مع الآثار السلبية لتراكم الطمي.

لأنه يحسن قدرة قناة تصريف دون أن تفقد الحجم .تقوية قناة التصريف هو الحل للاهتمام لهذا، وتعزيز لهذا المصب من الخزان ، ويمكن تخزين كمية إضافية من الماء دون أن تفقد القدرة لهذا المصب.

كلمات البحث : ترسب الطمي ، غمرت ، تقوية ، قناة لتصريف فائض المياه ، الصمامات ، نفخ الأنابيب ، زيادات المصهر، هيدروبلوس

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale..... 01

Chapitre I : La prédétermination de la crue de projet

1. Introduction	03
2. Définition de la crue.....	03
3. Origine de la formation des crues.....	03
4. Evaluation des débits maximaux des crues.....	04
5. L'intérêt de la recherche (l'enquête).....	07
6. Conclusion.....	08

Chapitre II : LA CONCEPTION D'EVACUATEUR DE CRUES

1. Introduction	09
2. Différents types d'évacuateur de crue.....	09
2.1 Les évacuateurs de surface	09
2.1.1 Evacuateur à ciel ouvert	10
2.1.2 Evacuateur en charge	11
2.1.3 Seuil libre	13
2.1.4 Seuil vanné	13
2.1.5 Types et dispositions des vannes, domaines d'application	13
2.2 Les évacuateurs de fond et de demi-fond	14
2.2.1 Les types des pertuis	15
2.2.2 Vannes de contrôle des pertuis de fond de grande capacité d'évacuation....	16
2.2.3 Vannas de garde des pertuis de fond de grande capacité.....	16
2.2.4 Vannes des pertuis destinées à un réglage fin des débits restitués	16
3. Composants d'un évacuateur de crue	16
3.1 Section de contrôle	16

3.2	Chenal ou galerie de l'évacuateur de crue	17
3.3	Dissipateur d'énergie	17
4.	Facteurs intervenants dans la conception d'évacuateurs de crues	18
5.	Problème de sous-pression et l'érosion par cavitation	20
5.1	Erosion par cavitation.....	21
5.2	Protection du coursier contre l'érosion par cavitation	21
6.	Calcul hydraulique d'un évacuateur de surface.....	22
6.1	Profil de déversoir	22
6.1.1	Laminage de crue.....	22
6.2	Chenal d'écoulement	24
6.3	Coursier	25
6.4	Dissipateur d'énergie	27
6.4.1	Bassin à ressaut	27
6.4.2	Saut de ski	29

Chapitre III : La lutte contre l'envasement en Algérie

1.	La problématique	30
2.	Le phénomène de L'envasement	30
3.	Problèmes posés par l'envasement.....	30
3.1	Réduction de la capacité de la retenue.....	30
3.2	Obturation des organes de vidange	31
3.3	Sécurité de l'ouvrage	31
3.4	Envasement des canaux d'irrigation	31
3.5	Dégradation de la qualité de l'eau	31
4.	Moyens de lutte contre l'envasement	32
5.	Surélévation des barrages	33
6.	Les vannes	35
6.1	Les différents types de vanne	35
6.1.1	Vannes levantes verticales	35
6.1.2	Vannes segment et secteur.....	35

6.1.3 Vannes clapet	36
6.2 Avantages et inconvénients.....	36
6.3 Le débit de déversement avec des vannes	38
6.4 Choix du nombre de vannes.....	38
7. Les boudins gonflables (seuils souples)	39
7.1 Evolution de la technique	39
7.2 Description d'un seuil gonflé à l'eau.....	39
7.3 Avantages et inconvénients.....	40
8. Les hausses fusibles	41
8.1 Présentation des hausses fusibles.....	41
8.2 Principe de fonctionnement	43
8.3 Les types des hausses fusibles.....	44
8.3.1 Les hausses fusibles labyrinthes	44
8.3.2 Les hausses à crête rectiligne.....	45
8.3.3 Les hausses rabattables	47
8.4 Avantages des hausses fusibles	47
8.4.1 Fiabilité	49
8.4.2 Économie.....	49
8.4.3 Adaptabilité	49
8.4.4 Complémentarité avec d'autres systèmes.....	49
8.4.5 Respect de l'environnement	49
8.5 Les hausses fusibles en Algérie	50

Chapitre IV : Techniques de renforcement de la capacité des évacuateurs

1. Introduction	52
2. Conditions du bon fonctionnement des évacuateurs.....	52
2.1 Imaginer tous les incidents possibles.....	52
2.2 Fonctionnement hydraulique.....	54
2.3 Fonctionnement des parties mobiles	54

2.4 Observation et analyse des événements passés	55
3. Vérification de la capacité d'un évacuateur existant	55
4. Techniques de renforcement d'un évacuateur existant	56
4.1 Amélioration de la capacité du déversoir	56
4.1.1 Amélioration du coefficient de débit	56
4.1.2 Ennoisement du seuil	57
4.1.3 Rehausse de la crête de barrage en remblai	57
4.1.4 Seuil amovible	58
4.1.6 Allongement du seuil	58
4.1.7 Déversoir complémentaire.....	59
4.1.8 Cas des seuils vannés	60
4.1.9 Barrage en remblai rendu déversant.....	60
4.2 Aménagement du coursier	60
4.3 Problèmes de surveillance et d'entretien	60
5. Exemple d'application : (Barrage de K'Sob).....	60
5.1 Crues	61
5.2 Le corps du barrage	61
5.3 Problématique	61
5.4 Fonctionnement des vannes.....	62

Chapitre V : L'étude hydraulique des hausses fusibles

1. Introduction	63
2. Dimensionnement hydraulique.....	63
3. Dimensionnement mécanique	64
4. Efforts intervenants dans la stabilité d'une hausse.....	64
4.1 Pression hydrostatique amont.....	65
4.2 La contre pression de la lame déversante.....	65
4.3 Le poids de la hausse et du lest.....	66
4.4 La pression de l'eau exercée sur l'auge.....	66
5. Performances hydrauliques des hausses.....	67

5.1 Les dimensions des hausses fusibles.....	68
5.2 Caractéristiques du débit des hausses.....	70
5.3 Le débit aval	71
5.4 Augmentation de la capacité d'un barrage existant	71
5.5 Amélioration de la capacité de l'évacuateur de crues et la sécurité du barrage	72
5.6 Optimisation de l'évacuateur de crues pour un barrage neuf.....	72
6. Les hausses installées dans le monde.....	72

Chapitre VI : Le renforcement d'évacuateurs de crues aux différents barrages

1. Introduction.....	74
2. Technique des vannes pour augmenter la capacité de stockage.....	74
2.1 Barrage de ZARDEZAS	74
2.1.1 Présentation du barrage.....	74
2.1.2 Hydrologie	74
2.1.3 Les crues	75
2.1.4 L'envasement	75
2.1.5 Problématique	75
2.1.6 Fonctionnement des vannes	77
2.1.7 Analyses et critiques	77
3. Technique des hausses fusibles pour augmenter la capacité de stockage.....	79
3.1 Barrage de FOUM EL GUEISS	79
3.1.1 Présentation du barrage	79
3.1.2 La problématique	80
3.1.3 Les solutions pour augmenter la capacité	80
3.1.3.1 Le dévasement	81
3.1.3.2 Surélévation du barrage	81
3.1.4 Objectif.....	82
3.1.5 Analyses et critiques	83

4. Techniques des hausses fusibles pour augmenter la capacité d'évacuation.....	85
4.1 Barrage de SHONGWENI	85
4.1.1 Présentation du barrage	85
4.1.2 La problématique	85
4.1.3 Paramètres de conception	86
4.1.3.1 Les aspects géotechniques	86
4.1.3.2 Hydrologie.....	86
4.1.3.3 Pression de soulèvement	88
4.1.4 Approche générale	89
4.1.5 Analyse et critique	93
Conclusion générale.....	95

Bibliographie

Liste des figures :

Figure I.1 : Principe de la méthode du GRADEX basé sur une distribution de Gumbel....	5
Figure II.1 : Ces photos représentent les types d'évacuateurs de crue à ciel ouvert.....	11
Figure II.2 : évacuateur de crue tulipe.....	12
Figure II.3 : évacuateur de surface à seuil libre.....	13
Figure II.4 : vanne clapet et vanne segment.....	14
Figure II.5 : évacuateur du fond (pertuis).....	15
Figure II.6 : coursier du barrage de Foz do Areia (Brésil).....	17
Figure II.7 : dissipateur d'énergie.....	18
Figure II.8 : Bassin de type d'impact.....	20
Figure II.9 : les types des aérateurs.....	22
Figure II.10 : visualisation de l'effet de laminage.....	23
Figure II.11 : le régime d'écoulement dans le coursier.....	27
Figure II.12 : visualisation du resseau hydraulique.....	28
Figure III.1 : schéma d'une vanne levante vertical.....	35
Figure III.2 : barrage de Bouhanifia.....	37
Figure III.3 : barrage de K'sob.....	37
Figure III.4 : barrage de Zardezas.....	37
Figure III.5 : Résultat d'essai pour une vanne segment.....	38
Figure III.5 : Principe de fonctionnement des seuils souples.....	39
Figure III.5 : Principe de fonctionnement des seuils souples.....	40
Figure III.7 : Seuil rehaussé par des hausses fusibles.....	41
Figure III.8 : Vue 3D typique d'une hausse fusible.....	42
Figure III.10 : Le principe de fonctionnement d'une hausse fusible.....	44
Figure III.11 : hausse fusible labyrinthe.....	45

Figure III.12 : hausse droite.....	46
Figure III.13 : types de hausses utilisées en fonction de h/H	46
Figure III.14 : hausse rabattable.....	47
Figure III.15 : hausse fusible de barrage Benni Amrane.....	50
Figure III.16 : Hausses fusibles de Barrage Foum El Gueiss.....	51
Figure III.17 : hausses fusibles de barrages Ghrib.....	51
Figure IV.1 : surélévation de la crête.....	58
Figure IV.2 : seuils amovibles.....	58
Figure IV.3 : vue en plan schématique d'un seuil labyrinthe.....	59
Figure V.1 : système de forces agissants sur hausse labyrinthe.....	64
Figure V.2 : Coupe transversale d'un seuil équipé de hausse fusible.....	68
Figure V.3 : Hausse labyrinthe à faible lame déversante (type A).....	69
Figure V.4 : Hausse labyrinthe à lame déversante modérée (type B).....	69
Figure V.5 : Hausse labyrinthe à forte lame déversante (type C).....	69
Figure V.6 : Coefficient de débit pour des hausses labyrinthe.....	70
Figure V.7 : Hydrogramme de débit en aval sans et avec hausses fusibles.....	71
Figure VI.1 : coupe transversale de la surélévation du barrage.....	77
Figure VI.2 : barrage de ZARDEZAS après surélévation.....	78
Figure VI.3 : La situation du barrage par rapport la ville de Khenchela.....	79
Figure VI.4 : Vue du barrage de Foum El Gueiss.....	79
Figure VI.5 : Envasement de la retenue de Foum el Gueiss en fonction du temps.....	80
Figure VI.6 : Les hausses fusibles sur le seuil.....	83
Figure VI.7 : Le barrage se Foum El Gueiss équipé par les hausses fusibles.....	84
Figure VI.8 : vue du barrage de Shongweni.....	85
Figure VI.9 : Hydrogramme de la crue de projet (PMF).....	87
Figure VI.10 : La sou-pression.....	88
Figure VI.11 : le passage de la crue de projet (PMF).....	90
Figure VI.12 : Niveau de la retenue et la durée de la crue de projet.....	91
Figure VI.13 : Coupe transversale de l'évacuateur de crue équipé par les hausses fusibles..	92

Figure VI.14 : Le barrage de Shongweni équipé par les hausses.....	93
Figure VI.15 : La crue de 25 décembre 1995 sur le barrage de Shongweni.....	94

Liste des tableaux :

Tableau I.1 : Coefficient de ruissellement en fonction de la période donnée.....	7
Tableau V.1 : Les hausses fusibles dans le monde.....	73
Tableau VI.1 : les quantités supplémentaires pour satisfaire les besoins.....	76
Tableau VI.2 : le débit maximum de chaque temps de retour.....	87
Tableau VI.3 : Optimisation du système d'Hydroplus.....	90
Tableau VI.4 : La probabilité de ne pas arriver la crue pour le premier basculement.....	93

Introduction générale :

Les barrages réservoirs jouent un rôle déterminant dans l'équilibre socio- économique d'un pays. Cependant, ils sont confrontés à deux problèmes fondamentaux. Le premier se rapporte au contrôle des crues qui peuvent présenter des risques de submersion du barrage, le deuxième se rapporte à la perte de la capacité de stockage suite à l'envasement de la retenue.

La maîtrise des crues est généralement assurée par l'équipement du barrage par un évacuateur de crues qui assure le passage des crues sans incident. Mais parfois malheureusement durant l'exploitation il apparaît que la capacité d'évacuation est insuffisante en raison que ces ouvrages sont conçus avec de manque d'information (des courtes séries hydrologiques), ou avec des méthodes anciennes.

La perte de stockage comme le résultat de l'envasement de la retenue est un grand problème dans le Maghreb et notamment en Algérie, Lorsque l'envasement d'un barrage atteint un seuil critique, Non seulement la capacité utile est réduite mais même la sécurité du barrage est menacée et encore l'enlèvement de cette vase est une opération délicate et difficile.

Devant ces problématiques, il est intéressant de renforcer l'évacuateur de crues par des bouchures mobiles (vannes levantes, vannes secteurs, vannes segments et hausses fusibles) pour résoudre ces problèmes. Ces éléments permettent un gain de stockage et assurent le passage des crues. La dernière technique d'amélioration de la capacité de l'évacuateur de crue est la technique la plus innovante, optimale, technico-économique et sécurisante.

Le présent travail porte sur l'étude des techniques de renforcement d'évacuateurs de crues pour lutter contre l'envasement et la submersion.

Cette étude débute par un premier chapitre qui représente les différentes méthodes pour l'évaluation de la crue de projet (débit maximum probable) pour la conception d'évacuateurs de crues.

Le deuxième chapitre fait le point sur la conception d'évacuateurs de crues.

L'envasement des barrages, les problèmes posés par l'envasement, ainsi que les moyens de lutte contre l'envasement en Algérie font l'objet du troisième chapitre.

Le problème de submersion et les techniques de renforcement d'un évacuateur qui est jugé incapable d'évacuer la crue de projet font l'objet du quatrième chapitre.

Le cinquième chapitre présente une étude hydraulique sur les hausses fusibles.

Le sixième chapitre traite des exemples d'application pratiques sur le renforcement d'évacuateur de crues pour augmenter la capacité de la retenue et/ou du déversoir.

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre : I

La prédétermination de la crue de projet

1. Introduction :

L'intérêt économique de la prédétermination des crues d'un cours d'eau, en un point donnée, est évident en raison des effets destructifs bien connus de ces catastrophes hydrologiques et de la nécessité de calculer certains ouvrages d'art. Les dimensions des évacuateurs de crues de barrage, la hauteur de digue de protection contre l'inondation sont essentiellement déterminées par la maximum probable de la crue auquel ces ouvrages font face.

2. Définition de la crue :

On appelle crue l'élévation du niveau d'un cours d'eau provoqué par les pluies ou par la fonte des neiges qui peuvent entraîner des submersions et des inondations plus ou moins destructrices.

3. Origine de la formation des crues :

Plusieurs origines des crues sont possibles issues de différentes situations:

a) Événements hydro-météorologiques intrinsèques ou combinés:

Précipitations extraordinaires (liquides ou solides) en intensité et/ou en durée.

Fonte extraordinaire de neige ou de glace (due à des températures tout aussi extraordinaires), ou fonte "normale" mais combinée avec d'autres événements (précipitations).

b) Embâcle ou débâcle de glace, de matériaux flottants (bois):

Les crues d'embâcle ou de débâcle de glace sont provoquées par le dégel printanier dans les régions où les cours d'eau gèlent durant l'hiver. Cette situation est caractéristique des régions froides comme la Sibérie ou le Canada mais est également possible en Suisse. Le dégel entraîne la mise en mouvement de blocs de glace qui peuvent s'accumuler au droit d'un obstacle. La retenue ainsi formée peut entraîner d'une part une élévation du niveau de l'eau à l'amont et des inondations par débordement. D'autre part, il est possible que la retenue se rompe brusquement, impliquant une crue brutale.

❖ La crue est caractérisée par :

- Son débit maximum instantané.
- Sa durée.
- Le volume total écoulé.
- La vitesse d'écoulement.
- L'hydrogramme de crue.
- La fréquence d'apparition.

Les crues qui nous intéressent sont la crue de projet, qui représente la crue maximale que l'ouvrage d'évacuation doit évacuer en toute sécurité qui correspond à la crue millénaire. La crue qui apparaît une fois tous les mille ans, ce débit maximum constitue le paramètre de base pour le dimensionnement des ouvrages d'évacuation.

4. Evaluation des débits maximaux des crues :

Il existe plusieurs méthodes pour la recherche du débit maximum de crue, au niveau technique elles doivent être adaptées essentiellement aux mesures et aux informations disponibles, au niveau de leur degré de développement et indirectement, à celui de leur coût, elles doivent prendre également en considération l'importance des aménagements à mettre en place et/ou celle des valeurs socio-économiques des biens que l'on souhaite protéger.

De manière générale, les méthodes de calculs utilisées se répartissent comme suit, fonction surtout des données disponibles dans la zone où l'on souhaite procéder à leur application :

Cas N01 : données existantes et en suffisance de pluies et de débits :

Application des méthodes statistiques :

- L'ANALYSE FREQUENTIELLE : Cette méthode se base sur le principe de l'ajustement d'une série d'observations à une loi de distribution statistique connue. Après quoi, il convient d'en vérifier son adéquation. Il est alors possible d'en extraire des résultats relatifs à des phénomènes rares et très rarement observés.

Les étapes à suivre sont les suivantes :

- L'échantillonnage : l'échantillon sera constitué de débit max instantané de chaque année, on obtient donc un échantillon q_i où i varie de 1 à N (nombre d'année).
 - Vérification des hypothèses d'indépendance, stationnarité et d'homogénéité de l'échantillon.
 - Classement de l'échantillon par ordre de grandeur décroissante ou croissante.
 - Attribution à chacune des observations une fréquence expérimentale $F(Q) = (i - 0,5)/N$
 - Reporter les points expérimentaux sur un papier de la loi d'ajustement.
 - Déterminer les paramètres de la droite d'ajustement.
 - Estimer les débits de crue en utilisant la droite d'ajustement.
- LA METHODE DU GRADEX : la méthode du gradex permet de déterminer les débits de crues exceptionnelles à partir des données pluviométriques qui sont généralement disponibles sur des périodes plus longues. Il faut néanmoins, disposer d'une série de débits longue d'au moins 10 ans pour être en mesure d'appliquer cette méthode. Elle est développée par EDF depuis 1966. Elle est applicable aux bassins versants de 0 à 5000 km² dont le temps de concentration, de ruissellement ou d'écoulement rapide est de 1 h à 4 jours.

Cette méthode s'appuie sur les hypothèses suivantes:

- Les crues fortes sont provoquées par des pluies fortes.
- Les pluies maximales et les débits correspondants (débits maximaux) suivent une même loi de distribution statistique
- On peut supposer que la capacité de rétention d'un bassin versant a une limite, autrement dit à partir d'une pluie d'une certaine fréquence tombée sur le bassin versant, toute quantité d'eau supplémentaire précipitée s'écoule intégralement.

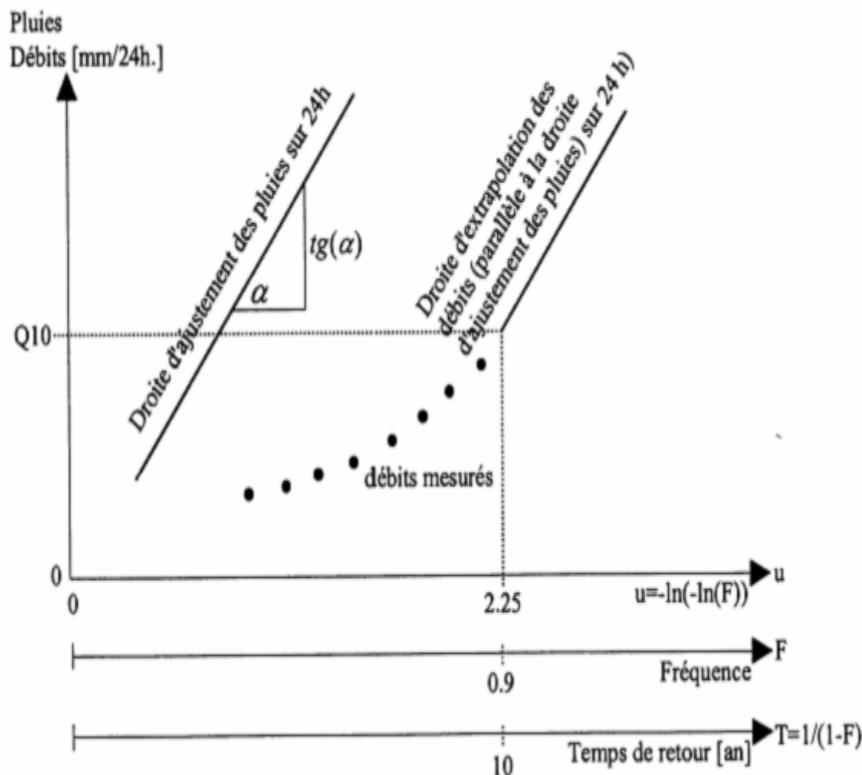


Figure I.1 : Principe de la méthode du GRADEX basé Sur une distribution de Gumbel

Cas N02 : données hydrométriques n'existent pas ou sont insuffisantes :

Application des méthodes semi-empiriques, parmi ces méthodes :

- **METHODE DE L'HYDROGRAMME UNITAIRE :** on appelle l'hydrogramme unitaire (HU), l'hydrogramme résultant d'une pluie effective (nette) de 1 cm (ou 1 mm) sur le bassin versant, ayant un volume de ruissellement direct de 1 cm (ou 1 mm). C'est une méthode semi-empirique proposée par L.K.SHERMAN, en 1930. C'est une des plus importantes contributions relatives au calcul du ruissellement de surface.

Elle permet de déterminer le ruissellement direct Q_d , auquel on doit ajouter le débit de base Q_b , calculé par ailleurs pour obtenir le débit total Q_T et le volume total de la crue.

Cas N03 : peu ou pas de données disponibles de débit et de pluie :

Application des méthodes analogiques et empiriques :

➤ **LES METHODES ANALOGIQUES :** Lorsque l'on ne dispose d'aucune donnée hydro-météorologique sur la zone dans laquelle on souhaite déterminer des crues, il est possible de procéder à une étude hydrologique sur un ou plusieurs autres bassins analogues et pour lesquels on dispose de mesures, Les résultats issus de telles études peuvent être alors transposés sur le bassin initial, moyennant des règles de transfert à établir. Celles-ci doivent être déterminées cas par cas, utilisant souvent un coefficient de transfert lié au rapport des surfaces contributives de chaque bassin considéré.

L'analogie hydrologique doit respecter certaines règles et critères:

- *La Morphologie des bassins versants "analogues" :* Ce sont essentiellement les paramètres de pente, orientation, densité de drainage, degré de confluence mais aussi le type de couverture végétale, la pédologie du versant et la nature de son substratum géologique qui interviennent.
- *La situation géographique des bassins versants "analogues" :* Il s'agit de la latitude, longitude et altitude ainsi que des régimes hydrologiques et climatiques.
- *Les aménagements réalisés dans les bassins versants "analogues" :* On doit prendre en compte et comparer les modifications de l'état de surface des bassins (cultures, forêt, urbanisation, activités économiques, ludiques etc..) ainsi que les modifications anthropiques du régime d'écoulement (aménagement de cours d'eau, dérivation, ouvrage de contrôle de ruissellement) et des retenues artificielles ou temporaires.
- *Les caractéristiques physiques des bassins versants "analogues" :* Essentiellement la surface, la longueur, la largeur, la forme, etc..

La qualité des résultats acquis de cette manière sur le bassin dépourvu de mesure dépend très fortement de la qualité de l'analogie effectuée. Il convient donc d'effectuer cette dernière avec minutie.

➤ **LES FORMULES EMPIRIQUES :** Celles-ci sont de diverse nature, fonction du type de données disponibles sur l'ensemble du bassin versant concerné par l'estimation des crues.

Il y a plusieurs on peut citer parmi ces formules :

- Formule de Mallet-Gautier :

$$Q = 2. K. \log(1 + a.P) . \frac{A}{\sqrt{2}} . \sqrt{1 + 4. \log T - \log A}$$

Où : Q : débit maximum à la période T (m^3/s)

P : pluie moyenne sur le bassin (mm)

A : aire du bassin (km^2)

L : longueur de thalweg principal (km)

T : période de retour adopté en année

a : coefficient topographique qui varie de 20 à 30

K : coefficient géomorphologique lié à la pente du bassin versant $0,7 \leq K \leq 3$.

- Formule de Samie :

$$Q_{\max} = \frac{P_{J \max} \cdot A \cdot C \cdot K \cdot 10}{3600 \cdot 24}$$

Où : $P_{J \max}$: pluie maximale journalière (mm)

A : aire du bassin (km^2)

K : coefficient d'amortissement de la crue

C : coefficient de ruissellement en fonction de la période donnée

Tableau I.1 : Coefficient de ruissellement en fonction de la période donnée

T (ans)	10	20	50	100	1000	10000
C	0,65	0,70	0,72	0,80	0,85	0,95

5. L'intérêt de la recherche (l'enquête) :

Elles peuvent se situer à deux niveaux:

- Immédiatement après une crue spécifique, auprès des personnes qui ont vécu l'événement.

- En archive et/ou par le biais d'autres enquêtes personnelles, pour retrouver des informations historiques sur le comportement des crues dans une région ou pour une rivière donnée.

L'enquête directe permet d'obtenir des informations qu'il faut analyser avec la même prudence que pour celles concernant les mesures.

L'enquête historique permet plus de situer l'événement dans sa chronologie (donc utile à l'estimation de la fréquence d'apparition de la crue dans un contexte géographique et socio-économique spécifique) que d'estimer ses grandeurs. De telles informations sont également très utiles pour définir une "crue de projet" lors de dimensionnements d'ouvrages ou d'évaluation des risques hydrologiques.

6. Conclusion :

Le choix d'une méthode particulière d'estimation des crues de projet reste un des aspects les plus critiques dans la phase de dimensionnement d'un ouvrage. Malheureusement, les critères ou recommandations dans ce domaine sont très limités voire inexistants. Avec tous les critères qu'on a fait au dessus, il n'en reste pas moins que la décision finale comportera inévitablement une large part d'intuition et de subjectivité fonction de l'expérience du projeteur. Comme critère général, nous pouvons souligner que la méthode choisie devrait être, dans la mesure du possible, dérivée à partir d'observations sur le site ou dans son voisinage immédiat. A l'extrême, il faudrait compter sur des applications montrant clairement les aptitudes de la technique choisie à reproduire le comportement statistique des variables d'intérêt.

Le choix d'une méthode d'estimation des crues de projet devrait tenir compte des facteurs suivants:

- Les hypothèses de bases et leurs fondements théoriques sont-ils applicables au bassin versant considéré?
- Quelles données (type, qualité et longueur d'enregistrement) sont disponibles pour la calibration d'un modèle ou l'éventuelle adaptation d'une formule plus simple?
- Quelles sont les variables de dimensionnement pertinentes (débit de pointe, hydrogramme complet de crue, séries continues de hauteurs d'eau?)

Chapitre II

LA CONCEPTION D'EVACUATEUR DE CRUES

1. Introduction :

La submersion d'un barrage au passage d'une forte crue est toujours un phénomène particulièrement dangereux. Une grande proportion des accidents de rupture survenus à des barrages ont eu pour origine des surverses provenant de crues qui dépassaient les possibilités du dispositif d'évacuation.

L'évacuateur de crue est un ouvrage destiné à l'évacuation de la crue de projet afin d'éviter la submersion du barrage qui peut conduire à sa destruction et ceci de la manière la plus économique et la plus sûre que possible.

2. Différents types d'évacuateur de crue:

Suivant le fonctionnement hydraulique et la position de leur entonnement par rapport au niveau normal de retenue, on distingue deux types d'évacuateur de crue :

- Les évacuateurs de surface, les plus fréquents, sont caractérisés par le fait que le débit excédentaire est prélevé à une cote très voisine du niveau normal de retenue.
- Les évacuateurs de demi-fond ou de fond qui ont leur entonnement calé très largement en-dessous de ce niveau.

2.1 Les évacuateurs de surface :

L'évacuateur de surface comporte généralement trois parties :

- A l'amont, un seuil déversant sur lequel s'établit l'écoulement torrentiel et qui contrôle ainsi le débit évacué.
- Un ouvrage intermédiaire d'accompagnement à pente accentuée appelé coursier, qui entretient ou accélère l'écoulement torrentiel.

Pour les évacuateurs de surface en charge, il s'agit d'une conduite ou une galerie qui conduit l'écoulement vers l'aval.

- Un ouvrage terminal à partie duquel le flot évacué revient au lit naturel : cuillère déflectrice avec ou sans fosse d'amortissement aménagé, ou bassin à ressaut.

Le coursier et l'ouvrage terminal sont parfois inexistantes ou très partiellement réalisés : c'est le cas de certains évacuateurs de surface portés par des barrages voûtes.

Les évacuateurs de surfaces se subdivisent en ouvrages vannés ou non vannés. En règle générale ils conduisent des écoulements à surface libre avec accélération continue depuis un seuil de contrôle placé près de leur origine. Plus rarement, dans le cas de configurations souterraines, l'écoulement peut être à surface libre pour les débits faibles et moyens avec seuil de contrôle à l'amont, et devenir en charge sur tout ou partie du chemin d'eau, par un contrôle par un orifice ou la conduite elle-même. Habituellement la partie en charge correspond au puits vertical ou fortement incliné qui forme la première partie de l'évacuateur. Les siphons de décharge sont un cas particulier d'évacuateur de surface en charge.

Donc, on peut distinguer deux types d'évacuateurs de surface :

- Evacuateur à ciel ouvert.
- Evacuateur en charge.

2.1.1 Evacuateur à ciel ouvert :

Il est constitué au départ de la retenue par le déversoir dont le seuil se développe en général linéairement, débitant dans un canal à pente qui amène l'eau du côté aval du barrage, l'eau emprunte ensuite un coursier dont la forte pente permet de rattraper la différence de coté entre le niveau et le lit de l'oued en aval. Un dispositif de réception dont la fonction est de dissiper l'énergie cinétique de l'eau.

Les évacuateurs de ce type les plus utilisés sont classifiés selon la forme du déversoir :

- Evacuateur à déversoir latéral.
- Evacuateur à déversoir frontal.
- Evacuateur à déversoir bec de canard.
- Evacuateur à seuil labyrinthe.

a) Evacuateur latéral :

Il permet d'avoir un seuil déversant de grande largeur, ce qui pour effet d'augmenter la capacité de l'évacuateur et réduire ainsi la surélévation du plan d'eau dans la retenue en période de crue.

b) Evacuateur à bec de canard :

Il permet la réduction du volume d'excavation qui serait trop important pour autre type d'évacuateur, et permet aussi une bonne alimentation et un écoulement non perturbé.

c) Evacuateur à seuil labyrinthe :

Sa largeur est tracée en labyrinthe qui permet d'augmenter la longueur déversante et par conséquent la lame déversée va automatiquement diminuer.

d) Evacuateur frontal :

Sa réalisation est la plus simple par rapport aux autres types.



Evacuateur frontal



évacuateur bec de canard



Evacuateur labyrinthe



Evacuateur latéral

Figure II.1 : ces photos représentent les types d'évacuateurs de crue à ciel ouvert

❖ Ce type d'évacuateur présente les avantages suivants :

- Grande sécurité pour le barrage.
- Commodité et facilité de l'exécution des travaux de construction et de réparation.
- Accès facile à n'importe quelle période de l'année.
- Technique de réalisation simple.
- En cas de fortes crues de débit supérieur au débit de la crue de projet, les débordements et les affouillements éventuels n'atteindront pas le barrage et seront, généralement, limités.

2.1.2 Evacuateur en charge :

Dans ce type d'évacuateur, l'eau est déversé par un déversoir à crête circulaire dite tulipe, puis transit verticalement par un puits ou un convergeant (entonnoir) la chute libre tel que

l'écoulement soit en charge jusqu'à un coude qui fait la jonction avec la galerie d'évacuation à faible pente ou l'écoulement doit se faire de préférence à surface libre afin d'avoir une meilleure évacuation. Cette galerie est suivie par un ouvrage de dissipation d'énergie.

Le déversoir tulipe fonctionne comme un déversoir de surface tant qu'il est dénoyé, il débite pratiquement comme un orifice à veine moulée.

❖ Ses avantages sont :

- L'absence d'ouvrage de raccordement de bief.
- La possibilité d'être combiné avec la dérivation provisoire.
- L'évacuation de grands débits.

Le siphon est un cas particulier d'évacuateur en charge. Il est constitué par une conduite épousant schématiquement la forme de la digue et dont l'amorçage est réalisé automatiquement par la surélévation du plan d'eau de la retenue. Son débit est proportionnel à la racine carrée de la charge. Il peut donc être très important. L'écoulement se produit comme dans un tuyau coudé.



Figure II.2 : évacuateur de crue tulipe

Ce type d'évacuateur a des avantages, mais il a aussi beaucoup des inconvénients lesquels :

- La réalisation d'un puits ou d'une galerie de grands diamètres reste toujours difficile vue l'importance du volume d'excavation.
- Moins de sécurité en service en cas de l'évacuation du débit de crue (risque d'engorgement).
- Les deux chantiers (barrage et évacuateur) doivent être conduits simultanément, ce qui crée une tension dans l'avancement des travaux et une durée plus longue.

- Il faut prévoir de grands soutènements et blindages de la galerie qui présente des dimensions considérables.

2.1.3 Seuil libre :

L'évacuateur de surface n'exige pas de vannes systématiquement. C'est un avantage remarquable car le seuil libre est préférable lorsque les conditions locales (probabilité non négligeable d'hydrogramme de crue à front très raide, sismicité élevée, fiabilité incertaine de l'entretien et de l'exploitation, isolement du site et difficultés d'accès) font que la disponibilité des vannes et leur utilisation opportune sont sujettes à caution.

Certains auteurs ont proposé de ranger parmi les facteurs de décision concernant le choix entre évacuateurs avec ou sans vannes, le rapport Q/S , dans lequel Q est le débit de pointe de l'hydrogramme de la crue qui entre dans le réservoir exprimé en m^3/s , multiplié par 3600, et S la surface de ce réservoir en m^2 au niveau normale de retenue.

Il s'agit donc d'une vitesse de montée en mètre par heure, l'évacuateur non vanné serait préférable dans le cas des vitesses de montée excédant 1 à 2m/h.



Figure II.3 : évacuateur de surface à seuil libre

2.1.4 Seuil vanné :

Lorsque les débits des crues sont importants et que le risque d'indisponibilité ou d'utilisation malencontreuse des vannes est insignifiant, le seuil vanné est généralement préféré car il est moins cher.

A noter que, quelle que soit la fiabilité des vannes, il est souvent prescrit de considérer le cas d'une ou de plusieurs vannes bloquées sans qu'il y ait déversement sur l'ouvrage. Ceci conduit à augmenter le nombre des vannes ou à prévoir un évacuateur de secours.

2.1.5 Types et dispositions des vannes, domaines d'application :

On peut choisir essentiellement entre :

- Les clapets ou volets.
- Les vannes plates.
- Les vannes segments.

Les clapets ou volets ne sont réalisables que pour des lames de quelques mètres de hauteur. Leur application est généralement réservée aux seuils de grande longueur et plus particulièrement à la partie déversante des barrages en rivière.

Les vannes plates peuvent atteindre des dimensions des dimensions considérables. Cs sont presque toujours des vannes à roue fixes (vanne wagon) ; ils sont utilisés avec une grande section et sous une forte charge, qui ne sont pas donc des vannes des évacuateurs de surface. Les vannes plates peuvent comporter un ou plusieurs ou plusieurs tabliers, associés à des clapets superficiels. Elles présentent l'inconvénient d'exiger des rainures de grandes dimensions, des efforts de levage importants et des superstructures coûteuses et inesthétiques.

Les vannes les plus fréquemment utilisées pour le contrôle de débits importants sur les évacuateurs de surfaces sont *les vannes segments*, à cause de la simplicité de leur construction, des efforts de manœuvres relativement faibles et de l'absence de rainures latérales

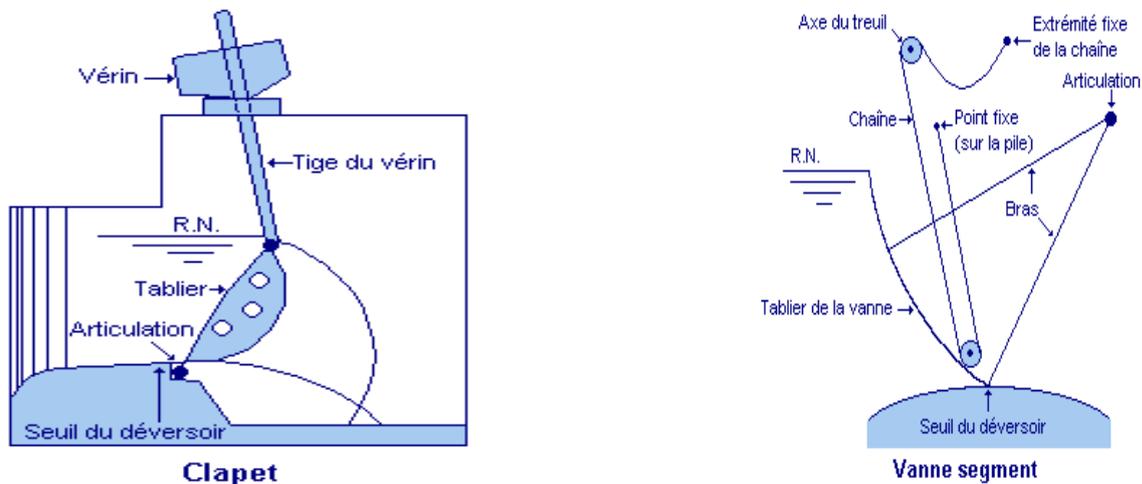


Figure II.4 : vanne clapet et vanne segment

2.2 Les évacuateurs de fond et de demi-fond :

Les ouvrages considérés sont les pertuis, conduits ou galeries équipés de vannes, fonctionnant en charge sur tout ou partie de leur longueur et destinés à évacuer ou restituer l'eau de la retenue dans la rivière à l'aval du barrage. Bien qu'il n'ait pas de critère strict de classification, le terme évacuateur de demi-fond ou de fond s'applique plus particulièrement aux ouvrages fonctionnant sous une charge qui est la hauteur complète du barrage ou une fraction importante de cette hauteur.

Les progrès réalisés, en particulier dans la technologie des vannes, ont permis l'utilisation de pertuis de fond de grande section et sous forte charge pour l'évacuation de gros débits de crue. Cette possibilité présente des avantages certains. Un inconvénient peut être que la capacité d'évacuation est proportionnelle à la racine carré de la charge, de sorte que lorsque le régime des débits n'est pas bien connu, il peut être nécessaire d'associer à l'évacuateur de fond un évacuateur de surface, afin de mieux s'assurer contre les risques de débordement.



Figure II.5 : évacuateur du fond (pertuis)

Les buts auxquels peuvent répondre les pertuis dans les barrages peuvent énumérés comme suit :

- La maîtrise de l'évacuation des crues.
- La vidange du réservoir pour l'entretien du barrage.
- La maîtrise du niveau de la retenue lors du premier remplissage.
- L'abaissement rapide du niveau du réservoir en cas d'anomalies.
- L'évacuation des sédiments.
- La dérivation provisoire des cours d'eau pendant la construction du barrage.
- La réalisation d'un creux préventif dans la retenue avant l'arrivée d'une crue.

2.2.1 Les types des pertuis :

On peut distinguer deux types de pertuis, les pertuis de grande capacité d'évacuation et, les pertuis essentiellement pour objet le réglage fin du débit restitué en aval.

Le choix dépend des dispositions générales des ouvrages du barrage, des caractéristiques des écoulements et des dispositions adoptées pour la restitution.

Ce type d'évacuateur comprend deux vannes, une vanne de contrôle du débit et une vanne de garde.

Les vannes de contrôle du débit des pertuis de grande capacité peuvent être des vannes segments ou des vannes plates ; généralement on adopte les vannes plates comme vanne de garde.

Pour les pertuis destinés à un réglage fin des débits, différents types de robinets-vannes placés normalement en bout de conduite sont utilisés conjointement avec des vannes ou des robinets de garde.

2.2.2 Vannes de contrôle des pertuis de fond de grande capacité d'évacuation :

Dans l'évolution de la conception des grands pertuis de fond, la tendance est d'utiliser de plus en plus fréquemment des *vannes segments* pour le contrôle du débit. Le gros avantage de la vanne segment dans les installations à forte charge est de ne pas nécessiter de rainures qui constituent une source de cavitation par les décollements de l'écoulement qu'elles entraînent.

2.2.3 Vannes de garde des pertuis de fond de grande capacité :

Les vannes de garde doit pouvoir couper le débit des pertuis en charge. On adopte normalement une vanne plate (wagon) située plus ou moins loin en amont de la vanne de contrôle, suivant la disposition du pertuis. Elle peut être placée en amont ou en aval de la forme d'entonnement.

2.2.4 Vannes des pertuis destinées à un réglage fin des débits restitués :

Les robinets à jet creux divergent placés à l'extrémité d'une conduite forcée sont les plus communément utilisés pour le réglage fin des débits restitués sous forte charge.

3. Composants d'un évacuateur de crue :

Un évacuateur comprend trois parties principales :

- Une section de contrôle du débit, à l'amont.
- Un chenal ou une galerie dans lequel le débit s'écoule d'amont en aval.
- Un dissipateur d'énergie en aval.

3.1 Section de contrôle :

Le contrôle de débit est le plus souvent assuré par un déversoir, soit un déversoir à écoulement libre (cas le plus fréquent), avec ou sans vanne. Un autre débit de contrôle peut être assuré par un orifice (évacuateur du fond ou demi-fond).

On rencontre également le cas de l'évacuateur des crues par conduits en charge (évacuateur puits) ou en dépression (évacuateur en siphon).

3.2 Chenal ou galerie de l'évacuateur de crue :

L'élément hydraulique qui conduit le débit de crue de la section de contrôle en amont, à la rivière, présente des formes variées. Ces formes dépendent surtout du type de barrage et de la topographie de la vallée.

Dans le cas des barrages poids en béton, c'est un coursier à forte pente qui prolonge le déversoir et s'appuie sur le parement aval ou même sur la centrale au pied du barrage.

Les barrages voûtes peuvent difficilement être munis d'un coursier complet. Le plus souvent c'est à jet libre, soit à partir d'un déversoir superficiel, soit par un orifice de fond ou de demi-fond que l'eau est envoyée vers l'aval.

Au droit des barrages en terres ou en enrochement, il est préférable en général un déversoir débouchant dans un chenal à surface libre de type "long", soit dans vallée latéral, soit à cote du barrage.



Figure II.6 : coursier du barrage de Foz do Areia (Brésil)

3.3 Dissipateur d'énergie :

Il constitue un des éléments essentiels de l'évacuateur. La dissipation d'énergie se réalise par frottements et chocs, soit de l'eau sur le radier du dissipateur, soit de l'eau en mouvement sur l'eau, soit de l'eau en air.

Les principaux types sont :

- Bassin de dissipation à ressaut hydraulique.
- Bassin de réception d'un jet libre, par un saut de ski
- Dissipation au sein même d'un coursier par dents de dissipation ou blocs brise-charge.

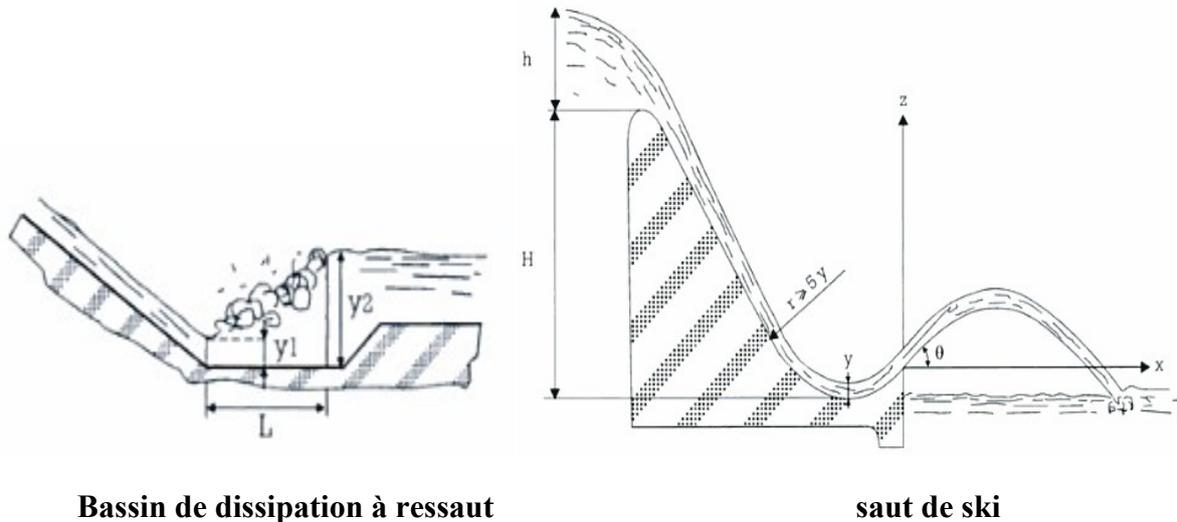


Figure II.7 : dissipateur d'énergie

4. Facteurs intervenants dans la conception d'évacuateurs de crues :

Outre l'importance du risque en termes de vies humaines et le coût de construction, les facteurs principaux à considérer dans le choix de l'évacuateur le plus approprié à un projet donné, sont les suivantes :

- Hydrologie
- Topographie
- Type de barrage
- L'économie

➤ Dans le cas d'une forte crue il est préférable que l'évacuateur de crues soit à surface libre car son débit croît comme la puissance de $3/2$ de sa charge. Si le plan d'eau s'élève exceptionnellement au-dessus du niveau de plus hautes eaux en empiétant sur la revanche, on dispose d'une marge de sécurité beaucoup plus importante que dans le cas d'une évacuation en charge comme un pertuis par exemple dont le débit ne varie qu'en fonction de la puissance $1/2$ de la charge, c'est pour cela ce type d'évacuateur est préférable dans le cas des crues faibles.

Un évacuateur de surface est placé selon le cas, sur l'une des rives ou au centre du barrage (évacuateur central) pour le cas d'un barrage en béton.

➤ En général, on cherche à placer l'évacuateur dans une zone dégagée où la pente du versant est faible, ce qui diminue le volume des terrassements. On peut alors réaliser un évacuateur à seuil frontal. C'est la meilleure disposition du point de vue hydraulique.

- Si les versants à fortes pentes, ce qui conduit à des volumes de déblais importants, il est alors préférable d'utiliser un déversoir à seuil latéral dont l'emprise dans le sens transversal de la vallée est beaucoup moins important.
- Si la lame d'eau déversé est importante et les conditions du site ne permettent que de faire un seuil frontal qui n'est pas capable d'évacuer cette lame d'eau, on peut augmenter la longueur du seuil par la conception soit d'un seuil à bec de canard soit un seuil labyrinthe pour augmenter la capacité d'évacuation des crues et diminuer la lame déversante.
- La solution du déversoir central est intéressante dans le cas des vallées à versants en fortes pentes et lorsque un débit à évacuer est important. Mais pour un barrage en terre c'est ne pas le cas, si difficile de mettre l'évacuateur sur l'une des rives du barrage la meilleur solution c'est d'implanter un évacuateur puits ou une tulipe dans la cuvette du barrage pour l'évacuation de la crue. Si la crue est importante, on peut mettre plusieurs puits à différentes hauteurs.
- Parfois lorsque la crue à évacuer est importante et les conditions topographiques ne permettent pas d'allonger le seuil, il est intéressant d'implanter un évacuateur tulipe dans la cuvette du barrage avec une déférence hauteur par rapport le seuil libre pour augmenter la capacité d'évacuation.
- Après le déversoir il y a toujours un coursier qui conduit l'eau au thalweg, il est fortement conseillé de lui donner une section rectangulaire ce qui assure un écoulement régulier. En générale l'expérience montre que la forme la plus économique correspond à une largeur égale à deux fois le tirant d'eau. Par contre pour un barrage en béton, il n'y a pas de coursier, juste en bas du déversoir un bec déviateur (saut de ski) installé pour relancer l'eau vers le haut suivant un angle θ en générale de l'ordre de 35° à 45° et le jet retombe dans une cuvette de dissipation à distance.
- Pour les barrages en béton de petites hauteurs il est économique de ne pas faire de coursier et de déverser directement dans un bassin de plongée renfermant un matelas d'eau qui forme un excellent dissipateur et débouchant directement dans un chenal à faible pente conduisant à la rivière.
- Pour les barrages en terre, la dissipation de l'énergie se fait par un bassin à ressaut avec une longueur bien déterminée en fonction du nombre de Froude et la hauteur de chute qui fait réduire la vitesse à une valeur compatible avec la stabilité des berges en aval.
- Pour un nombre de Froude plus élevé ce qui donne un bassin un peu long, pour raccourcir le bassin et éviter le déplacement du ressaut à l'aval, il y a le bassin de type impact suivant le nombre de F.
 - Pour $2,5 < F < 4,5$, il y a le bassin d'impact de type I.
 - Pour $F > 4,5$ et si la vitesse d'entrée ne dépasse pas le 15 m/s, on utilise le bassin d'impact de type II.

- Pour $F > 4,5$ et la vitesse d'entrée dépasse le 15 m/s, il est préférable d'utiliser le bassin en type III.

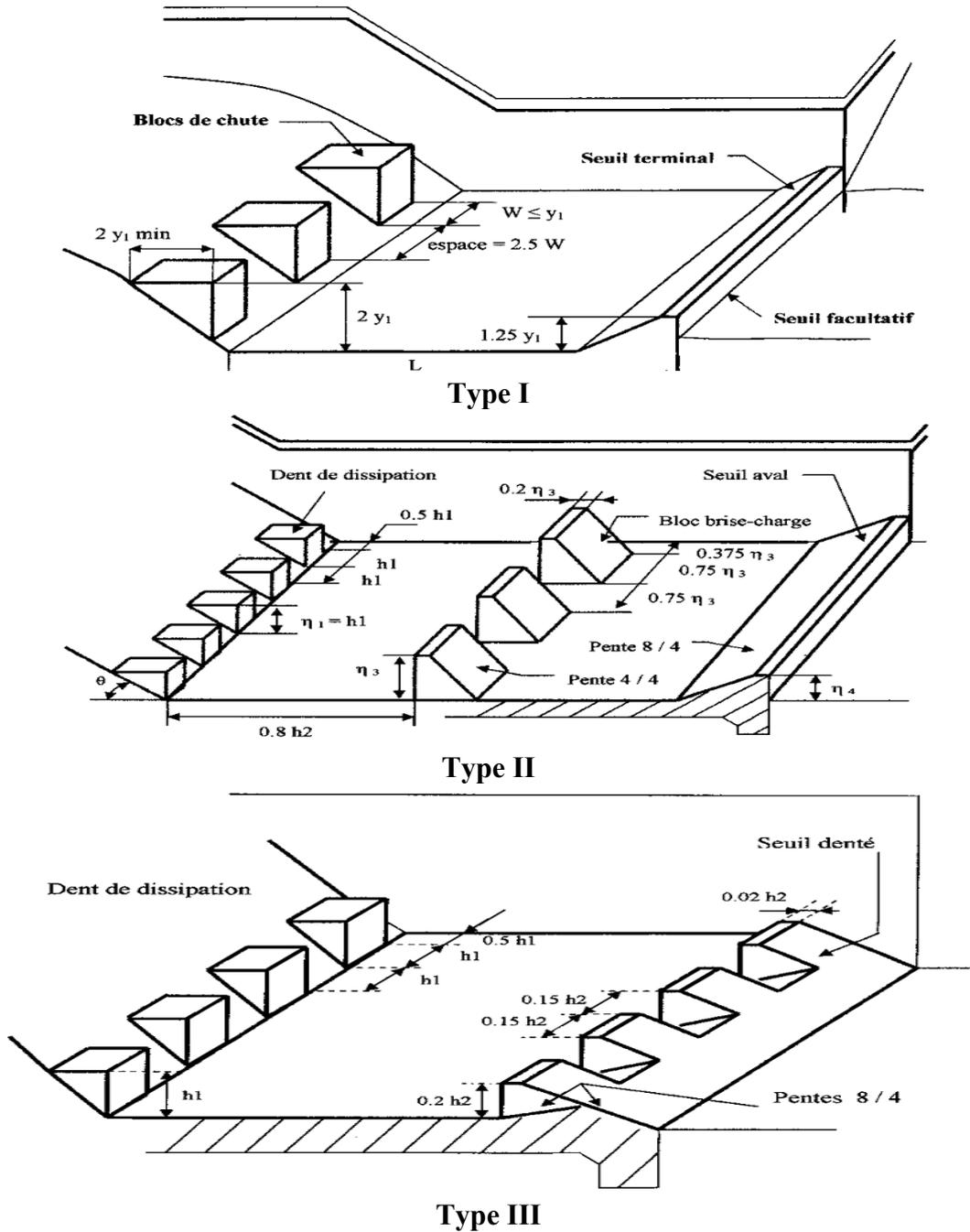


Figure II.8 : Bassin de type d'impact

5. Problème de sous-pression et l'érosion par cavitation :

Le coursier est un organe dont la pente est plus forte; permettant ainsi à l'eau de rattraper la différence de côte entre le niveau de la retenue et le lit de rivière à l'aval.

Avec l'accroissement de la hauteur des barrages, les vitesses d'écoulement sur le coursier peuvent atteindre 50 m/s. On assiste à des écoulements à surface libre supercritiques ($Fr \gg 1$) induisant des pressions faibles qui sont à l'origine du phénomène d'érosion par cavitation.

5.1 Erosion par cavitation :

Lorsque la pression dans un écoulement décroît jusqu'à la limite inférieure fixée par la pression de vapeur P_v , des particules d'eau s'évaporent. L'eau perd son homogénéité et l'écoulement devient diphasique (écoulement constitué d'eau et de bulles de vapeur.) Ce phénomène est appelé cavitation.

Si la pression dans l'écoulement augmente à nouveau, les bulles de vapeur reviennent brusquement à l'état liquide. Il en résulte une implosion des bulles, libérant localement des énergies considérables.

Celles-ci peuvent endommager les matériaux en contact avec cet écoulement ce qui conduit au phénomène d'« *érosion par cavitation* »

5.2 Protection du coursier contre l'érosion par cavitation :

La cavitation peut être empêchée par:

- ✓ Utilisation des matériaux résistants à la cavitation (béton à haute résistance).
- ✓ aération artificielle de l'écoulement.

Il est possible d'utiliser des bétons spéciaux (à haute résistance), des revêtements d'acier, des surfaçages en résine polymère.

Ces solutions sont coûteuses et ne sont pas satisfaisantes pour des vitesses supérieures à 30 m/s.

Si le danger d'érosion par cavitation devient important, il faut viser la deuxième possibilité.

Cette méthode consiste à augmenter la compressibilité du fluide en près de la surface du coursier en introduisant de l'air dans l'écoulement: (aération forcée).

En effet, quand l'aération de surface est insuffisante, ou si les vitesses sont trop élevées ($V > 30$ m/s), une quantité additionnelle d'air doit être introduite artificiellement. Ceci est réalisé à l'aide de dispositifs de ventilation par le fond ou par les côtés, appelés aérateurs.

Le résultat est alors un écoulement à pression atmosphérique en surface et au fond. Cette disposition est parfois moins coûteuse si elle est prévue dès le début du projet et n'est pas soumise aux contraintes de vieillissement de la surface de l'évacuateur de crues.

L'aération peut être réalisée aux moyens des différents types d'aérateurs:

On distingue comme types de base:

- Les déflecteurs.
- Les gradins.
- Les fentes.

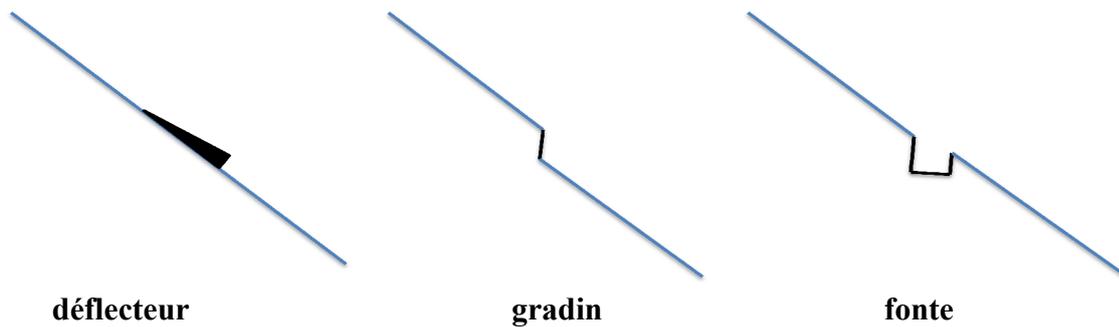


Figure II.9 : les types des aérateurs

6. Calcul hydraulique d'un évacuateur de surface :

6.1 Profil de déversoir :

Le déversoir de type Greager est le plus répandu de part le monde. Il s'adapte mieux à la lame d'eau déversante.

Le débit est contrôlé par le déversoir situé à l'amont de l'évacuateur. Pour qu'il soit ainsi, les parties à l'aval (chenal, coursier...) doivent être conçues pour évacuer le débit du déversoir sans perturber l'écoulement de celui-ci, tel que cet écoulement soit dénoyé.

La surface de déversement peut être construite à l'aide des coordonnées de Greager pour une charge d'eau de 1 m.

Pour obtenir les coordonnées concrètes, les valeurs proposées par Greager sont multipliées par la charge déversée.

$$\frac{H_1}{H} = \frac{X_1}{X}$$

} pour $H = 1\text{ m}$, charge de Greager.

$$\frac{H_1}{H} = \frac{Y_1}{Y}$$

Donc : $X_1 = H_1 * X$

$$Y_1 = H_1 * Y$$

H_1 : la lame déversée obtenue par le laminage de crue.

6.1.1 Laminage de crue :

Le laminage de la crue correspond au stockage temporaire dans la retenue d'un volume d'eau dans la tranche entre le niveau normal et le niveau des plus hautes eaux.

L'hydrogramme sortant à l'évacuateur est de ce fait plus "aplati" que l'hydrogramme à l'entrée dans la retenue.

Le mécanisme du laminage peut être traduit rigoureusement par l'équation suivante (pendant le temps dt , le volume entrant dans la retenue est égal à la somme du volume sortant et du volume stocké) :

$$Q_e(t) dt = Q_s(z) dt + S(z) dz$$

$Q_e(t)$: débit de la crue entrant dans la retenue

$Q_s(z)$: débit sortant à l'évacuateur

Z : cote de l'eau dans la retenue

$S(z)$: surface du plan d'eau à la cote z

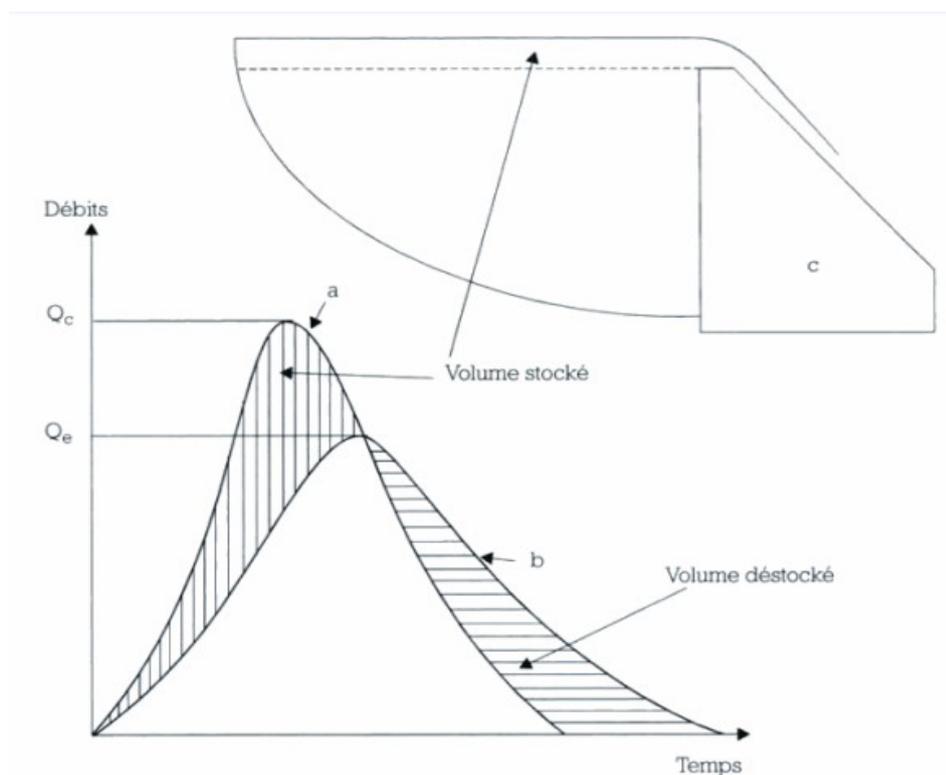


Figure II.10 : visualisation de l'effet de laminage

a : l'hydrogramme de crue à l'entrée de la retenue.

b : l'hydrogramme de crue sortant à l'évacuateur.

c : l'évacuateur vue en coupe.

Par le débit laminé et la lame déversée, on peut tirer les dimensions de l'évacuateur (la largeur) par l'équation du déversoir :

$$Q_s = m * b * \sqrt{2g} * h^{3/2}$$

Q_s : débit sortant à l'évacuateur (débit laminé) (m^3/s)

m : coefficient du débit (0,49)

b : la largeur du déversoir (m)

g : l'accélération de la pesanteur ($9,81 m/s^2$)

h : la hauteur d'eau au dessus du déversoir (la lame déversée) (m)

6.2 Chenal d'écoulement :

Le chenal fait directement suite au déversoir, sa pente est suffisamment faible (inferieur à la pente critique pour que le régime soit fluvial).

$$I < I_{cr}$$

- La pente critique est la pente que doit prendre un canal pour que la profondeur normale soit égale à la profondeur critique.

Pour calculer la pente critique en associera donc la relation du régime uniforme

- La condition du régime critique est donnée par :

$$\frac{Q^2 * b}{g * S^3} = 1$$

- Le débit à évacuer est donné par la formule :

$$Q = C.S.\sqrt{R_h} . I$$

➤ On trouve :

$$I_{cr} = \frac{g * S}{C^2 * b * R_h}$$

❖ Pour une section rectangulaire : $S = b \cdot h$.

$$I_{cr} = \frac{g \cdot h_{cr}}{C^2 \cdot R_{h_{cr}}}$$

I_{cr} : la pente critique (m/m).

Q : débit déversé (m^3/s).

C : coefficient de Chezy.

R_{cr} : rayon critique ; $R_{cr} = S_{cr}/P_{cr}$ (m)

S_{cr} : section critique ; $S_{cr} = b \cdot h_{cr}$ (m^2)

P_{cr} : Périmètre critique ; $P_{cr} = 2h_{cr} + b$ (m)

g : l'accélération de la pesanteur (9,81 m/s).

- Par définition la hauteur critique est atteinte lorsque l'énergie spécifique est minimale:

Elle est donnée par la formule suivante :

$$h_{cr} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g \cdot b^2}}$$

Régime fluvial $\Rightarrow h > h_{cr}$

h : la hauteur de l'eau (m).

h_{cr} : la hauteur critique (m).

b : largeur déversante (m).

Il a une section rectangulaire qui est la disposition hydraulique la plus intéressante après un déversoir. Sa longueur n'est pas importante car il sert uniquement à contourner le sommet du barrage avant d'aboutir au coursier dans la zone aval.

6.3 Coursier :

Le calcul hydraulique a pour but : la détermination du tirant d'eau (la ligne d'eau) afin de dimensionner le coursier de façon à optimiser le volume du béton et la hauteur des murs bajoyers.

La longueur du coursier est obtenue directement du plan topographique, sa pente doit être un peu forte pour que son écoulement soit torrentiel.

$$I > I_{cr}$$

$$h < h_{cr} \quad \text{et} \quad h_{cr} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g * b^2}}$$

b : la largeur du coursier (m).

La largeur du coursier est fixée par la topographie et l'économie.

La hauteur des bajoyers doit tenir compte d'une revanche de l'ordre de 0,5 m, valeur suffisante dans le cas des petits ouvrages, pour éviter tout débordement sur le talus du barrage. Dans le cas général, « design of small dams » propose la formule suivante pour l'évaluation de la revanche :

$$R = 0,6 + 0,05.V.\sqrt[3]{y}$$

R : la revanche (m).

V : la vitesse dans la section considérée (m/s).

y : la profondeur d'eau dans la section considérée (m).

Donc, la hauteur des murs bajoyers est calculée selon l'expression :

$$H_m = y + R \quad (\text{m}).$$

La ligne d'eau :

L'équation de la surface libre de la ligne d'eau, est une équation liée à l'abscisse et à l'ordonnée de chaque point de la ligne d'eau pour un débit et une pente du canal donnée.

$$\frac{d h}{d x} = \frac{I - J}{1 - \frac{Q^2 * b}{g * S^3}}$$

J : la pente hydraulique.

Pour le tracé de la surface d'eau, on doit passer par l'intégration de l'équation.

On peut distinguer pour cela 3 méthodes de calcul :

- La méthode par approximation successive.
- La méthode par intégration directe.
- La méthode par intégration graphique.

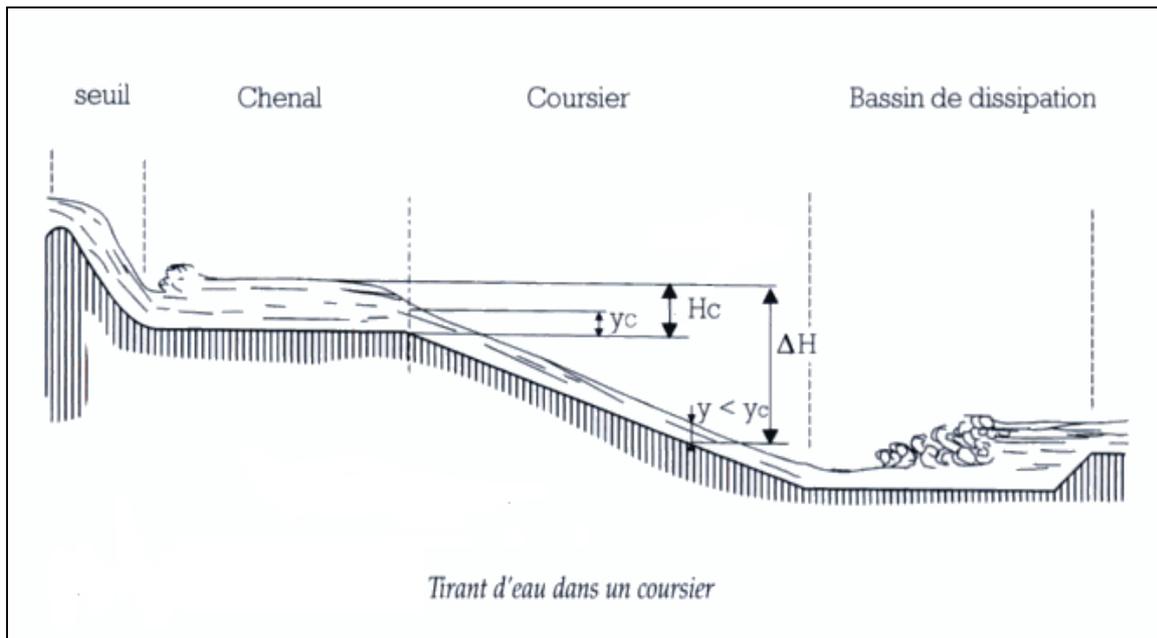


Figure II.11 : le régime d'écoulement dans le coursier

6.4 Dissipateur d'énergie :

Pour la restitution des eaux évacuées par le coursier vers l'oued, il y a plusieurs dispositions tels que : un bassin de dissipation, saut de ski.

6.4.1 Bassin à ressaut :

Le procédé le plus employé à travers le monde est le bassin à ressaut. C'est un moyen très efficace pour réduire la vitesse de sortie de l'eau à une valeur compatible avec la stabilité des berges à l'aval.

❖ Les problèmes qui se présentent au sujet de ressaut sont essentiellement les suivants :

- Etant donné une profondeur h_1 , on détermine la profondeur h_2 ou vice-versa.
- Calculer la perte de charge
- Déterminer la longueur du ressaut.

➤ **Détermination des profondeurs conjuguées :**

En appliquant à la masse liquide comprise entre (S1) et (S2) le théorème d'EULER, on obtient:

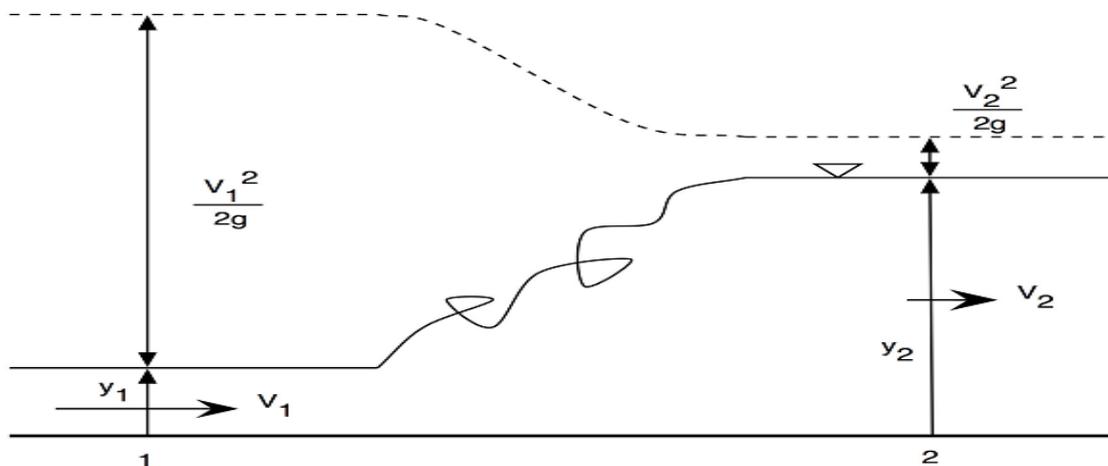


Figure II.12 : visualisation du resseau hydraulique

$$\gamma \cdot y_1 \cdot S_1 - \gamma \cdot y_2 \cdot S_2 = \rho \cdot Q \cdot v_2 - \rho \cdot Q_1 \cdot v_1$$

$$y_2 = \frac{y_1}{2} * (-1 + \sqrt{1 + 8F_r^2})$$

$$F_{r1} : \text{nombre de froud ; } F_{r1} = \sqrt{\frac{Q^2 * b}{g * S_1^3}}$$

➤ **La perte d'énergie :**

Le ressaut provoque une importante dissipation d'énergie :

$$\Delta H = H_1 - H_2$$

Pour une section rectangulaire :

$$\Delta H = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4 * y_2 * y_1}$$

➤ **Longueur du ressaut :**

la longueur du ressaut est très difficile à déterminer. Elle peut être approché empiriquement par :

$$5 < \frac{L_{r e s s a u t}}{y_2 - y_1} < 7$$

6.4.2 Saut de ski :

Ce dispositif est constitué d'une cuvette cylindrique placé au pied du coursier et terminé par un bec qui fait office de tremplin. L'eau est ainsi relancée vers le haut suivant un angle que l'on choisit en général de l'ordre de 35 à 45.

Selon **USBR** le rayon de courbure de la cuvette est pris égal à au moins cinq fois le tirant d'eau au pied du coursier.

La trajectoire du jet sortant de saut de ski est donnée par :

$$Y = X * \operatorname{tg} \theta - \frac{X^2}{K * \left(4 * y + \frac{v^2}{2 * g} \right) * \cos^2 \theta}$$

Y : le tirant d'eau au pied du barrage.

V : vitesse au pied du barrage.

K : coefficient qui tient de compte des pertes du jet dans l'air il est égale à 0,9.

θ : l'angle de sortie du jet.

X, Y : coordonnées de la trajectoire du jet par rapport au système d'axes de la figure II.7.

Chapitre III :

La lutte contre l'envasement en Algérie

1. La problématique

Dans de nombreux pays du monde, le transport des sédiments dans le réseau hydrographique des bassins versants et leur dépôt dans les retenues pose aux exploitants des barrages des problèmes dont la résolution ne peut qu'être onéreuse. Non seulement la capacité utile est progressivement réduite au fur et à mesure que les sédiments se déposent dans la retenue mais encore l'enlèvement de la vase est une opération délicate et difficile, qui bien souvent exige que la retenue soit hors service, ce qui est pratiquement impossible dans les pays arides et semi-arides. Dans l'un et l'autre cas, il en résulte des dommages considérables à l'environnement et une mise en péril de l'économie du projet.

2. Le phénomène de L'envasement :

Le phénomène de l'envasement des barrages est l'une des conséquences de l'érosion des bassins versants. Une quantité considérable des sédiments est piégée chaque année dans les réservoirs qui réduit leur capacité et menace même la sécurité de ces ouvrages.

3. Problèmes posés par l'envasement :

Parmi les problèmes que pose l'envasement des retenues de barrages, on peut retenir quatre inconvénients majeurs qui sont :

1. La réduction de la capacité ;
2. L'obturation des organes de vidange ;
3. La remise en cause de la sécurité de l'ouvrage ;
4. L'envasement des canaux d'irrigation ;
5. La dégradation de la qualité de l'eau ;

3.1 Réduction de la capacité de la retenue :

Cette réduction de la capacité de stockage de l'eau est sans aucun doute la conséquence la plus dramatique de l'envasement: chaque année le fond vaseux évolue et se consolide avec occupation d'un volume considérable de la retenue.

La quantité de sédiments déposés dans les barrages Algériens était évaluée à $560 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 1995 soit un taux de comblement de 12,5 %; elle sera de $650 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en l'an 2000, soit un taux de comblement de 14,5 %. A titre d'exemple, la capacité initiale du barrage de GHRIB (Médéa) était de $280 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 1939 et n'était plus que de $109 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 1977.

Une projection a été faite pour l'an 2010, d'où il ressort que certains barrages comme par exemple ceux du FERGOUG et des ZARDEZAS finiront par périr si des dispositions radicales ne sont pas prises.

3.2 Obturation des organes de vidange :

Un autre danger présenté par l'envasement est celui du non fonctionnement des organes de vidange de fond, Le cas du barrage de OUED EL FODDA (Chlerī) peut servir d'exemple: en effet, la vanne de fond a été bloquée depuis 1948 et elle se trouve maintenant sous plus de 40 mètres de vase; toute opération de vidange de la retenue est de ce fait impossible.

Un autre cas à signaler pourrait être celui du barrage de FOUM EL GHERZA (Biskra) où la vanne de fond a été bloquée de 1982 à 1989.

3.3 Sécurité de l'ouvrage :

Indépendamment du problème de la diminution de la capacité du réservoir, l'envasement pose celui de la stabilité de l'ouvrage: on sait que pour une variation linéaire de la hauteur de la vase, la poussée progresse au carré de la hauteur. La densité de la vase peut atteindre 1,6. A titre d'exemple, pour le barrage des ZARDEZAS, les services concernés ont diminué le volume de l'eau claire de $9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 1990 uniquement pour assurer la sécurité de l'ouvrage: bien évidemment, cela s'est fait au détriment de l'approvisionnement de la population de la ville de Skikda et du périmètre du Saf-saf. Le volume régularisé qui était de $20 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ s'est trouvé réduit à environ $10 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

3.4 Envasement des canaux d'irrigation :

Le dépôt des sédiments dans une retenue de barrage destinée à l'irrigation, pose le problème de comblement du réseau (des canaux) d'irrigation se trouvant à l'aval du barrage. En effet dans les pays arides et semi-arides, l'irrigation se fait généralement par de l'eau chargée en sédiments, c'est ainsi que ces particules fines vont se déposer dans les canaux réduisant leurs sections mouillées et bien sûr le débit d'eau véhiculée. Le curage et le nettoyage des canaux deviennent des opérations quotidiennes. BOUVARD M. (1983) a indiqué que l'irrigation avec de l'eau chargée aux Etats Unis, en Tunisie et au Niger a provoqué le plus souvent une détérioration rapide du réseau d'irrigation.

3.5 Dégradation de la qualité de l'eau :

Les sédiments véhiculent des produits chimiques (nitrates, sulfates...) provenant en particulier des apports en éléments fertilisants pour les cultures, et se déposant dans les

réservoirs, entraînant ainsi une dégradation de la qualité de l'eau et favorisant l'eutrophisation de ces réservoirs.

4. Moyens de lutte contre l'envasement :

Les techniques utilisées en Algérie sont :

Réalisation de barrage de décantation :

Il existe un cas en Algérie, c'est le cas du barrage de Boughezoul qui est exploité partiellement comme bassin de décantation du barrage de Ghrib. Ce barrage a permis de retenir depuis sa création environ $35 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de vase. Il réduit l'envasement de Ghrib de près de 24 %.

Soutirage des courants de densité

Le soutirage des courants de densité a donné des résultats spectaculaires en Algérie. Cette méthode est utilisée aux barrages d'Ighil Emda et Oued El Fodda.

- Barrage d'Ighil Emda

Le barrage d'Ighil Emda est de capacité $156 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ à la cote 532 m au-dessus du niveau de la mer. Il a été mis en eau en 1953.

Notons que près de 50 % de vases ont été soutirés grâce au système de soutirage à savoir sur $88.773.564 \text{ m}^3$ d'apports solides jusqu'à l'année 84. Seulement $45.657.458 \text{ m}^3$ ont réussi à se décanter et se consolider alors que $43.116.106 \text{ m}^3$ ont été soutirés.

- Barrage de Oued El Fodda

Il a été mis en service en 1932 avec une capacité initiale de 28 M de m^3 . Devant la progression de l'envasement de la retenue et ce qui a entraîné le blocage de la vanne de fond, le barrage a été percé de 04 vannettes de dévasement (opérationnelles en 1961). Ce système a permis d'évacuer de 1961 jusqu'à 1993 environ 12 M de m^3 de vase.

- Barrage de Foum El Gherza

Grâce à la vanne de fond $600 \cdot 000 \text{ m}^3$ de vase ont été évacuées de 1989 jusqu'à 1993. Notons que de 1982 jusqu'à 1989, la vanne a été bloquée par la vase.

Dragage des barrages

A travers l'expérience algérienne, le dragage s'est avéré une solution sûre mise à part les difficultés de mise en dépôt et le coût. Jusqu'à maintenant, l'Algérie a procédé à un dragage sur quatre barrages:

Le barrage des Cheurfas ($10 \cdot 10^6 \text{ m}^3$), le barrage de Sig ($2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$), barrage de Fergoug et Hamiz.

L'Algérie a acquit en 1989 un matériel complexe de dragage à savoir une drague suceuse refouleuse baptisée « Rezoug Youcef ».

Cette drague, d'un poids total de 300 t est conçue pour refouler à une hauteur de 28 m dans une conduite de 700 mm avec un débit maximum de mixture (vase + eau) de 1600 l/s et pour draguer à une profondeur de 3 à 16 m.

Chasse des sédiments :

On peut réduire l'envasement par l'évacuation des sédiments par les pertuis de vidang. Il existe deux méthodes :

– la vidange annuelle du barrage (dite chasse espagnole) ;

– l'ouverture périodique des vannes de fond ;

La première technique consiste à vider le barrage en début d'automne, laisser les vannes ouvertes et attendre que les premières crues enlèvent les vases non encore consolidées. Cette méthode n'est pas adaptée aux régions semi-arides où l'on souhaite réaliser une gestion interannuelle des ressources en eau.

La deuxième technique est l'ouverture périodique des vannes de fond. Elle est indispensable pour enlever les dépôts vaseux près des pertuis de vidange, mais peu efficace au-delà. Les premières tentatives d'évacuation des sédiments par la vanne de fond ont été effectuées au barrage d'Oued El Fodda en 1937 et en 1939, malheureusement sans grand succès puisqu'en 1948 les vannes de fond étaient complètement obturées. Cette méthode n'est actuellement pratiquée que dans le barrage de Beni Amrane. Ses six vannes de fond ont évacué environ 3 Mm^3 de vase entre 1988 et 2000, soit environ 26 % des sédiments entrants.

❖ Malgré les bons résultats qui ont donné ces techniques ils restent non économiques avec toutes leurs difficultés, le coût et la perte d'eau, Le dévasement s'accompagne toujours d'une perte d'eau inévitable. Jusqu'à nos jours, les meilleurs rendements font état de 1 m³ d'eau perdu pour le même volume de boue extraite, plus le temps important de remplissage de l'ouvrage. et avec l'augmentation de la demande en eau la meilleure solution actuellement c'est *la surélévation du barrage*.

5. Surélévation des barrages :

La surélévation d'un barrage permet d'augmenter la capacité de la retenue et donc de compenser la valeur envasée. Dans ce contexte, la surélévation des barrages existants est une solution intéressante, lorsqu'elle est techniquement réalisable c'est-à-dire lorsque la stabilité du barrage n'est pas mise en jeu. Spécialement, si elle n'entraîne pas de contestations sociales.

L'évacuateur de crues doit faire passer la crue de projet sans mettre en danger le barrage et sans provoquer des conditions à l'aval qui serait plus dangereuses que celles existant avant la construction du barrage.

Il existe deux méthodes pour surélever un barrage soit : *en surélevant le corps du barrage ainsi que tous les ouvrages annexes*, ou bien *par des brochures mobiles*.

➤ La première technique a été réalisée sur cinq barrages : Fergoug, Mefrouch, Bakhada, K'sob, Zardézas. La surélévation des barrages permet d'augmenter la capacité de la retenue et donc de compenser la valeur envasée.

- Barrage du Hamiz (wilaya de Boumerdes)

Barrage construit en 1879 en vue de l'irrigation du périmètre de Mitidja est. L'envasement accéléré de la retenue a permis à l'administration en 1883 de surélever de 7 m pour porter sa capacité à $23 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

- Barrage des Zardézas

Il a été mis en eau en 1945, sa hauteur de 37 m lui permet d'assurer un volume de $15 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Du fait de l'envasement accéléré, la capacité du barrage est passé de $7,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 1974. En 1977, la hauteur du barrage a été portée à 47 m (12, 7 m de plus). Le volume ainsi obtenu est de $31 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

- Barrage de K'sob

Barrage de capacité de $11,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ pour une hauteur de 32 m, construit en 1939 pour l'irrigation du périmètre de K'sob. Du fait de la progression de l'envasement de la retenue, la capacité a été réduite à moins de $4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. En 1975, la hauteur du barrage a été porté à 43 m (15 m de plus) pour porter sa capacité à $31 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

➤ La deuxième technique consiste à utiliser un seuil libre qui permet de valoriser la tranche du plan d'eau comprise entre le niveau normal de retenue et le niveau des plus hautes eaux :

- Soit pour accroître la ressource en eau, sans diminuer la sécurité vis-à-vis des crues ;
- Soit pour accroître la sécurité vis-à-vis des crues à niveau de retenue identique ;

Trois dispositifs envisageables :

- L'installation d'organes mobiles tels que clapets, vannes segments ou vannes secteurs ;
- La mise en place d'un boudin gonflable s'abaissant automatiquement en cas d'augmentation de la charge amont ;

- La pose de hausses métalliques ou en béton, fusibles lors des grosses crues ;

6. Les vannes :

6.1 Les différents types de vanne :

6.1.1 Vannes levantes verticales :

Il s'agit généralement de vannes wagon (sauf pour les petits barrages, parfois équipés de vannes à glissières).

Pour les évacuateurs de surface des grands barrages, ces vannes nécessitent une superstructure assez importante, et généralement un portique de manoeuvre et de manutention pour l'entretien.

Ces vannes sont capables de couper le plein débit. Elles sont équipées d'une barre d'étanchéité sur le bord inférieur et d'étanchéités en "note de musique" sur les bords latéraux.

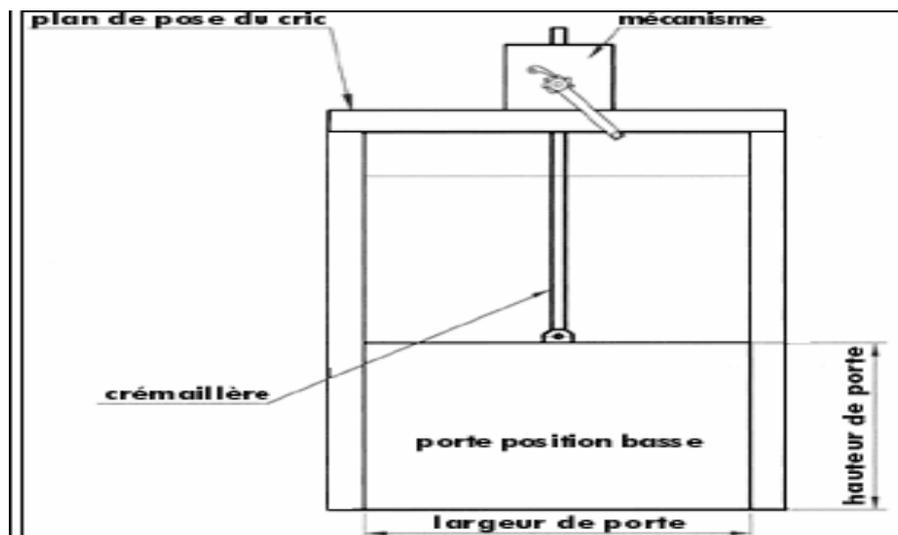


Figure III.1 : schéma d'une vanne levante vertical

6.1.2 Vannes segment et secteur :

La vanne segment et secteur est le type le plus répandu. En effet, son coût de fabrication est moindre. Elle est caractérisée par la forme de sa tôle bordée en secteur de cylindre. Cette particularité a pour conséquence de transmettre tous les efforts de poussée hydraulique radialement et donc de faire passer les résultantes de forces par l'axe de rotation de l'ensemble.

En clair, l'effort de manoeuvre de cette vanne ne dépend que très peu de la pression hydraulique que l'on applique à sa surface.

De plus, les conditions d'écoulement sont améliorées par rapport à la vanne wagon, compte tenu de l'absence de rainures. Elle est équipée d'une barre d'étanchéité rigide sur le bord inférieur et d'étanchéités glissantes en "note de musique" sur les bords verticaux.

Il est généralement déconseillé de laisser déverser par-dessus une grande vanne segment. En effet, pour un débit important, on risque de voir apparaître de fortes vibrations, mettant en danger la tenue mécanique de la vanne. S'il y a un risque d'accumulation de corps solides à l'amont de la vanne, on peut prévoir un volet mobile au sommet de la vanne segment pour évacuer ces matériaux.

6.1.3 Vannes clapet :

Les vannes clapet équipant les évacuateurs de surface assurent le réglage fin du niveau de la retenue lorsque la hauteur de la nappe déversante est relativement faible. La vanne clapet est excellente lorsqu'il y a risque d'accumulation d'une grande quantité de corps solides coté amont, car ces matériaux passent facilement par dessus de la vanne.

L'organe de manœuvre peut être du type cric, treuil ou vérin hydraulique....

Celui-ci est manuel ou motorisé, à commande manuelle, semi-automatique ou automatique.

6.2 Avantages et inconvénients :

L'installation de clapets ou vannes métalliques est tout à fait classique. Elle permet un réglage fin et à volonté du niveau de la retenue et représente la solution à retenir lorsque l'on souhaite optimiser la gestion d'un barrage à buts multiples (écrêtement de crues, production d'électricité, fourniture d'eau). Cependant outre son coût, elle exige alimentation en énergie pour les manœuvres ainsi qu'une surveillance et un entretien très réguliers.

Malgré l'installation de dispositifs de secours, une panne ne peut être exclue et la sécurité en crue ne peut donc être qualifiée de parfaite. Tout ceci conduit bien souvent à exclure des organes métalliques mobiles pour des barrages de moyenne dimension, non gardés et dépourvus d'alimentation d'électrique.

Cette technique a été utilisée sur des barrages en Algérie tels que :



Figure III.2 : barrage de Bouhanifia



Figure III.3 : barrage de K'sob



Figure III.4 : barrage de Zardezas

6.3 Le débit de déversement avec des vannes :

La vanne et le déversoir forment un grand orifice. Le débit passant par cet orifice est égale à :

$$Q = m.L.d.\sqrt{2.g.H_0}$$

m : coefficient de débit ;

L : largeur de l'ouverture de la vanne ;

d : l'ouverture de la vanne ;

H_0 : la charge total sur la crête du déversoir ;

Le calcul de débit se ramène au calcul du coefficient de débit. La figure une moyenne des valeurs de m , relevés en fonction de l'ouverture de la vanne pour différentes vitesses d'approche.

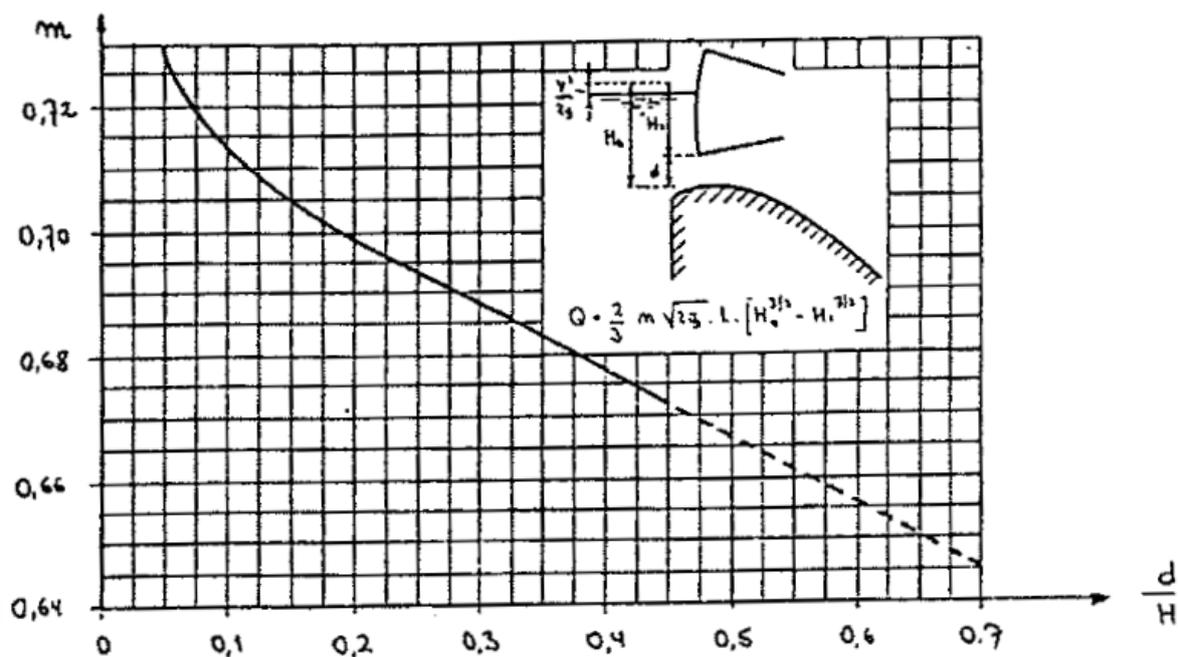


Figure III.5 : Résultat d'essai pour une vanne segment

6.4 Choix du nombre de vannes :

Concernant le nombre de vannes devant équiper le seuil du déversoir, il n'existe pas de normes hydrauliques permettant son calcul. Cependant il existe des normes industrielles qui associent à des considérations pratiques, permettent de déterminer la variante technico-économique.

7. Les boudins gonflables (seuils souples) :

Les seuils souples permettent de créer des petits plans d'eau en rivières ou de surélever des déversoirs des barrages. Les seuils souples gonflables s'abaissent automatiquement en crue et à priori extrêmement séduisant.

7.1 Evolution de la technique :

Le principe de base consiste à s'opposer à la poussée de l'eau par une membrane souple fixée sur un radier en béton et gonflée soit à l'eau, soit à l'air. La membrane épouse la forme funiculaire des pressions et résiste à la poussée de l'eau sans fléchir grâce à une contrepression maintenue à l'intérieur. Lorsque le plan d'eau tend à s'élever, l'accroissement de la poussée de l'eau dégonfle partiellement ou totalement la membrane.

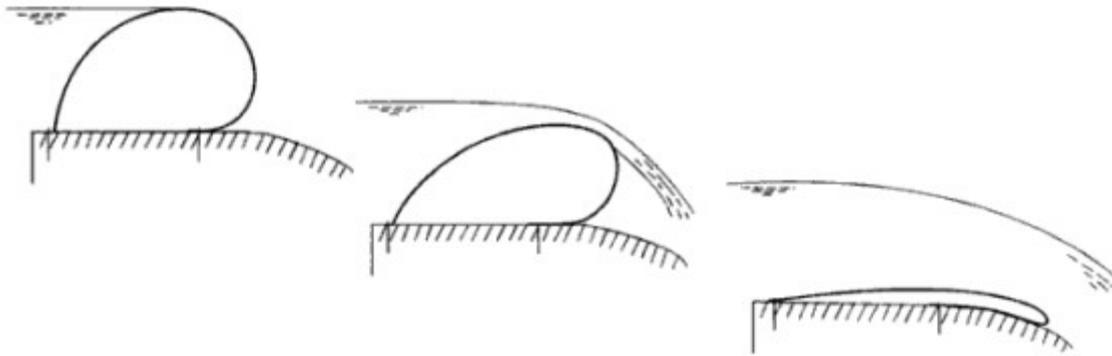


Figure III.5 : Principe de fonctionnement des seuils souples

Inventé et breveté en 1947 par le professeur français **Mesnager**, le procédé a été employé pour la première fois sur la rivière **Los Angeles (U.S.A)** par Imberston.

La hauteur de tels seuils est généralement de 1,5 à 3m, et l'épaisseur de l'enveloppe de caoutchouc est de 4 à 8mm selon les procédés et l'ouvrage. La longueur des plus grands ouvrages est de 100m en une seule portée. La hauteur maximale est de 5m.

7.2 Description d'un seuil gonflé à l'eau :

La membrane est constituée d'un matériau élastomère renforcé par une armature à la fois souple et résistante. Elle est repliée en forme de boudin et fixée à un radier horizontal en béton et aux deux bajoyers. L'enveloppe ainsi formée est reliée à un puits placé sur l'une des rives. Le puits est alimenté en eau de manière à créer une charge **Q** à l'intérieur de la membrane supérieure de 30% à 50% à la charge **P** correspondant au plan d'eau normal rehaussé.

Lorsque le niveau de l'eau tend à augmenter à l'amont à cause de l'accroissement de la poussée P :

- pour des charges $P < Q$: on a un déversement sur le seuil sans que celui-ci se dégonfle.
- pour des charges $P > Q$: le seuil se dégonfle progressivement sous l'effet de la poussée P en expulsant l'eau du puits par surverse.

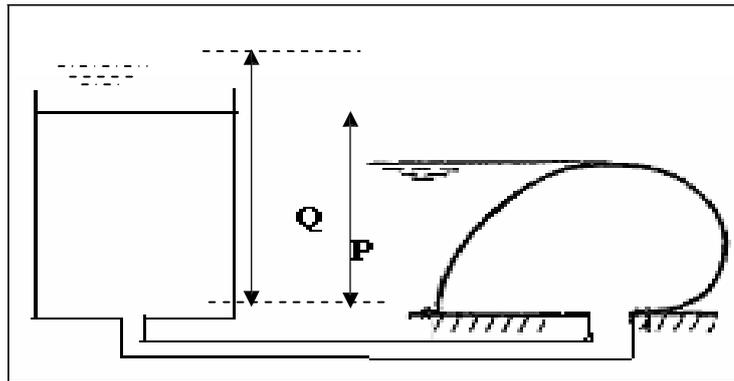


Figure III.6 : Principe du seuil gonflé à l'eau

7.3 Avantages et inconvénients :

Les seuils souples, gonflables sont une solution intéressante et fiable pour créer de petits plans d'eau en rivières. Pour la surélévation des barrages, les seuils souples constituent une solution particulièrement appropriée, puisque tout incident de fonctionnement va dans le sens de la sécurité. Une interruption de l'alimentation électrique est en particulier sans conséquence.

Sur les barrages existants, un tel procédé est envisageable, soit pour accroître la ressource en eau, sans diminuer la sécurité vis-à-vis des crues, soit pour accroître la sécurité vis-à-vis des crues à niveau de retenue identique.

Mais malgré plusieurs décennies d'expérimentation, ce système n'a pas apporté de solution totalement satisfaisante du fait que la membrane se dégrade très rapidement en perdant ses propriétés élastiques, nécessitant ainsi un remplacement fréquent. Cette membrane est sujette à de fréquentes alternances d'immersion et d'exposition aux ultraviolets en fonction des fluctuations du niveau d'eau dans le réservoir. Et aussi elle peut être endommagée par vandalisme.

8. Les hausses fusibles :

Les hausses fusibles constituent une solution de rechange, techniquement et financièrement intéressante, aux systèmes mécaniques conventionnels (vannes, clapets, boudins gonflables) ou aux systèmes plus rustiques (digues fusibles, barrages à aiguilles). Les hausses fusibles sont des modules indépendants, juxtaposés sur le seuil du déversoir d'un barrage.

Les modules sont reliés par des joints d'étanchéité pour constituer un écran étanche augmentant ainsi la capacité du barrage. Le dimensionnement et la géométrie des hausses, spécifiques à chaque projet, leur permet de résister la pression de l'eau en situation normale ainsi qu'aux charges exceptionnelles (vagues, corps flottants, poussées de glace, séismes, etc.).

Grâce à un système de puits réglés à différents niveaux, les hausses fusibles s'effacent progressivement pour des crues très exceptionnelles.

Ce système a été inventé en 1989 par [Lemperiere](#) afin d'augmenter le volume utile de la retenue, la capacité de l'évacuateur ou les deux en même temps. La société [HYDROPLUS](#) a été créée en 1991 par le groupe [VINCI](#) pour développer et exploiter le procédé des hausses fusible.

Le barrage de [Lussas \(France\)](#) est le premier ouvrage rehaussé par cette technique.

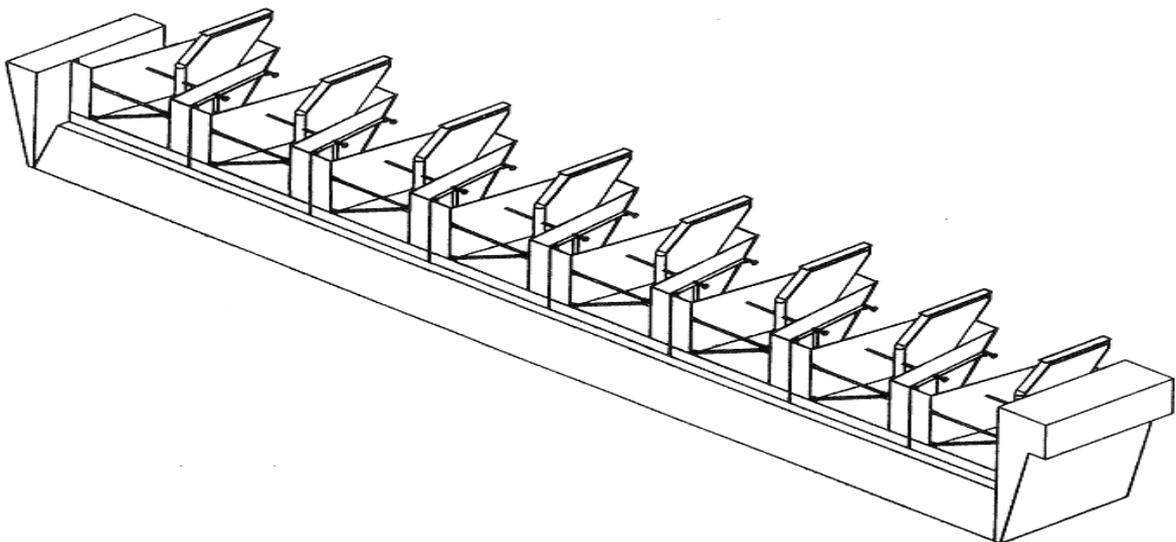


Figure III.7 : Seuil rehaussé par des hausses fusibles

8.1 Présentation des hausses fusibles :

Chaque hausse est constituée de trois parties : La partie hausse, la chambre de mise en pression au contact du seuil, l'entonnoir ou puits d'alimentation et le lest.

Chacune de ces parties peut avoir une configuration différente en fonction de sa destination.

□ Le puits

Le puits d'alimentation est généralement solidaire de la hausse et construit en acier mais dans le cas de fortes crues, son fut est alors construit en béton afin d'éviter les vibrations. Sa partie supérieure est évasée, l'embouchure est protégée par des barreaux et surmontée d'un chapeau. Et sa partie inférieure est en communication avec la chambre de mise en pression. La position du puits par rapport à la hausse et le profil de son embouchure sont adaptés à la forme de la ligne d'eau.

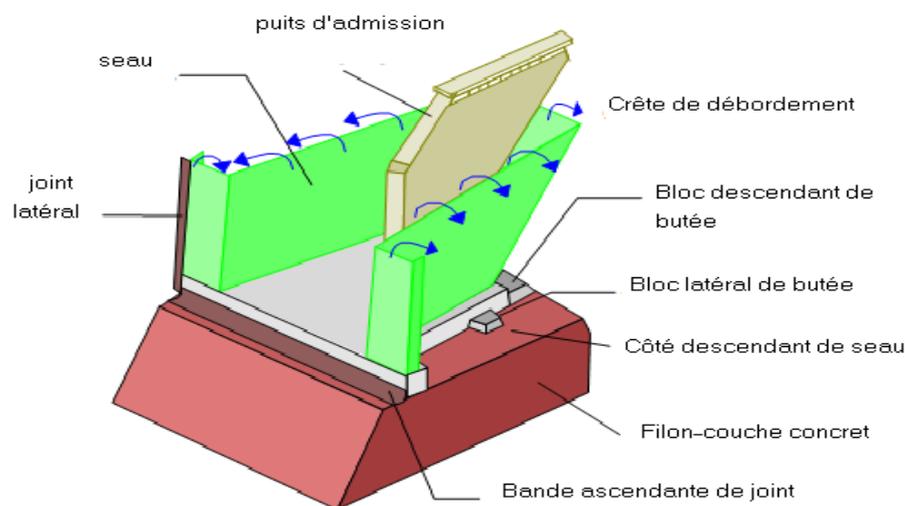


Figure III.8 : Vue 3D typique d'une hausse fusible

□ La chambre de mise en pression :

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

Exceptionnellement, la forme de la chambre peut être adaptée à la forme du seuil

Greager afin d'éviter les problèmes de dérasement.

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

□ Le lest

Par conception, l'équilibre général des hausses est assuré d'une part, par la forme de celle-ci et d'autre part, par la nature des matériaux qui la constituent.

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

8.2 Principe de fonctionnement :

Selon le niveau d'eau dans le réservoir, les éléments de rehausse fonctionnent comme un barrage, un déversoir ou un fusible. Ce système fonctionne uniquement sous l'action de l'eau, n'utilisant ni énergie ni dispositif mécanique.

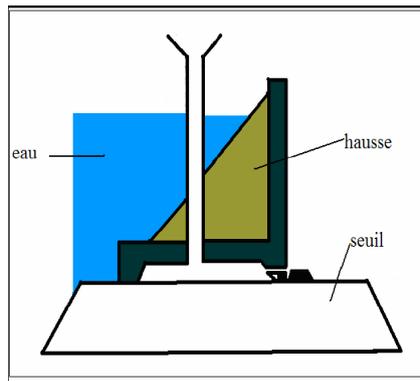
Lorsque le niveau d'eau est inférieur ou égal au niveau d'arase des hausses, celles-ci fonctionnent comme un barrage et chaque élément est auto-stable.

Pour les crues modérées, le niveau d'eau s'élève au-dessus de la cote d'arase des hausses, celles-ci fonctionnant comme un déversoir à seuil libre.

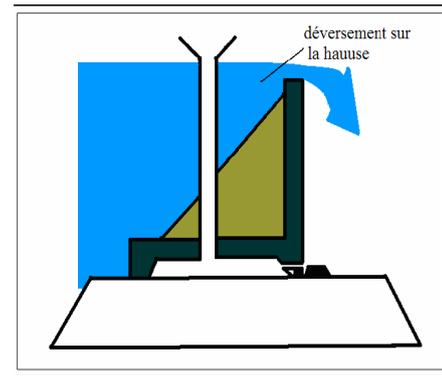
Par contre, lors des crues exceptionnelles, l'augmentation du niveau d'eau dans la retenue atteint un niveau à partir duquel l'eau pénètre dans le puits pour s'accumuler dans la chambre, créant ainsi une forte pression qui déstabilise la hausse et la fait basculer. Le terme « fusible » ne doit pas induire en erreur : les hausses commencent à basculer seulement dans le cas de crues à très faible probabilité d'occurrence.

Les hausses fusibles sont des éléments indépendants entre eux, le basculement d'une hausse n'induit pas forcément le basculement d'une autre hausse. Les niveaux de basculement des hausses sont réglés à différentes hauteurs, de manière à ce que l'effacement des hausses soit progressif ; à mesure que les hausses basculent, la brèche par laquelle l'eau peut s'échapper s'accroît, soulageant le barrage d'un déversement excessif qui pourrait l'endommager. De plus, le basculement progressif permet d'atténuer l'effet des crues très exceptionnelles.

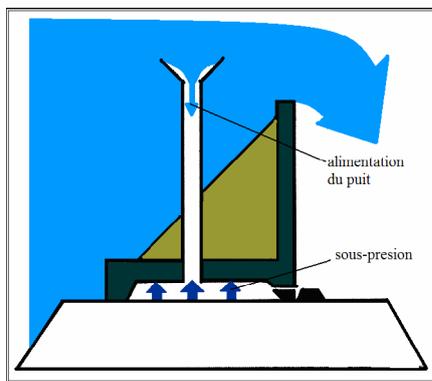
La fréquence de basculement peut être ajustée en fonction d'un optimum économique reliant les gains de stockage au déficit d'exploitation en cas de basculement d'une ou de plusieurs hausses.



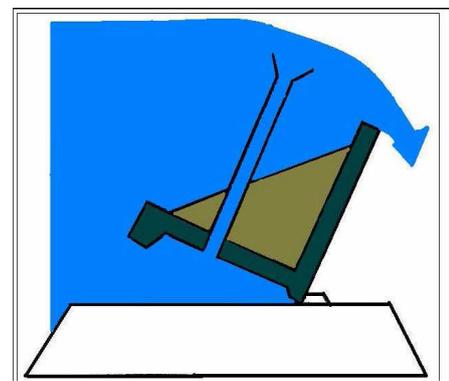
La hausse fonctionne comme
Un barrage



La hausse fonctionne
comme un déversoir



Alimentation de la chambre
Et la mise en pression



L'eau bascule La hausse.

Figure III.10 : Le principe de fonctionnement d'une hausse fusible

8.3 Les types des hausses fusibles :

HYDROPLUS a développé divers modèles de hausses fusibles pour répondre aux exigences spécifiques de chaque projet. Les hausses varient en hauteur, en forme, en poids ainsi qu'en matériaux de fabrication.

8.3.1 Les hausses fusibles labyrinthes : sont utilisées dans des conditions où la lame déversante de la crue sur la hausse varie entre 30 % et 140 % de la hauteur de la hausse. Les performances hydrauliques de la crête en labyrinthe de ces hausses permettent d'augmenter les capacités de déversement du seuil ainsi équipé.

Le poids moyen de ces hausses est de :

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



Figure III.11 : hausse fusible labyrinthe

8.3.2 Les hausses à crête rectiligne : appelées aussi *hausses droites*, sont déclinées en deux modèles de base :

- hausses droites à fortes lames utilisées pour des lames déversantes atteignant jusqu'à quatre fois leur hauteur. Ces hausses massives sont généralement en béton et disposent d'une crête déversante profilée qui optimise l'écoulement des eaux.

- hausses droites à faibles lames utilisées pour de faibles lames. On utilise habituellement ces hausses comme complément à un système vanné. Elles renforcent la capacité d'évacuation en cas de très fortes crues et elles peuvent pallier une éventuelle défaillance du système vanné. De par leur rôle de soutien aux dispositifs mécaniques, on les appelle hausses de sécurité.



Figure III.12 : hausse droite

Le poids moyen de ces hausses est de :

- 40 t pour 5 m de hauteur.
- 100 t pour 8 m de hauteur.
- 150 t pour plus de 12 m de hauteur.

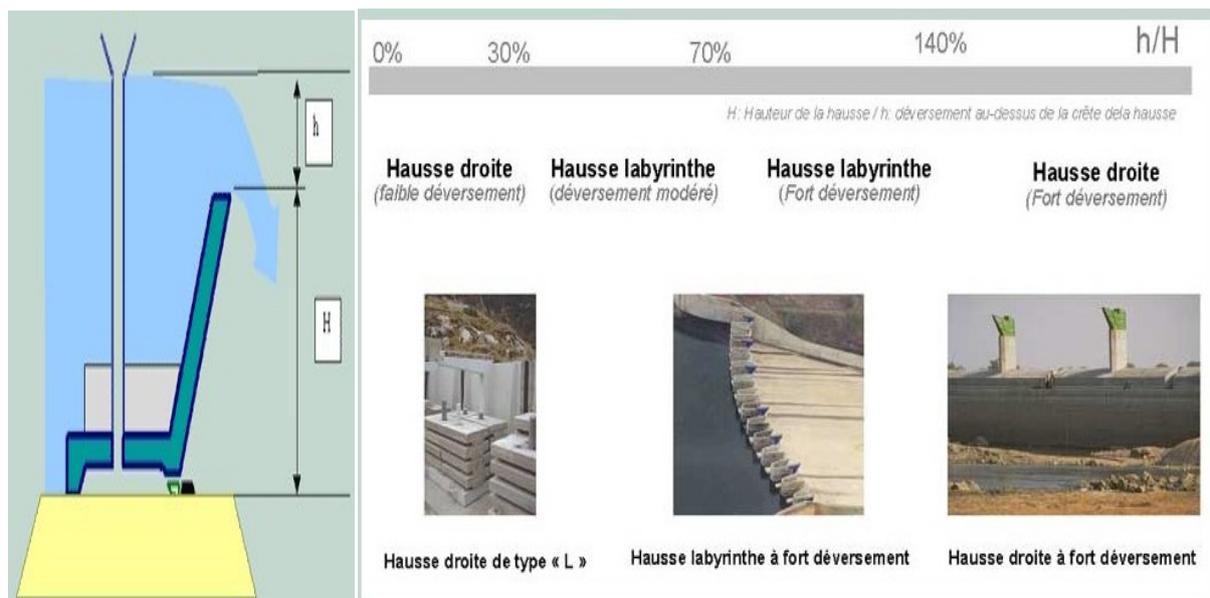


Figure III.13 : types de hausses utilisées en fonction de h/H

8.3.3 Les hausses rabattables :

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



Figure III.14 : hausse rabattable

8.4 Avantages des hausses fusibles :

Les hausses fusibles s'installent à la construction d'un nouveau barrage ou sur un barrage existant. Elles s'adaptent à tous types de barrages et permettent d'en optimiser l'exploitation. Elles peuvent être employées seules ou en complément de vannes. L'association de hausses fusibles avec des vannes classiques présente un double intérêt : les vannes permettent de contrôler avec précision le niveau de la retenue, et les hausses permettent d'augmenter la sécurité du barrage tant lors de crues exceptionnelles qu'en cas de défaillance des vannes.

❖ Les hausses fusibles d'HYDROPLUS améliorent :

- La capacité de stockage des barrages.
- La capacité de déversement des évacuateurs.
- Les performances des barrages atténuateurs de crue.

L'augmentation de la capacité de stockage :

L'augmentation de la capacité de stockage est un enjeu important pour de nombreux propriétaires de barrages, et les hausses fusibles remplissent à cet égard un rôle extrêmement efficace.

Des hausses fusibles ont été installées sur une quarantaine d'ouvrages des cinq continents. En moyenne, elles ont accru la capacité de stockage de 30 %, ce pourcentage a dépassé 140 % dans certains cas.

L'amélioration de la capacité de déversement :

La capacité de déversement d'une retenue face aux conditions normales d'exploitation et face aux crues exceptionnelles constitue un paramètre important de sécurité pour l'ouvrage et pour le bassin aval. Les crues de dimensionnement de barrages sont parfois réévaluées après construction du barrage.

Les hausses fusibles offrent alors une solution économique, fiable et particulièrement adaptée pour la mise à niveau de la capacité de déversement des seuils suite à une modification des crues dimensionnantes.

L'atténuation des crues

La maîtrise des crues de nombreux fleuves doit beaucoup aux barrages écrêteurs de crues. Ces ouvrages retiennent temporairement une partie significative du volume de la crue de façon à limiter l'amplitude de la crue à l'aval.

Installées sur un barrage de manière à rehausser la crête du seuil sans modification du niveau normal dans le réservoir, les hausses fusibles augmentent le volume réservé à l'absorption des crues et améliorent par conséquent le pouvoir écrêteur de l'ouvrage.

Cette application permet à nombre d'exploitants de barrages d'améliorer le niveau de protection contre les crues des populations vivant à l'aval de l'ouvrage de manière économique et sans modification des conditions d'exploitation de la retenue.

❖ Les hausses fusibles s'installent en remplacement ou en complément des systèmes mécaniques conventionnels (vannes, clapets, boudins) ou d'autres structures plus rustiques telles que les digues fusibles ou les barrages à aiguilles. Elles présentent de multiples avantages.

8.4.1 Fiabilité :

Le fonctionnement des hausses fusibles est indépendant de toute intervention humaine et de tout dispositif mécanique.

Le système est ainsi conçu pour ne jamais mettre en péril, quelles que soient les circonstances, l'ouvrage ou les biens et personnes situées en aval. Il offre par ailleurs une fiabilité et une précision bien supérieure à celles des systèmes non mécaniques traditionnels tels que les digues fusibles ou les barrages à aiguilles. La stabilité des hausses et leurs conditions de basculement dans toutes les situations défavorables (chocs, séismes, impact d'objets lourds, poussées de glaces, manque d'entretien, vandalisme, détérioration d'un joint, obstruction accidentelle des purges ou du puits).

8.4.2 Économie :

L'investissement associé à l'application des hausses fusibles est faible comparativement aux systèmes conventionnels (vannes, boudins gonflables ou systèmes similaires). Par ailleurs, les coûts de maintenance en sont 5 à 10 fois moins élevés

8.4.3 Adaptabilité :

Le système s'adapte à pratiquement tous les environnements, types de barrages et conditions. Sa polyvalence tient à la simplicité du procédé, mais aussi aux nombreux modèles de hausses qui répondent à toutes les exigences des maîtres d'ouvrage (sécurité, capacité de stockage, périodes de retour de basculement ajustées aux crues de projet, etc.).

8.4.4 Complémentarité avec d'autres systèmes

Pour les barrages équipés d'un système de vannes, de clapets ou de boudins gonflables, l'adjonction de hausses fusibles représente un avantage considérable. Totalement indépendantes, elles ajoutent un degré de sécurité non négligeable en palliant à une éventuelle défaillance des organes électromécaniques sur lesquels reposent les systèmes traditionnels. Elles permettent aussi un meilleur contrôle du niveau de la retenue en cas de situation d'urgence.

8.4.5 Respect de l'environnement :

Le procédé fonctionnant sur la seule base de la force de l'eau, il n'y a aucun rejet de polluant. Par ailleurs, l'expérience d'HYDROPLUS montre que l'optimisation de barrages existants permet d'éviter la construction de nouvelles retenues ; on évite ainsi en moyenne la construction d'un barrage pour l'optimisation de trois ouvrages. Les hausses fusibles se positionnent donc comme une solution écologique, un élément chaque jour plus important à l'heure des grands enjeux environnementaux.

8.5 Les hausses fusibles en Algérie :

En Algérie cette technique a été réalisée sur trois barrages : *Béni-Amrane*, *Foum el Gueiss* et *Ghrib*.

➤ **Le barrage de Béni-Amrane :**

Fin de chantier : 2003

Objectif : Augmentation de la capacité de stockage

Type de hausse : Droite

Nombre : 7

Hauteur : 3,75 m

Largeur : 14,60 m

Gain de stockage : 7 100 000 m³ (46%)



Figure III.15 : hausse fusible de barrage Benni Amrane

➤ **Barrage de Foum el Gueiss :**

Le barrage de Foum El Gueiss, opéré par l'Agence Nationale des Barrages et Transferts pour l'irrigation de la plaine agricole de Remila s'est totalement envasé depuis sa mise en eau.

L'installation de hausses fusibles a permis d'accroître la capacité de stockage de près de 500 000 m³ tout en augmentant le niveau de l'eau d'un mètre, hauteur nécessaire pour le dévasement de la retenue à l'aide de barge flottante.

Fin de chantier : 2005

Objectif : Augmentation de la capacité de stockage

Type de hausse : Labyrinthe à forte lame déversante

Nombre : 48

Hauteur : 1,10 m

Largeur : 1,98 m

Gain de stockage : 430 000 m³ (139%)



Figure III.16 : Hausses fusibles de Barrage Foum El Gueiss

➤ Barrage du Ghrib

Le barrage du Ghrib, opéré par l'Agence Nationale des Barrages et Transferts permet d'une part d'alimenter la ville d'Alger en eau potable et d'autre part d'irriguer les plaines du Haut et du Bas Chellif. L'installation de hausses fusibles permet d'accroître la capacité de stockage de la retenue de 70 hm³, restaurant ainsi la capacité initiale avant l'envasement du barrage.

Les 20 hausses fusibles de 4,50 m de hauteur sont les plus imposantes construites à ce jour au Maghreb et sont associées à 2 clapets de 4,0 m de hauteur et 15 m de largeur.

Fin de chantier : 2007

Objectif : Augmentation de la capacité de stockage

Type de hausse : Labyrinthe à lame déversante modérée

Nombre : 20

Hauteur : 4,50 m

Largeur : 6,75 m

Gain de stockage : 69 997 410 m³ (44%)



Figure III.17 : hausses fusibles de barrages Ghrib

Chapitre IV:

Techniques de renforcement de la capacité des évacuateurs

1. Introduction :

Lorsque la capacité d'un évacuateur est jugée insuffisante, il convient de renforcer pour des raisons très différentes selon qu'il s'agit d'un barrage en remblai ou d'un barrage poids en béton ou en maçonnerie.

Pour les barrages en terre, le risque est celui d'une érosion du parement aval qui progresse vers l'amont jusqu'à l'éventrement complet du barrage.

Le risque paraît a priori moins fort pour les barrages en enrochements, mais les noyaux en argile risquent le même type d'érosion.

Les barrages poids ne sont pas dégradés en cas de surverse. Mais pour les barrages de faible hauteur (moins de 20 m environ), un accroissement de charge augmente significativement le risque d'instabilité. Ce risque est encore accru pour ceux qui sont épaulés par un remblai aval.

Enfin, il convient de ne pas oublier les cas où la capacité hydraulique d'un évacuateur est suffisante, mais où celui-ci est incapable d'évacuer des corps flottants. Or, c'est justement à l'occasion des très fortes crues que le risque d'arrivée d'arbres déracinés devient très important.

2. Conditions du bon fonctionnement des évacuateurs :

2.1 Imaginer tous les incidents possibles :

L'évaluation de la capacité d'un évacuateur de crues nécessite non seulement une détermination satisfaisante de la crue de projet, mais également la vérification que les ouvrages évacuateurs pourront laisser transiter cette crue dans des conditions réalistes de fonctionnement (ou de non-fonctionnement).

L'expérience montre que des problèmes importants, voire des ruptures, ont été fréquemment occasionnées par des ouvrages au fonctionnement déficient, alors qu'ils étaient théoriquement dimensionnés pour des débits supérieurs à ceux observés.

Exemple : la rupture du barrage de **BELCI (Roumanie)** en juillet 1991.

Terminé en 1962, le barrage de **BELCI** est un barrage en terre à noyau d'argile de 18,5 m de hauteur maximale et de 420 m de longueur en crête à la cote 228,00. Sa capacité est de 12,7 Mm³.

La partie centrale du barrage de 58 m de longueur est en béton et est équipée de quatre vannes de surface, de 11 m de largeur et 2,5 m de hauteur et de deux vannes de fond de même dimension. La capacité totale d'évacuation est de $850 \text{ m}^3 / \text{s}$ pour une retenue à la cote 225.00 (NNE).

L'étude hydrologique de 1950 aboutissait à :

$$Q_{100} = 800 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{1000} = 1100 \text{ m}^3/\text{s}$$

Trois crues supérieures à la centennale sont survenues en 10 ans et ont amené à une réévaluation de l'étude hydrologique conduisant aux résultats suivants :

$$Q_{100} = 1550 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{1000} = 2450 \text{ m}^3/\text{s}$$

Mais cette étude n'a été suivie d'aucuns travaux d'agrandissement de l'évacuateur.

La chronologie de l'incident du 28-29 juillet 1991 fut la suivante :

28 juillet : beau temps sur le barrage, mais pluie diluvienne de 150 mm en 1,5 heure sur le bassin versant supérieur causant la destruction des lignes téléphoniques utilisées dans le système d'annonce des crues ;

28 juillet, 22 h 00 : début de la pluie au barrage ;

28 Juillet, 23 h 40 : le gardien commence à ouvrir les vannes ;

28 juillet, 23 h 50 : panne de secteur (1 vanne ouverte à 40 cm) ;

28 juillet, 24 h 00 : démarrage du groupe électrogène impossible (batteries démontées quelques jours plus tôt pour secourir un camion !...);

29 juillet, 0 h 30 : retenue à la cote 225,00 ;

29 juillet, 1 h 30 : l'ouverture complète à la main de la vanne partiellement ouverte s'avère impossible, car elle est bloquée par un arbre ;

29 juillet, 2 h 15 : retenue à la cote 228,00, début de surverse ;

29 juillet, 2 h 30 : surverse de 50 cm de hauteur ;

29 juillet, 6 h 00 : début de la baisse du niveau de l'eau (liée à l'ouverture de brèches);

29 juillet, 7 h 15 : réservoir vide.

Deux brèches se sont ouvertes dans le remblai, l'une près de l'évacuateur, de 112 m de largeur et 15 m de profondeur, l'autre en extrémité rive gauche, de 40 m de largeur et 10 m de profondeur.

Cette rupture a causé la mort de 25 personnes en aval du barrage qui s'ajoutent aux 40 morts causées par les inondations en amont.

Il est à noter que l'ouverture complète des vannes par les moyens électriques demandait 6 heures et qu'évidemment l'ouverture manuelle par un seul gardien n'était pas à l'échelle du temps de montée de la crue.

La chronologie des faits montre bien la conjonction d'incidents ayant par leur enchaînement entraîné la rupture du barrage. Mais cela montre aussi la réalité du scénario catastrophe.

2.2 Fonctionnement hydraulique :

Tout ce qui peut perturber les conditions d'écoulement doit être examiné avec soin. En effet, ces perturbations modifient les hypothèses des calculs hydrauliques que nous traitons plus loin. L'attention doit porter en particulier sur les points suivants :

- entonnement à l'amont d'un seuil mal conçu ou modifié par rapport aux dispositions initiales ;
- ennoisement d'un seuil par l'aval au-delà d'un certain débit ;
- irrégularités dans un coursier pouvant conduire à une surélévation locale de la ligne d'eau (risque aggravant si le coursier longe le talus aval d'un barrage en remblai).

Par ailleurs, il est impératif de disposer d'une marge de sécurité vis-à-vis de l'évacuation des corps flottants, surtout dans le cas d'évacuateurs en puits ou pertuis. Pour un évacuateur à surface libre surmonté d'une passerelle ou d'un pont, il faut veiller à conserver une garde d'air suffisante lors de la crue de projet.

Lorsque le bassin versant est boisé, des arbres peuvent être arrachés aux berges lors des fortes crues. Cette éventualité devient une certitude lors des crues exceptionnelles. Mais l'expérience montre que bien d'autres corps flottants sont susceptibles d'arriver devant l'évacuateur.

Si la taille de l'évacuateur est inférieure, il faut alors envisager un dispositif de protection piégeant les corps flottants assez loin de l'entonnement de l'évacuateur pour ne pas entraîner une perturbation des conditions de l'écoulement et un relèvement du plan d'eau (grilles à large espacement, drome).

2.3 Fonctionnement des parties mobiles :

Si certains ouvrages ne demandent pas d'intervention et ne présentent pas de risque de blocage (seuils libres) tous les ouvrages mobiles (vannes) méritent une attention régulière.

On devra s'intéresser au rythme de fonctionnement de ces organes : plus une vanne fonctionne rarement, plus élevés sont les risques de dysfonctionnement en période critique. La seule prévention à ce sujet est la réalisation d'essais périodiques, à vide et en charge (ouverture partielle dans ce dernier cas) : une manœuvre au moins annuelle est indispensable.

La première des sécurités à rechercher est la garantie d'accès ou de possibilité de manœuvre : si les vannes sont inaccessibles en crue ou lors de forts orages autant ne pas avoir de vanne du tout.

Le résultat est le même avec des vannes que l'on ne peut manœuvrer faute d'énergie : on devra s'assurer de la disponibilité d'au moins deux moyens de manœuvre commodes et fiables (réseau ou groupe électrogène au minimum ou treuil manuel). On doit en particulier s'assurer

que le temps d'ouverture des vannes est comparable avec le temps de montée prévisible de la crue.

Le dispositif de commande doit pouvoir fonctionner même en cas de perte des alimentations électriques normales. Il convient d'examiner les dispositifs de transmission aux vannes de ces alimentations de secours. Un essai lors de la visite annuelle s'impose.

Un autre problème est le risque de non fonctionnement : la durée de vie de tout système mécanique est finie. On doit donc envisager une défaillance future... Or, celle-ci a plus de chance de se produire lors d'une crue importante, où les manœuvres sont multipliées. On doit donc estimer, pour les ouvrages d'une certaine importance qu'un dispositif de secours de la vanne permettant son ouverture dans tous les cas devra être installé s'il n'existe pas.

2.4 Observation et analyse des événements passés :

La liste des incidents possibles est longue et dépend de chaque ouvrage. L'analyse des événements passés, des incidents qui sont survenus ou qui auraient pu survenir est riche d'informations. Chaque maillon de la chaîne doit être examiné, son risque de défaillance évalué et son dispositif de secours testé. L'ingénieur doit en la matière faire preuve de curiosité, en particulier dans les discussions avec le gardien du barrage.

3. Vérification de la capacité d'un évacuateur existant :

Les étapes du calcul sont les suivantes :

- étude de la relation charge-débit au droit de la section qui contrôle l'écoulement. Cette section est généralement le déversoir situé à l'entrée d'un évacuateur de surface ou la section la plus étroite d'un évacuateur en charge ;
- vérification du non ennoiment du seuil ;
- pour un barrage en remblai, calcul de la revanche au-dessus des PHE et déduction de la charge admissible (différence de cote entre le NNR et les PHE) ;
- pour un barrage déversant, calcul de la charge sur le seuil correspondant au débit de la crue de projet éventuellement laminée ;
- pour un barrage en béton ou en maçonnerie non déversant, on calcule dans un premier temps la capacité de l'organe évacuateur de crue pour une cote du plan d'eau au niveau de la crête du barrage. la deuxième étape de calcul consiste à calculer la cote atteinte pour cette crue en considérant la crête du barrage comme un seuil déversant. La cote ainsi obtenue est à considérer dans le calcul de stabilité. Contrairement à un barrage en terre, un barrage en béton ou en maçonnerie résiste au déversement, de même en général que sa fondation. Si la stabilité n'est pas en cause, on pourra admettre ce type de situation pour un épisode de crue rare ;

- étude des conditions d'écoulement dans les autres parties de l'évacuateur (coursier, convergent, sections singulières) ;
- vérification qu'au-delà d'un certain débit, la section qui contrôle l'écoulement n'est pas modifiée (cas d'un seuil libre alimentant un chenal, franchissant l'axe du barrage par un pertuis de section réduite).

❖ A la fin de ce diagnostic, on pourra être amené à conclure :

- que l'évacuateur est correctement dimensionné et fonctionne en toute sécurité ;
- que le dispositif d'évacuation présente des risques importants de mauvais fonctionnement ;
- que l'évacuateur de crue a une capacité largement insuffisante ;
- que la cote des plus hautes eaux est trop élevée vis-à-vis du risque de déversement sur la crête d'un barrage en remblai ou vis-à-vis de la stabilité du barrage ;
- que par endroits, les bajoyers de l'évacuateur de crue sont insuffisamment élevés, dans des zones critiques vis-à-vis du parement aval.

Dans tous les cas, autres que le premier, une modification du système d'évacuation est à prévoir.

4. Techniques de renforcement d'un évacuateur existant :

4.1 Amélioration de la capacité du déversoir :

La capacité d'un déversoir à seuil libre est donnée par la formule $Q = C_d \cdot \sqrt{2g} b \cdot H^{3/2}$ avec Q débit en m^3/s , b longueur déversante en m, H charge au-dessus du seuil en m, C_d coefficient de débit. Ce coefficient dépend fortement de la forme du seuil et faiblement de la charge H tant que le seuil est dénoyé. Lorsque le seuil est noyé, C_d dépend aussi de la charge aval et décroît très rapidement lorsque celle-ci augmente.

On voit donc très facilement sur quels paramètres agir pour améliorer la capacité :

- Sur le coefficient de débit
- Sur la charge
- Sur la longueur

4.1.1 Amélioration du coefficient de débit :

Bien que ce ne soit pas la solution à laquelle on pense en premier, il peut y avoir là un gros gisement facile à exploiter. En effet, certains seuils très mal profilés ont un coefficient de débit de l'ordre de 0,3. On peut atteindre 0,5 avec un très bon profil, ce qui représente un gain de 67%.

Le profil à réaliser est de type Greager ou de type Scimeni, ce dernier ayant l'avantage d'être plus plongeant.

4.1.2 Ennoisement du seuil :

Lorsque le seuil déversant fonctionne en régime noyé, le niveau d'eau aval influe sur la cote du plan d'eau. Le niveau des plus hautes eaux est donc plus élevé que ce qu'il serait en fonctionnement dénoyé.

Dans le cas d'un déversoir à entonnement latéral, il est a priori possible d'abaisser le niveau aval en élargissant la boîte, en l'approfondissant ou en supprimant d'éventuels goulots d'étranglement. L'élargissement ou l'approfondissement sont généralement d'un coût élevé surtout si les conditions géologiques et topographiques ne sont pas favorables. La suppression d'un obstacle au bon écoulement à l'aval de la boîte peut être des plus profitables. En particulier, l'élargissement de passages étroits ou l'adoucissement de convergents trop raides peuvent être particulièrement efficaces.

Dans le cas d'un seuil à entonnement frontal, les solutions possibles sont aussi l'enfoncement du radier aval, la suppression d'éventuels goulots d'étranglement ou l'adoucissement d'un convergent.

4.1.3 Rehausse de la crête de barrage en remblai :

Rehausser la crête d'un barrage est évidemment un moyen imparable de l'empêcher de déverser. Cette solution est en fait tout à fait réaliste pour les barrages de faible longueur. Elle ne convient pas bien sûr si l'on veut diminuer le niveau des plus hautes eaux de la retenue.

Pour des surélévations modérées, deux techniques sont assez pratiques :

- la construction d'une rangée de gabions posée contre le coin amont de la crête ; la perméabilité de ce matériau n'est pas gênante si le niveau des plus hautes eaux reste inférieur à la base du gabion ;
- la construction d'un mur pare-vagues en béton armé.

Ces solutions peuvent devoir être accompagnées d'une surélévation du noyau d'étanchéité si celui-ci n'est pas poursuivi jusqu'à la crête.

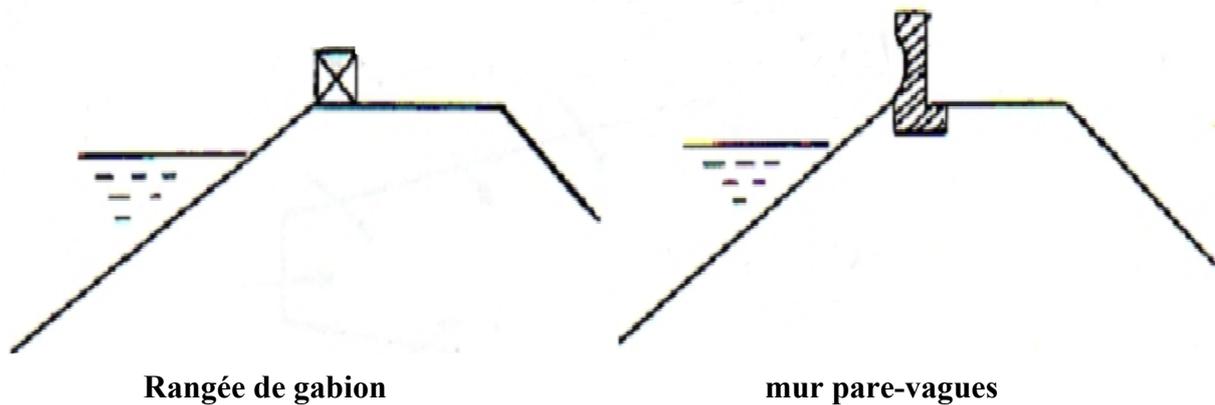


Figure IV.1 : surélévation de la crête

4.1.4 Seuil amovible :

Il est aussi possible de baisser le seuil en crue, tout en ne perdant pas sur le volume stocké grâce à un ouvrage amovible : clapet basculant, barrage souple gonflable ou hausses fusibles. Le clapet basculant est une technique efficace mais coûteuse. Il convient d'être sûr de l'abaissement en crue (sécurité de l'alimentation en énergie) et aussi de l'impossibilité d'abaissement brutal (rupture de l'alimentation d'un vérin). Les deux autres techniques sont séduisantes car leur abaissement ne dépend d'aucune intervention (sauf celle de l'eau !) et ne peut être que progressif.

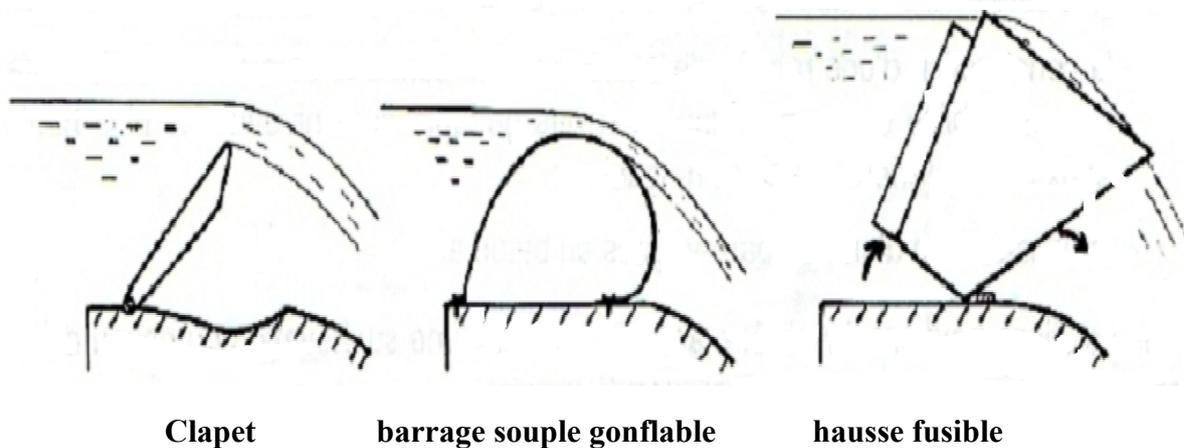


Figure IV.2 : seuils amovibles

4.1.6 Allongement du seuil :

Lorsque le seuil est à entonnement latéral, il est a priori possible d'allonger le seuil, en fait l'ensemble de la boîte, vers l'amont ou vers l'aval. Cela dépend de la configuration des lieux.

Lorsque la boîte n'est pas très profonde, l'allongement vers l'amont risque de ne pas être très efficace si la portion complémentaire de seuil est fortement noyée.

Lorsque le seuil est de type frontal, la même technique est a priori peu praticable. Une solution intéressante permet d'allonger la longueur déversante sans changer l'emprise du seuil : c'est la solution du seuil labyrinthe. Elle consiste à araser le seuil linéaire existant et à le remplacer par un seuil en ligne brisée dont la longueur peut être 4 à 8 fois supérieure. Cette solution a été utilisée à plusieurs reprises aux [USA](#) pour réhabiliter des barrages en remblai anciens.

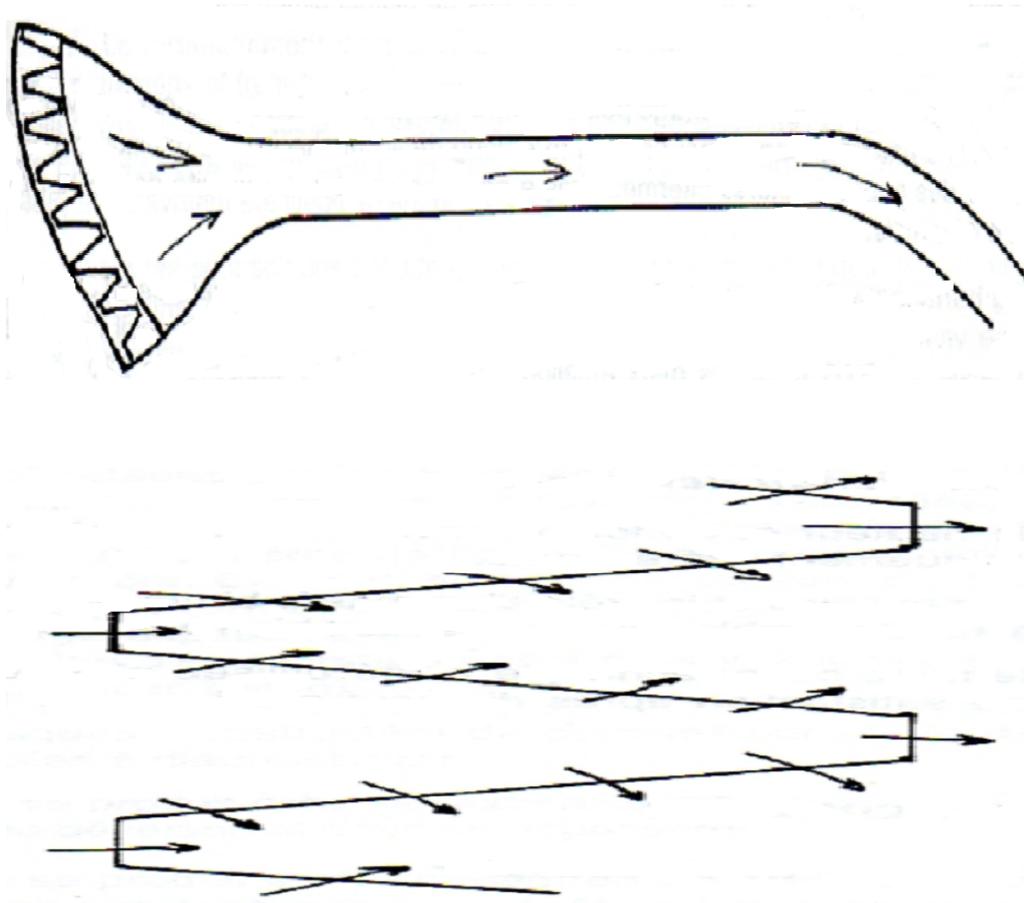


Figure IV.3 : vue en plan schématique d'un seuil labyrinthe

4.1.7 Déversoir complémentaire :

Lorsque le site le permet, il est intéressant d'utiliser un des appuis ou un col naturel pour installer un déversoir complémentaire. Ce seuil peut être calé à une cote différente du seuil initial.

Cette solution a été utilisée en 1984 pour diminuer la charge sur le barrage déversant en maçonnerie de la Bourne en [France](#).

4.1.8 Cas des seuils vannés :

Les ouvrages vannés anciens peuvent présenter deux types de risque :

- le non-fonctionnement en crue ;
- le colmatage en crue par des corps flottants.

Il peut s'avérer utile de remplacer des vannes de petites dimensions par des vannes plus larges en moins grand nombre.

4.1.9 Barrage en remblai rendu déversant :

Pour les barrages de faible hauteur et de longueur modérée, la solution d'un remblai déversant peut être économiquement intéressante.

Elle consiste à revêtir le parement aval et la crête d'un mastic bitumineux. Ce produit souple s'adapte à des mouvements du remblai tout en résistant bien à la vitesse du courant.

4.2 Aménagement du coursier :

Lorsque l'étude hydraulique a montré que des débordements pouvaient se produire sur tout ou partie du coursier, il convient :

- de l'élargir s'il s'agit d'un ouvrage creusé dans le rocher ;
- de rehausser les bajoyers s'il s'agit d'un chenal bétonné en forme de U.

4.3 Problèmes de surveillance et d'entretien :

Les risques d'obstruction du coursier par chute de pierres ou glissement de terrain sont faciles à diagnostiquer.

Si ce désordre se produit près de l'extrémité amont du coursier, il y a un risque important d'envolement du déversoir et donc de dépassement de la cote des plus hautes eaux.

Si ce désordre se produit suffisamment en aval, il se peut que les conditions d'écoulement au déversoir restent inchangées. Mais, un débordement du coursier peut provoquer une érosion dommageable pour l'appui ou pour le parement aval.

Les mesures peuvent être faciles à mettre en œuvre dans certains cas : rehausse des bajoyers du coursier, grillage de protection d'un talus rocheux....

5. Exemple d'application : (Barrage de K'Sob)

Le barrage de l'oued [K'Sob](#) est un barrage multi-voûtes situé au lieu dit de [HAMMAN](#) à environ 15 kilomètres au nord de [M'Sila](#).

Il a été édifié dans le but d'irriguer la plaine de M'Sila dont les terres sont propices aux

cultures maraichères, aux céréales et arbres fruitiers, sa construction n'a présenté aucune difficulté notable.

5.1 Crues :

Par la formule de MALLET-GAUTIER ils ont obtenu :

- Période de 100 ans : 850 m³/s
- Période de 1000 ans : 1100 m³/s

A partir d'une étude statistique de précipitation :

- Crue centennale : 1200 m³/s.
- Crue millénaire : 1700 m³/s.

5.2 Le corps du barrage :

- Altitude au NNR : 590 m
- Capacité total (utile) : 11,6 hm³
- Hauteur du barrage au dessus de thalweg au niveau du déversoir : 32 m
- Hauteur au dessus de la crête du déversoir : 1 m

Longueur du barrage est 254,5 m, une partie centrale de 168 m de longueur formant déversoir.

5.3 Problématique :

- La construction du barrage commença en 1933.
- Les fondations furent terminées en 1934.
- En 1935 une crue de 660 m³/s survint le 5 Octobre endommageant les rives en aval du barrage.

La plus forte crue observée depuis 1924, date de la mise en service de la station de jaugeage de [Medjez](#), le 5 Octobre 1935, a montré des incertitudes dans l'estimation du débit maximum probable des crues de l'oued Ksob. Ce qui a conduit le service constructeur du barrage en 1936 à doter de dispositifs paraissant aujourd'hui très largement conçus :

- D'une part, sur la rive droite, un ensemble de deux galeries souterraines comme évacuateurs de crues en tête desquelles sont installées des vannes automatiques dont le rôle est d'évacuation de crues et maintenir le plan d'eau dans la retenue au NNR, soit (590 m).

- D'autre part, le couronnement déversant sur le barrage capable d'évacuer un débit max d'environ $365 \text{ m}^3/\text{s}$ avec une lame d'eau max de **1 m**.

$$\begin{aligned} Q &= C_d \cdot b \cdot (2g)^{1/2} \cdot h^{3/2} \\ &= 0,49 \cdot 168 \cdot (2 \cdot 9,81)^{1/2} \cdot (1)^{3/2} \\ &= \mathbf{364,6 \text{ m}^3/\text{s}} \end{aligned}$$

Le premier dispositif assure l'évacuation des crues normales, pour les crues exceptionnelles, il continue à fonctionner concurremment avec le second. Le débit qu'il évacue est alors en fonction du niveau de la retenue.

Pour le seuil mobile deux variantes ont été proposées :

- ✓ 6 vannes de 3 m de haut (seuil à la cote 587 m).
- ✓ 6 vannes de 4,5 m de haut (seuil à la cote 585,5 m).

C'est la seconde variante qui a été retenue.

❖ Les vannes, qui équipent l'évacuateur sont des vannes **segments** ayant pour largeur **7m** ; leur seuil est calé à l'altitude **585,5 m** et assure la retenue nominale à l'altitude **590 m**.

Elles sont groupées en 2 ensembles de trois vannes. Chacun des ensembles alimente une des galeries d'évacuation des crues.

5.4 Fonctionnement des vannes :

Les vannes commencent à s'ouvrir lorsque le plan d'eau dépasse de quelques centimètres (en principe **2** ou **3 cm**) le niveau normal de retenue. Elles sont complètement ouvertes lorsque le niveau atteint l'altitude **590,15 m** et se referme complètement lorsque le niveau est à l'altitude **589,9 m**.

En cas des crues exceptionnelles qui dépassent le NNR les deux galeries peuvent évacuer un débit maximal environ de **1500 m³/s** qui correspond à une surélévation max de **1 m** sur la crête du déversoir.

Donc l'évacuateur de crues du barrage de K'Sob dispose d'une capacité total d'évacuation d'environ **1865 m³/s**.

❖ Cette capacité qui paraît largement suffisante puisque le barrage n'a connu aucun débordement sur la crête jusqu'à l'année 1975, où le barrage est surélevé et aménagé pour augmente sa capacité (lutte contre l'envasement).

Chapitre V :

L'étude hydraulique des hausses fusibles

1. Introduction :

Les hausses fusibles s'installent à la construction d'un nouveau barrage ou sur un barrage existant. Elles s'adaptent à tous types de barrages et permettent d'optimiser son exploitation.

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

2. Dimensionnement hydraulique :

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

Mais pendant son exploitation, la vérification de l'étude hydrologique conduit, dans plusieurs cas, à la réactualisation de la crue du projet.

Pour cela, l'utilisation des hausses fusibles sur le déversoir permet de conserver la stabilité du barrage en tenant compte de la révision de la crue du projet.

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

- Dans le cas où la vérification de l'étude hydrologique n'amène pas à modifier le débit de la crue de projet, l'installation des hausses fusibles permet de récupérer une tranche utile de retenue jusqu'à 75% de la hauteur des plus hautes eaux. Cela résulte du fait que le niveau des plus hautes eaux pour la crue de projet n'est pas modifié par rapport à la situation antérieure, ce qui ne change pas les conditions de sécurité de l'ouvrage.
- Dans le cas où la vérification de l'étude hydrologique amène à modifier le débit de la crue de projet, et afin de ne pas modifier le niveau des plus hautes eaux, un dérasement du seuil s'impose pour le passage de la crue de projet. La tranche d'eau gagnée par l'installation dans ce cas est légèrement inférieure à celle du cas précédent.

3. 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 nette instabilité. Lors du remplissage du puits et de la chambre, le système de forces auxquelles est soumise la hausse est rapidement modifié par l'application d'une sous-pression sous sa base.

Donc, la stabilité d'une hausse fusible est dépendante des considérations de glissement et de renversement. La stabilité de glissement est facilement assurée par les butées aval, qui sont ancrées dans le seuil. La stabilité au renversement peut se traduire par la résultante, par rapport aux butées aval, des moments des efforts agissant sur la hausse. On peut alors définir un coefficient de sécurité au renversement afin de donner une assurance sur la fiabilité du système, aussi bien vis-à-vis de la stabilité avant remplissage de la chambre que vis-à-vis de l'occurrence du basculement après introduction de la sous-pression.

4. Efforts intervenants dans la stabilité d'une hausse

Les hausses fusibles sont des éléments autostables jusqu'à une cote d'eau déterminée, qui au-delà fonctionnent comme un fusible, c'est-à-dire qu'elles basculent sous la poussée de l'eau.

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

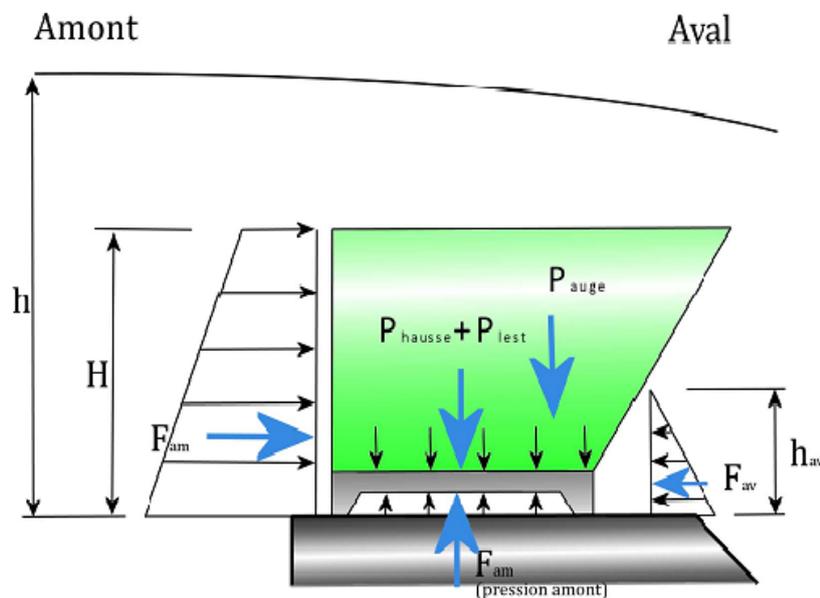


Figure V.1 : système de forces agissant sur hausse labyrinthique.

4.1 Pression hydrostatique amont

Pour simplifier les équations suivantes, la pression hydrostatique sur les puits n'est pas prise en compte.

➤ Si $h \leq H$:

$$F_{am} = 1/2 \cdot \rho \cdot g \cdot L \cdot h^2$$

Avec :

F_{am} : pression hydrostatique amont

L : largeur de la hausse.

H : hauteur de la hausse

h : hauteur de la retenue au-dessus du seuil portant la hausse

g : accélération de la pesanteur.

ρ : densité de l'eau.

▪ Moment correspondant :

$$M_{am} = 1/6 \cdot \rho \cdot g \cdot L \cdot h^3$$

➤ Si $h > H$:

$$F_{am} = 1/2 \cdot \rho \cdot g \cdot L \cdot H \cdot (2h - H)$$

▪ Moment correspondant :

$$M_{am} = 1/6 \cdot \rho \cdot g \cdot L \cdot H^2 \cdot (3h - 2H)$$

4.2 La contre pression de la lame déversante :

La résultante de la contre pression de la lame déversante :

$$F_{av} = 1/2 \cdot \rho \cdot g \cdot L_{av} \cdot h_{av}^2$$

F_{av} : la contre pression de la lame déversante.

L_{av} : larguer de la façon aval de l'auge.

h_{av} : hauteur de la retenue au-dessus du seuil portant la hausse.

Le moment correspondant :

$$M_{av} = 1/6 \cdot \rho \cdot g \cdot L_{av} \cdot h_{av}^3$$

Dans lequel h_{av} est la charge d'eau s'exerçant contre la face aval de l'auge et L_{av} la largeur de la face aval de l'auge.

Le moment de la contre pression est faible en comparaison avec les autres moments participant à la stabilité de la hausse.

4.3 Le poids de la hausse et du lest :

Poids mort de la hausse : P_h

*Le moment correspondant : $M_h = P_h \cdot X_h$

Poids mort du lest : P_l

*Le moment correspondant : $M_l = P_l \cdot X_l$

Avec :

X_h, X_l : les distances horizontales des centres de gravité de la hausse et du lest depuis la butée.

4.4 La pression de l'eau exercée sur l'auge :

Quand la hausse ne déverse pas ($h < H$), la résultante de la pression verticale qui s'exerce à l'intérieur de l'auge est égale au poids de l'eau dans l'auge.

Elle varie de 0 à P_{au} .t.q :

$$P_{au} = \rho \cdot V_{au}$$

Avec :

P_{au} : résultante verticale de la pression dans chambre.

V_{au} : contenance de la chambre.

Lors du déversement, la ligne d'eau au-dessus de la hausse suit une courbe descendante vers l'aval. Le profil de la lame d'eau est en fonction du débit de la crue de basculement et des conditions topographique du site. Pour cela, la composante verticale de la pression de l'eau est déterminée à partir d'essais sur un modèle réduit.

Résultante verticale de la pression dans l'auge : P_{auge}

Moment de la résultante verticale de la pression dans l'auge : M_{auge}

5. Performances hydrauliques des hausses :

La capacité de déversement d'une retenue face aux conditions normales d'exploitation et lors des crues exceptionnelles constitue un paramètre important de la sécurité pour l'ouvrage et pour le bassin d'aval.

De plus, si dans un barrage, il y a une augmentation de la capacité de stockage par une surélévation de la crête du déversoir, le niveau d'eau à évacuer lors des crues sera important et pourra mettre en péril le barrage.

Pour cela, lors d'un dimensionnement pour un projet de mise en place de hausses fusibles, le concepteur dispose des principaux paramètres suivants :

- ✓ La quantité d'eau à stocker.
- ✓ Le niveau des plus hautes eaux.
- ✓ Le débit à évacuer.
- ✓ Le type de hausses et la hauteur des hausses
- ✓ La crue entraînant le premier basculement et la période de retour correspondante.
- ✓ L'échelonnement des basculements.
- ✓ La hauteur de dérasement.

Tous ces paramètres permettent la bonne conception des hausses.

Cette conception doit assurer une quantité importante d'eau sans avoir d'impacts sur l'environnement et ni engendrer le déplacement des populations locales.

Et afin de mettre en évidence la sécurité de fonctionnement des hausses fusibles, les principes de base de fonctionnement sont développés dans ce qui suit.

5.1 Les dimensions des hausses fusibles :

L'analyse technique et économique du projet doit permettre d'éviter une perte de stockage du barrage, tout en garantissant une sécurité de fonctionnement comparable à celle d'un seuil libre. Cette sécurité de fonctionnement est assurée par un échelonnement des niveaux de basculement.

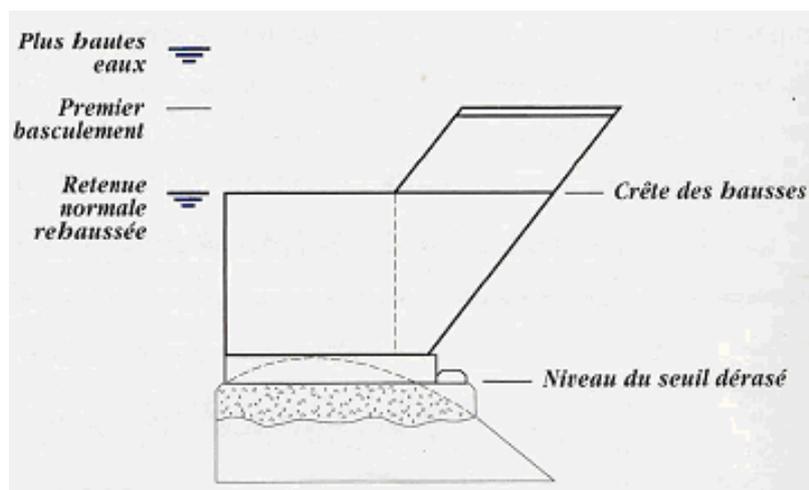


Figure V.2 : Coupe transversale d'un seuil équipé de hausse fusible

L'installation des hausses fusibles sur le seuil du déversoir nécessite un dérasement de ce dernier. La hauteur de ce dérasement est déterminée de manière à évacuer la crue de projet, une fois toutes les hausses ayant basculé, sans augmenter le niveau des plus hautes eaux. De plus, pour la même raison, le dernier basculement doit être réglé pour le niveau des hautes eaux ou légèrement plus bas.

Les hausses fusibles labyrinthes sont disponibles en trois types variant la hauteur de la crête, la largeur et la lame déversante selon les exigences et les conditions du projet, elles se trouvent en hauteur standard 1.5 ; 1.8 ; 2.15 ; 2.6 ; 3.1 ; 3.75 ; 4.5 ; 5.4 ; 6.5 et 7.8 m.

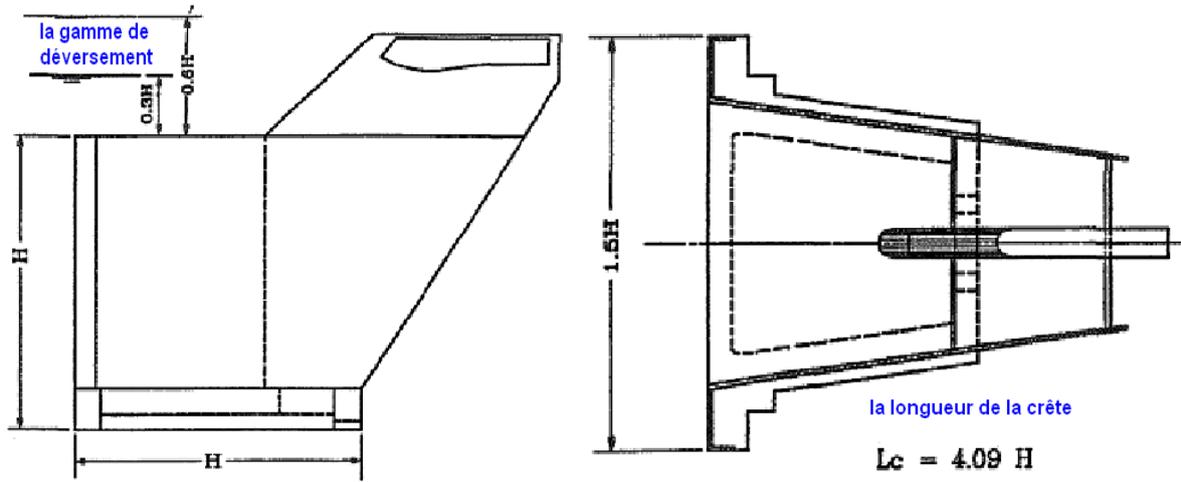


Figure V.3 : Hausse labyrinthe à faible lame déversante (type A).

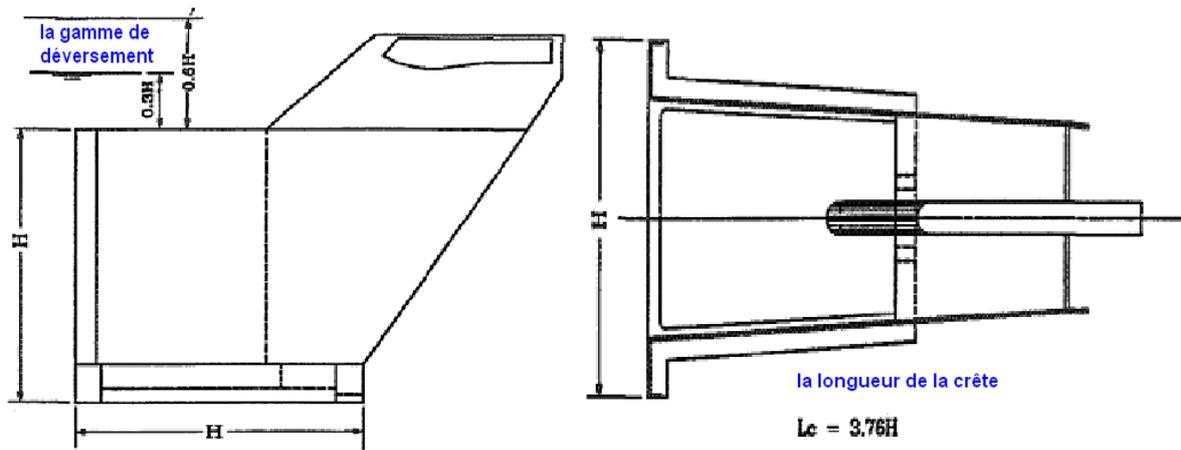


Figure V.4 : Hausse labyrinthe à lame déversante modérée (type B).

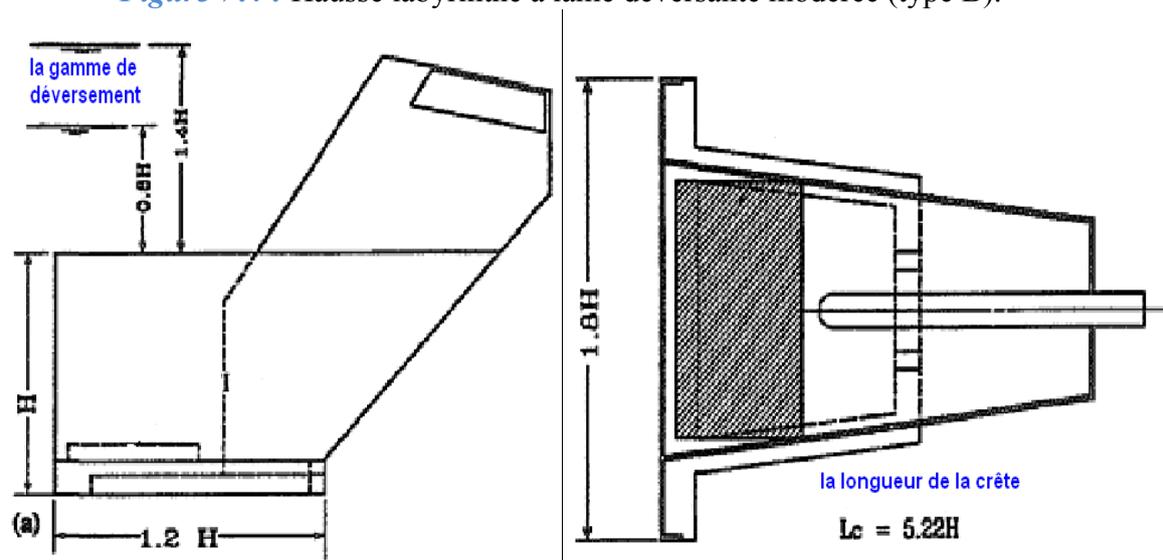


Figure V.5 : Hausse labyrinthe à forte lame déversante (type C).

5.2 Caractéristiques du débit des hausses :

Le débit évacué par la crête des hausses fusibles a les mêmes propriétés que les déversoirs à seuil libre.

Donc, le débit évacué par un seuil à crête d'une hausse est :
Les dimensions des hausses fusibles :

$$Q = C_d \cdot L_r \cdot (2g)^{1/2} \cdot h^{3/2}$$

C_d : Coefficient de débit de la hausse.

h : lame déversante par rapport à la crête des hausses.

L_r : Longueur rectiligne du seuil.

g : Accélération de la gravité.

Le coefficient de débit est déterminé par voies expérimentales, que ce soit pour les hausses labyrinthes ou rectilignes. Les essais ont été effectués au [LABORATOIRE NATIONAL D'HYDRAULIQUE, France](#) et au [LABORATOIRE TENNESSEE VALLEY AUTHORITY, USA](#). L'analyse des essais effectuée sur les hausses a permis de constater que :

➤ Pour les hausses labyrinthes :

Le coefficient de débit dépend du type de hausse et du rapport de la lame déversante h à la hauteur des hausses.

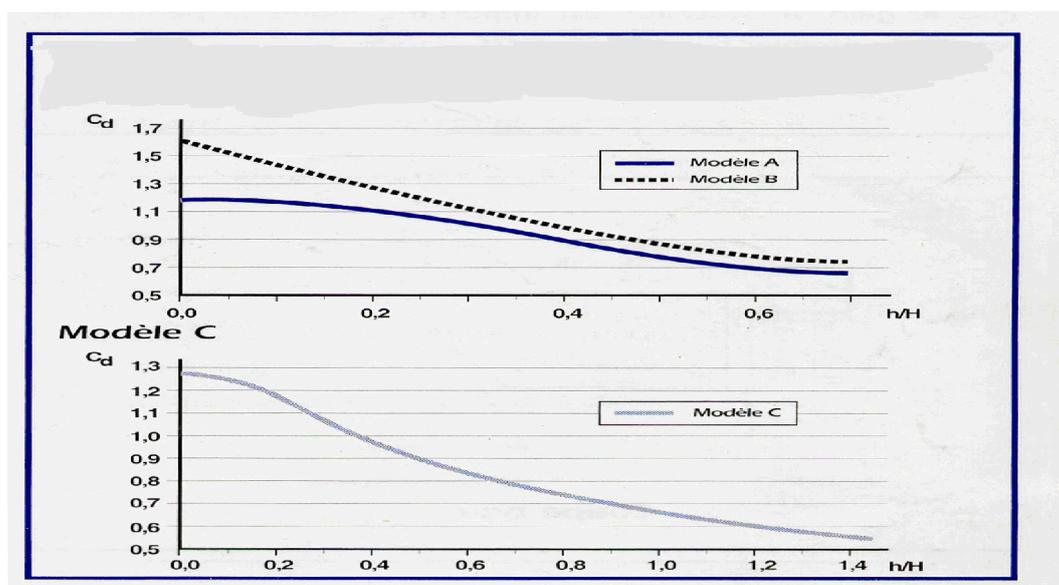


Figure V.6 : Coefficient de débit pour des hausses labyrinthe

➤ **Pour les hausses rectilignes destinées à supporter de très fortes lames :**

Le coefficient d'écoulement est optimal lorsque la face amont est profilée de manière à épouser l'écoulement. Le profil de la face contribue à éviter la création de zones de cavitation sur le seuil déversant.

5.3 Le débit aval :

Pour une crue donnée entrant dans la retenue qui ne provoque pas le basculement des hausses, le débit en aval du barrage est réduit voir annuler ; du fait que cette crue sera stocker partiellement ou entièrement.

Or, pour une crue qui cause un basculement des hausses, l'hydrogramme en aval du barrage est peu différent de celui obtenu avant rehaussement du seuil. La seule différence tient au fait que la courbe des débits évacués présente, pour les très fortes crues, une partie montante en forme de marche escalier correspondant aux basculement successifs d'un certain nombre de hausses. Le débit de pointe de la crue n'est pas modifié de façon significative.

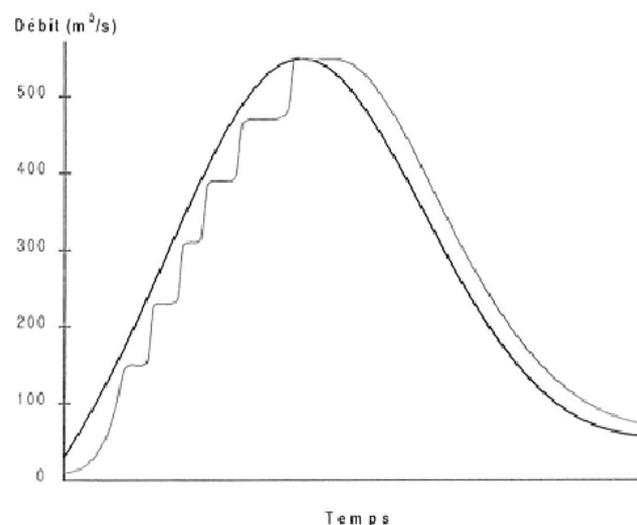


Figure V.7 : Hydrogramme de débit en aval sans et avec hausses fusibles.

5.4 Augmentation de la capacité d'un barrage existant :

L'augmentation de la capacité de stockage par installation de hausses fusibles sur le seuil libre d'un barrage existant constitue une solution simple, économique et sûre, pour répondre à un besoin en eau.

Les hausses à crête labyrinthe sont généralement utilisées pour ce type d'application. Les principaux paramètres dont dispose le concepteur pour le dimensionnement du projet de surélévation sont :

- le type et la hauteur de la hausse,
- la hauteur de dérasement du seuil,
- Le débit de la crue entraînant le premier basculement et la période de retour correspondante,
- le volume d'eau à stocker dans la retenue,

La crue du premier basculement est choisit de manière à optimiser les performances économiques du projet.

5.5 Amélioration de la capacité de l'évacuateur de crues et la sécurité du barrage :

Le contrôle des crues est un élément essentiel de la sécurité des barrages, L'évolution des méthodes d'estimation de la crue de projet conduit dans beaucoup de cas à réévaluer la capacité nécessaire des évacuateurs.

L'utilisation des hausses fusibles permet de mettre en conformité les évacuateurs de crues initialement sous estimés, de manière économique, sans perte de capacité de stockage hormis en cas de crue provoquant le basculement d'au moins une hausse, et avec une sécurité de fonctionnement proche de celle des évacuateurs à seuils libres.

5.6 Optimisation de l'évacuateur de crues pour un barrage neuf :

En moyenne, le coût de l'évacuateur de crues représente environ le tiers du coût total d'un barrage. L'utilisation des hausses fusibles peut être un facteur décisif dans la conception d'un barrage nouveau. Elle permet de concevoir des évacuateurs de crues économiques, sûrs et faciles à implanter.

6. Les hausses installées dans le monde :

Plusieurs projets d'installation de hausses fusibles ont été effectués à travers le monde. Chaque projet a ses propres caractéristiques qui tiennent compte critères spécifique au site. Ces projets avaient pour but soit un gain de stockage soit un gain au déversement. Le tableau suivant illustre quelques projets.

Tableau V.1 : Les hausses fusibles dans le monde

Non du barrage	Gain de stockage (%)	Gain de capacité du déversoir (%)
Kamuzu (MALAWI)	115	20
Ruti (ZIMBABWE)	20	0
Eikenhof (AFRIQUE DU SUD)	19	0
Xiliatos (CHIPRE)	17,2	0
Upper Layang (MALAYSIE)	19	0
Dhypotamos (CHYPRE)	13	0
Mas Chaban (FRANCE)	9,3	0
Chopadvav (INDE)	35	0
Wanakbori (INDE)	100	0
sonmati (INDE)	42	0
Ruai (ZIMBABWE)	30	0
Pluylaurant (FRANCE)	12	0
Chhaparwadi (INDE)	62	0
Kakdiamba (INDE)	22	0
Montsalvens (SUISSE)	2	400
Blacck Rock (E.U.A)	0	1060
Caillaouas (FRANCE)	0	190
McClure (E.U.A)	17	8
Dove Stone (ANGLETERRE)	0	42
Shongweni (AFRIQUE DU SUD)	0	235
Lussas (FRANCE)	30	15
Lyell (AUSTRALIE)	29	22

Chapitre VI :

Le renforcement d'évacuateurs de crues aux différents barrages

1. Introduction :

Dans ce chapitre on va présenter des techniques de renforcement d'évacuateurs de crues avec des cas pratiques face aux problèmes de l'augmentation de la capacité de stockage et d'évacuation.

2. Technique des vannes pour augmenter la capacité de stockage :

2.1 Barrage de ZARDEZAS :

2.1.1 Présentation du barrage :

- Le barrage de **ZARDEZAS** est un barrage poids, qui a été construit de 1929 à 1945 sur l'oued **Saf-Saf**, il est situé à 35 km au Nord Est de **CONSTANTINE** et à 30 km au Sud de **SKIKDA**. Il alimente en eau potable la ville de SKIKDA et sa zone industrielle, ainsi que cinq villages de la basse vallée du Saf-Saf. Il permet de plus l'irrigation d'environ 1800 hectares au moyen de lâchures effectuées dans le lit de l'oued.
- Sa capacité initiale est de 15 millions de m³.
- Sa hauteur est 37 m, la crête du barrage à la cote 187 m, la partie centrale déversante est de 74 m de longueur, dont la crête du déversoir est arasée à la cote 184,3 m, ce déversoir de profil Greager capable d'évacuer un débit de 1200 m³/s. Le fruit du parement aval est de 0,75, et celui du parement amont est de 0,05.

2.1.2 Hydrologie :

- La surface du bassin versant est de 345 km²
- L'enneigement est nul. Il pleut environ 100 jours par an.
- Le volume annuel évaporé sur la surface de la retenue est d'environ 1hm³.
- Le débit solide de l'oued Saf-Saf n'est pas considérable, il est de l'ordre de 0,5 % du débit liquide au maximum. Les dépôts dans le lac de retenue sont constitués en majeure partie par des éléments fins. La densité moyenne des alluvions est de 1,6 t. environ.
- L'envasement annuel moyen de la cuvette mesuré entre 1937 et 1967 a été de 0,25 hm³ correspondant à 0,47 % du débit liquide.

- Le régime de l'oued Saf-Saf est caractérisé par son irrégularité :
 - La moyenne des apports annuels sur 21 ans est de 53 hm^3 avec un maximum de $187,7 \text{ hm}^3$ en 1957/1958 et un minimum de $6,9 \text{ hm}^3$ en 1960/1961 ; (mesure relevées de 1939 à 1966).
 - Irrégularité annuelle : 77 % des apports s'écoulent en hiver de décembre à mars.

2.1.3 Les crues :

Les calculs basés sur les mesures hydrométriques et pluviométriques ont conduit à adopter les débits de pointe de crue suivante :

- Crue décennale $Q_{10} = 450 \pm 50 \text{ m}^3/\text{s}$
- Crue centennale $Q_{100} = 1400 \pm 200 \text{ m}^3/\text{s}$
- Crue millénaire $Q_{1000} = 3000 \pm 500 \text{ m}^3/\text{s}$

2.1.4 L'envasement :

Le niveau supérieur actuel de la vase est de 170 m, ce qui correspond à un volume utile d'environ 6 hm^3 .

Le volume cumulé de la vase, estimé pour l'an 2000, est de $12,6 \text{ hm}^3$. Pour une durée de 50 ans, le volume cumulé de la vase peut être estimé à $16,5 \text{ hm}^3$, correspondant au niveau supérieur de la vase de 185 m.

2.1.5 Problématique :

En 1967 la retenue d'une capacité initiale de 15 millions de m^3 à la cote de retenue normale 184,3 m, ne représentait plus que 9 millions de m^3 par suite de son envasement progressif. Le niveau de la vase avoisinait alors la cote 174 m.

L'apport moyen annuel de Saf-Saf étant de 53 millions de m^3 le volume utile résiduel de 9 millions de m^3 a permis de distribuer en moyenne 11 millions de m^3 par an qui ont suffi jusqu'à fin 1971 pour couvrir les besoins en eau de la ville de SKIKDA et des villages et exploitations agricoles alimentés dans la vallée du Saf-Saf.

Cependant, les besoins en eau de la ville de SKIKDA se trouveraient rapidement augmentés lors de la mise en activité de l'équipement industriel en cours de réalisation.

Il fallait également envisager le développement marqué des besoins agricoles, liés à la mise en valeur de 1800 ha supplémentaire dans la vallée de Saf-Saf.

Le tableau ci-dessous résume les quantités d'eau supplémentaires qu'il était prévu de fournir :

Tableau VI.1 : les quantités supplémentaires pour satisfaire les besoins

Années	1972	1973	1974	1975	1980	1985	1990
V(Mm ³)	2,8	6,6	7,8	10,7	20,7	25,2	25,7

Le premier impératif était, pour l'Administration, de faire face aux besoins à court terme. Dans ce but, après examen de diverses solutions il fût décidé de surélever le barrage de ZARDEZAS.

- ❖ Après des études complémentaires, ce qui concerne la stabilité du barrage (hydrologie, géologie et géotechnique du rocher de la fondation), une surélévation de 12,7 m est retenue, de la cote 184,3 m à 197 m le nouveau niveau normale de retenue avec une crête du barrage d'une cote de 199 m.
- ❖ Le déversoir est constitué de cinq passes déversantes de la partie centrale du barrage, quatre passes de 11 m d'ouverture et une passe de 15,1 m, chaque passe est obturée par une vanne segment de 7 m de hauteur à la cote de 190 m.

Compte tenu de l'effet de laminage créé par la retenue, il a été admis un débit nominal de l'évacuateur de crues (débit pour le niveau de retenue normale 197 m) de 2000 m³/s avec une revanche de 2 m.

A la cote 197 m, le débit évacué est 2000 m³/s, et 3200 m³/s lorsque le plan d'eau atteint le couronnement du barrage (199m).

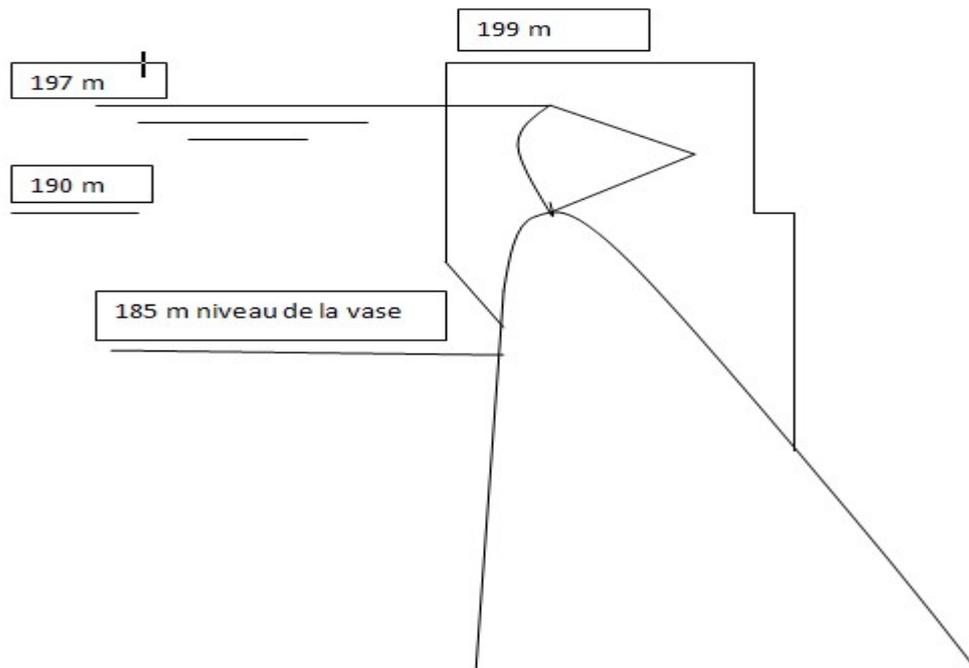


Figure VI.1 : coupe transversale de la surélévation du barrage

2.1.6 Fonctionnement des vannes :

Lors d'une crue, il est prévu qu'une des vannes de 11 m de largeur s'ouvre automatiquement et proportionnellement au niveau de la retenue de la cote 197 à 197,05 m.

A partir de la cote 197,05 m, se produit l'ouverture simultanée des quatre autres vannes qui se mettent à la même position que la première. Les cinq vannes manœuvrent alors simultanément et proportionnellement au niveau amont pour atteindre l'ouverture totale à la cote 197,5 m.

2.1.7 Analyses et critiques :

✚ En 1977, la hauteur du barrage a été portée à 47 m (12, 7 m de plus). Le volume ainsi obtenu est de $31 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

✚ En comparaison avec la solution de dragage à capacité égale, la surélévation et le renforcement de l'évacuateur par des vannes représentent une solution très économique à fin d'accroître la capacité de stockage. De plus le barrage est équipé de chasses d'envasement, la rehausse contribue à son dévasement d'une part et d'autre par à augmenter sa longévité.

✚ La surélévation est mise à profit pour augmenter le débit nominal de l'évacuateur de crues de 1200 à 2000 m³/s en se basant sur les dernières études hydrologiques de l'oued Saf-Saf. La sécurité de l'ouvrage s'en trouve donc augmentée par rapport celle du barrage existant.

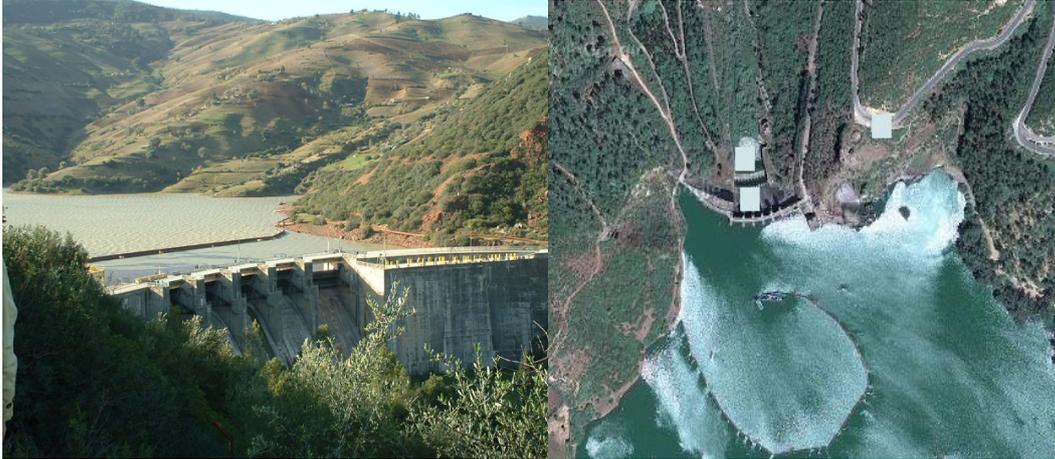


Figure VI.2 : barrage de ZARDEZAS après surélévation

3. Technique des hausses fusibles pour augmenter la capacité de stockage :

3.1 Barrage de FOUM EL GUEISS :

3.1.1 Présentation du barrage :

Le barrage de **Foum El Gueiss** est un barrage en enrochement de 34 m de haut, 250 m de long qui est situé à 19 km de **Khenchela**, le barrage est mis en service en 1938 et actuellement il est destiné à l'alimentation de la ville de **Kaïs** et l'irrigation de la haute plaine de **Remila**.

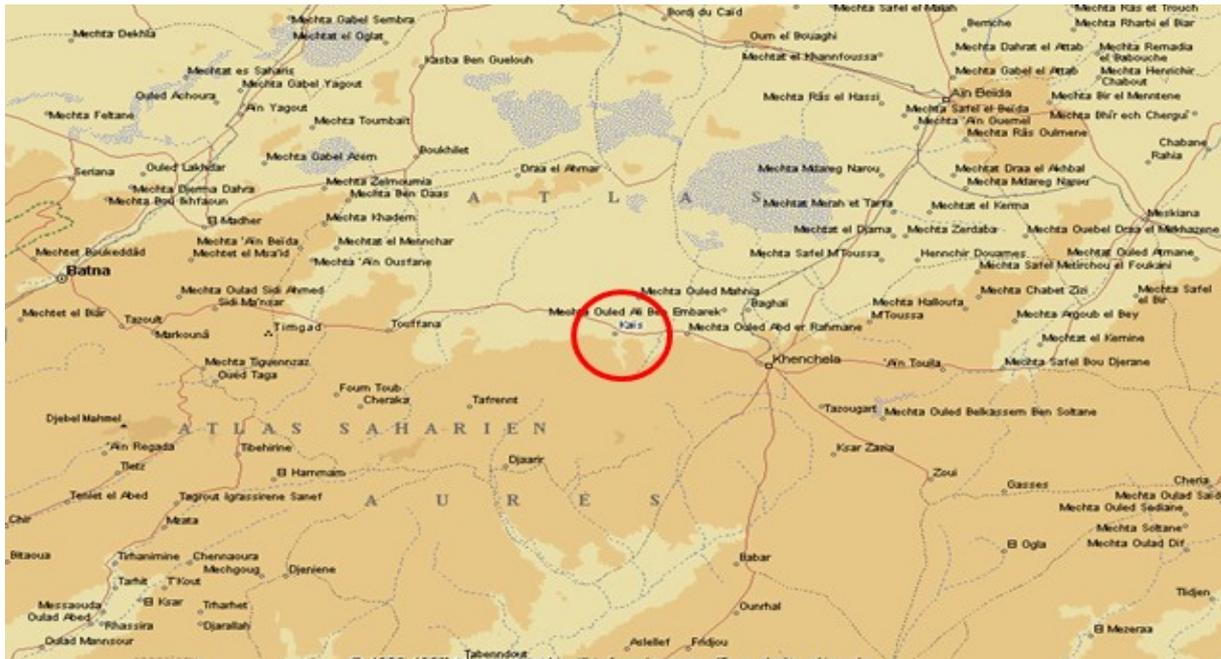


Figure VI.3 : La situation du barrage par rapport la ville de Khenchela

Sa capacité initiale est de 3 millions m^3 , L'évacuateur de crue du barrage de Foum El Gueiss est un seuil Craeger de 105 m de longueur coiffé d'une passerelle capable d'évacuer $600 m^3/s$.

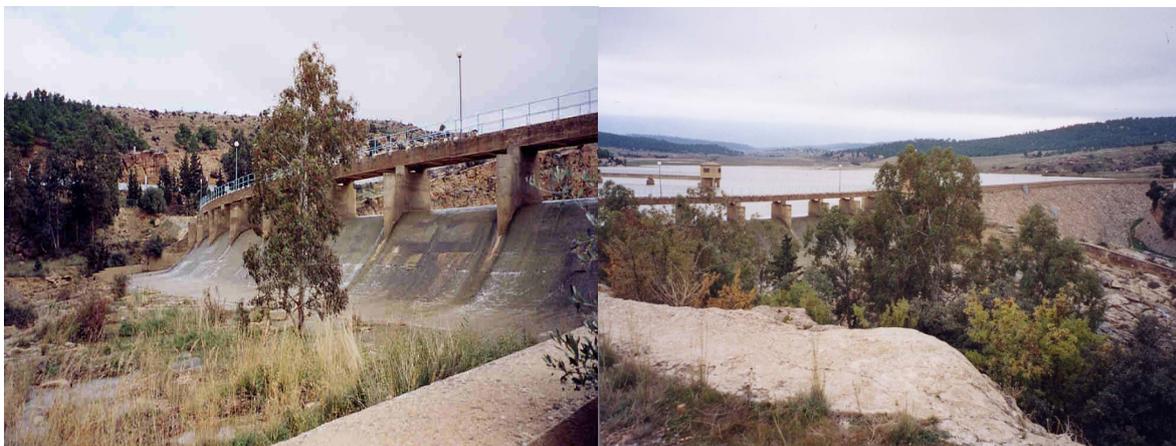


Figure VI.4 : Vue du barrage de Foum El Gueiss

3.1.2 La problématique :

le barrage a subi un envasement extrêmement important et rapide diminuant drastiquement sa capacité utile.

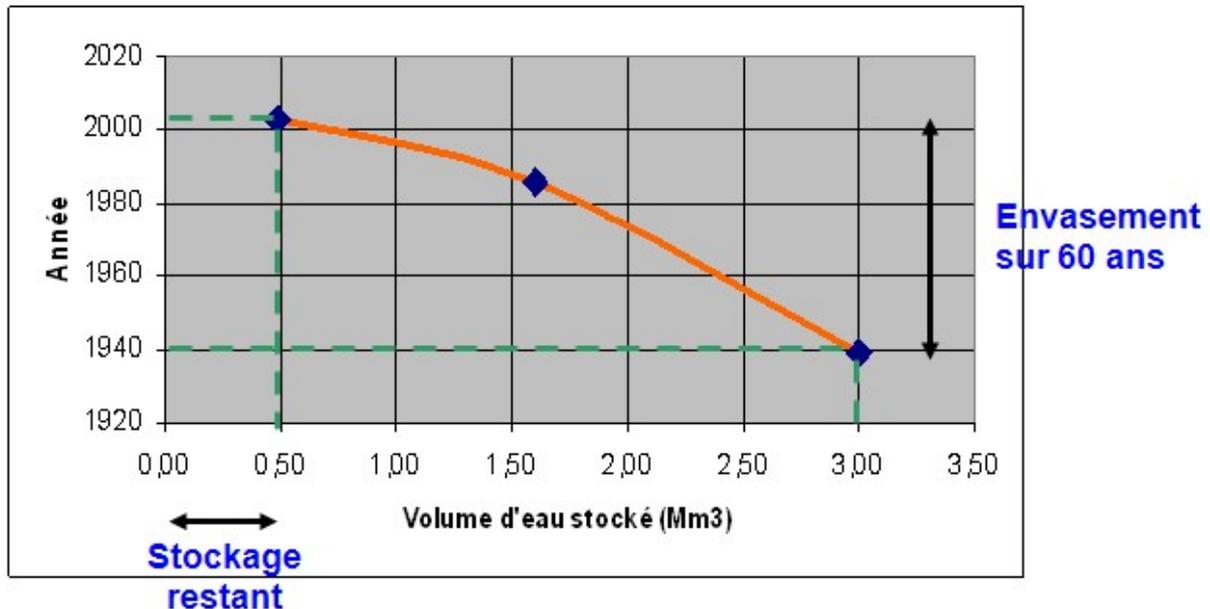


Figure VI.5 : Envasement de la retenue de Foum el Gueiss en fonction du temps

- ✓ *Quel est l'impact de cet envasement sur l'irrigation de la haute plaine de Remila et sur l'alimentation en eau de Kais?*
- ✓ *Est-il intéressant d'augmenter la capacité utile du barrage?*
- ✓ *Si oui, quelle est la meilleure solution pour augmenter cette capacité ?*

3.1.3 Les solutions pour augmenter la capacité :

Deux types de solution pour augmenter la capacité de la retenue :

- ✚ *Dévasement total ou partiel*
- ✚ *Surélévation du barrage*

3.1.3.1 Le dévasement :

Sur une longue période l'envasement moyen est supérieur à 25 000 m³/an, Depuis sa mise en eau en 1939, le volume total de la vase déposée au fond de la cuvette est estimé à plus de 2,5 Mm³ soit 83% du volume total.

Le coût du dévasement est de l'ordre de 250 DA/m³.

Donc, du point de vue l'économie le dévasement du barrage de Foum El Gueiss sera plus coûteux, La solution dévasement a été écartée.

3.1.3.2 Surélévation du barrage :**a) Généralité :**

D'une façon générale, il existe deux types de surélévations possibles dans le but d'augmenter la capacité utile du barrage :

- La surélévation du corps de l'ouvrage et de tous ses organes annexes (en particulier le déversoir),
- La mise en place sur le déversoir d'une bouchure mobile, qui s'efface en cas de crue importante pour retrouver la capacité d'évacuation initiale du barrage,

Dans le cas de Foum El Gueiss, la surélévation du corps du barrage est difficilement envisageable compte tenu du seuil qui est équipé par une passerelle; elle conduirait à des travaux longs et difficiles.

Par contre le barrage se prête bien à la mise en place d'une bouchure mobile sur le déversoir divisé en 13 passes et équipé de 12 piliers supportant une passerelle.

Deux types de bouchure mobile sont envisageables :

- Une bouchure de type clapets,
- Une bouchure de type hausses fusibles.

b) Clapets :

La solution de bouchure mobile par clapets est classique et coûteuse. La longueur de la partie déversante impose de mettre en place plusieurs clapets adjacents, séparés par des piles intermédiaires en béton.

c) Hausses fusibles :

Cette solution consiste à mettre en place sur la crête déversante des organes fusibles dimensionnés pour s'effacer en cas de crue importante, qui a été mis en place sur un certain nombre de barrages dans le monde.

Cette technique des hausses fusibles exige peu d'entretien et de maintenances comparées aux systèmes de vannes classiques :

- ✓ Elles sont simplement posées sur le seuil de l'évacuateur.
- ✓ Elles ne comportent aucun dispositif mécanique et ne sont donc pas sujettes aux défaillances mécaniques.
- ✓ Elles n'ont pas besoin d'électricité pour leur fonctionnement et ne sont donc pas sujettes à un défaut d'alimentation en énergie.
- ✓ Elles sont entièrement automatiques, ne requièrent aucune intervention humaine pour fonctionner et ne sont donc pas sujettes aux négligences humaines.
- ✓ Leur fonctionnement ne dépend que de l'intensité des crues.

3.1.4 Objectif :

Accroître le volume du barrage-réservoir de 540 000 m³ sans accroître la zone inondée des Plus Hautes Eaux.

- ➔ Gain de stockage : 18% du volume initial du réservoir.
- ➔ 48% de la tranche d'eau regagnée entre la retenue normale et les Plus Hautes Eaux

Pour répondre aux exigences du projet, ils ont installé **48** hausses fusibles labyrinthe en béton armé.

Des hausses de **1,10 m** de hauteur, de **1,98 m** de largeur type **C** (à forte lame déversante) pesant **2 tonnes** chacune.

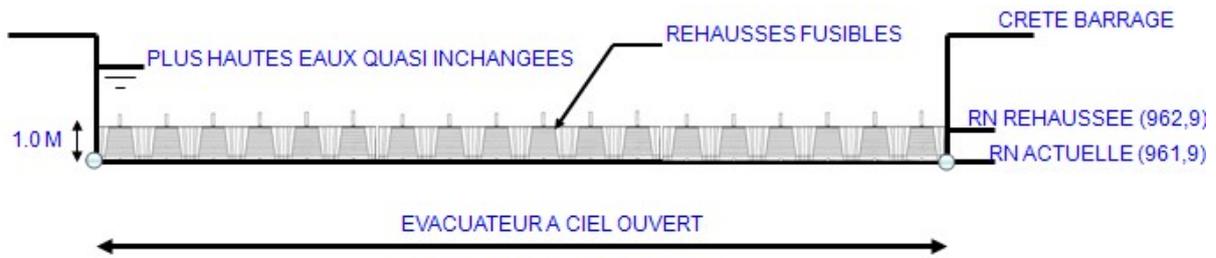


Figure VI.6 : Les hausses fusibles sur le seuil

Après le dérasement du seuil existant sur 10 cm, 48 éléments ont été posés qui occupent une tranche d'eau de 1 m du PHE (d'environ 2,1 m).

- ❖ Le premier basculement est réglé pour un débit de **220 m³/s** qui correspond au temps de retour de **80 ans** lorsque le niveau d'eau sur la crête de la hausse arrive à **0,78 m** (la lame déversante).

$$H = 1,1 \text{ m}, b = 95 \text{ m (48 hausses} \cdot 1,98)$$

$$h = 0,78 \text{ m}$$

$$h/H = 0,7 \quad \Rightarrow \quad C_d \approx 0,79 \text{ d'après la figure V.6}$$

$$Q = C_d \cdot b \cdot (2g)^{1/2} \cdot h^{3/2}$$

$$= 228,9 \text{ m}^3/\text{s}$$

Le dernier basculement qui correspond à un débit de 600 m³/s, la lame déversante atteint 0,85 m.

3.1.5 Analyses et critiques :

Accroître la capacité utile de stockage du barrage-réservoir de Foug El Gueiss sans avoir à dévaser la retenue. Permet une amélioration extrêmement significative de l'irrigation de la plaine de Remila et de l'alimentation de Kaïs. Permet la création d'un tirant d'eau permettant le dévasement.

- ✚ Permet le maintien du niveau des Plus Hautes Eaux (PHE)
 - Pas de submersion de terres hors de la zone de marnage au-delà de la cote prédéfinie dans l'aménagement initial.
 - Pas de déplacement des populations.
 - Pas de dislocation des cultures.
 - Faible impact sur l'environnement.

- ✚ Croissance de la capacité de stockage utile de 0,5 hm³
 - Sécuriser temporairement le périmètre d'irrigation des cultures de la plaine de Remila comprenant : **7493 ha**
 - Alimentation en eau potable de la ville de Kaïs.
- ✚ En évitant
 - Les impacts significatifs directs sur l'environnement.
 - Une modification des dispositions d'exploitation actuelles

Projet équivalent à la construction d'un nouveau barrage-réservoir

Stratégie de développement durable



Figure VI.7 : Le barrage Fom El Gueiss équipé par les hausses fusibles

4. Techniques des hausses fusibles pour augmenter la capacité d'évacuation :

4.1 Barrage de SHONGWENI :

4.1.1 Présentation du barrage :

Le barrage de [Shongweni](#) est un barrage poids qui a été construit pendant la période de 1923 à 1927, Le barrage est situé sur la rivière [Mlazi](#) à environ 20 km par voie de la ville de [Durban en Afrique du sud](#).

En aval du barrage se trouvent les cantons de Umlazi , Chatsworth , les développements industriels de Merebank, Merwent et Isipingo, avec [Louis Botha](#) l'aéroport international.

La longueur et la hauteur de la crête du barrage sont d'environ 250 m et 33 m comprend un déversoir d'une longueur de 126 m et une hauteur d'environ 30 m au droit de déversoir, L'évacuateur de crues est constitué d'un seuil libre.

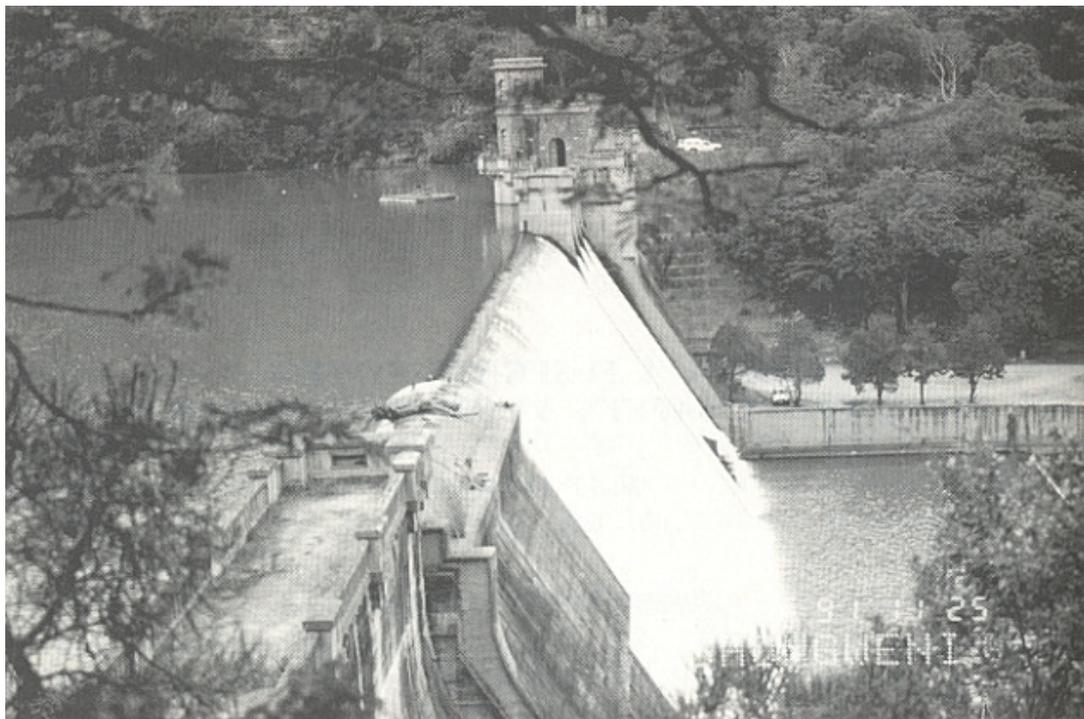


Figure VI.8 : vue du barrage de Shongweni

4.1.2 La problématique :

L'inspection de la sécurité des barrages et structures a été faite en 1988, selon les exigences des conditions et Règlement d'après [l'article 9 C](#) de la Loi de 1958 (sécurité des barrages).

Cette inspection et d'autres enquêtes et d'analyses qui ont suivi a indiqué les problèmes essentiels suivants:

- ✓ Le déversoir est seulement capable de passer environ un quart de la crue de projet.
- ✓ Le barrage deviendra instable au cours d'une grande crue.

La stratégie du propriétaire du barrage était d'abandonner l'utilisation du barrage comme une ressource d'approvisionnement en eau tout en conservant et en améliorant sa viabilité en tant que zone de loisirs et d'environnement.

4.1.3 Paramètres de conception :

4.1.3.1 Les aspects géotechniques :

Les rapports originaux du barrage ont indiqué que le barrage est fondé sur un bon gneiss granitique de qualité plus de la majeure partie du barrage. Sur la rive gauche le granit est recouvert par le grès.

Il est connu, cependant, que des injections localisées sur la rive gauche a été entrepris en 1959 pour limiter les infiltrations qui ont eu lieu suite à une crue qui dominait la section non-débordable du barrage.

Un remplissage de béton de tranchée a été fourni au niveau du talon du barrage derrière laquelle 50 mm de diamètre des tuyaux en acier ont apparemment été inséré pour des fins de drainage.

En 1989, une étude géotechnique a été entreprise pour confirmer les conditions de la fondation sous le barrage. Cinq trous de forage de 76,2 mm de diamètre ont été forés dans le substratum rocheux de 5 m à divers centres à travers le barrage. Dans les trois trous forés à partir de la galerie, des essais de pression de l'eau ont été entrepris dans la roche et l'interface béton/roche. Bien que les essais n'aient révélé aucune nécessité pour une (nouvelle) injection, elles ont indiqué l'infiltration dans la zone de contact entre le grès et le granit dans la rive gauche.

En 1992 des piézomètres ont également été installé à étendre le profil de soulèvement mesuré la pression à la rive gauche.

L'enquête a indiqué que le matériel a bien été faibles c'est pour cela il a été excavé et remplacées par une tranchée en béton.

4.1.3.2 Hydrologie :

Le barrage de Shongweni est situé dans une région où la majorité des pluies tombent entre les mois d'Octobre à Mars. L'apport moyen annuel au barrage est de 72 hm³. Le bassin versant est d'une superficie de 786 km² avec des pentes relativement fortes.

La révision de l'étude hydrologique dans 1988-1989 a conclu que la capacité d'évacuateur de crues devrait être augmentée du son originale 1400 m³/s à 5000 m³/s (PMF).

PMF : la crue maximum probable (la crue de projet)

Les débits maximaux réels sont récapitulés dans le Tableau ci-dessous :

Tableau VI.2 : le débit maximum de chaque temps de retour

La période de retour (année)	Les débits max (m ³ /s)
10	450
20	630
50	920
100	1200
PMF	5000

On remarque qu'il y a une augmentation de 350 % du débit maximum de la crue de projet.

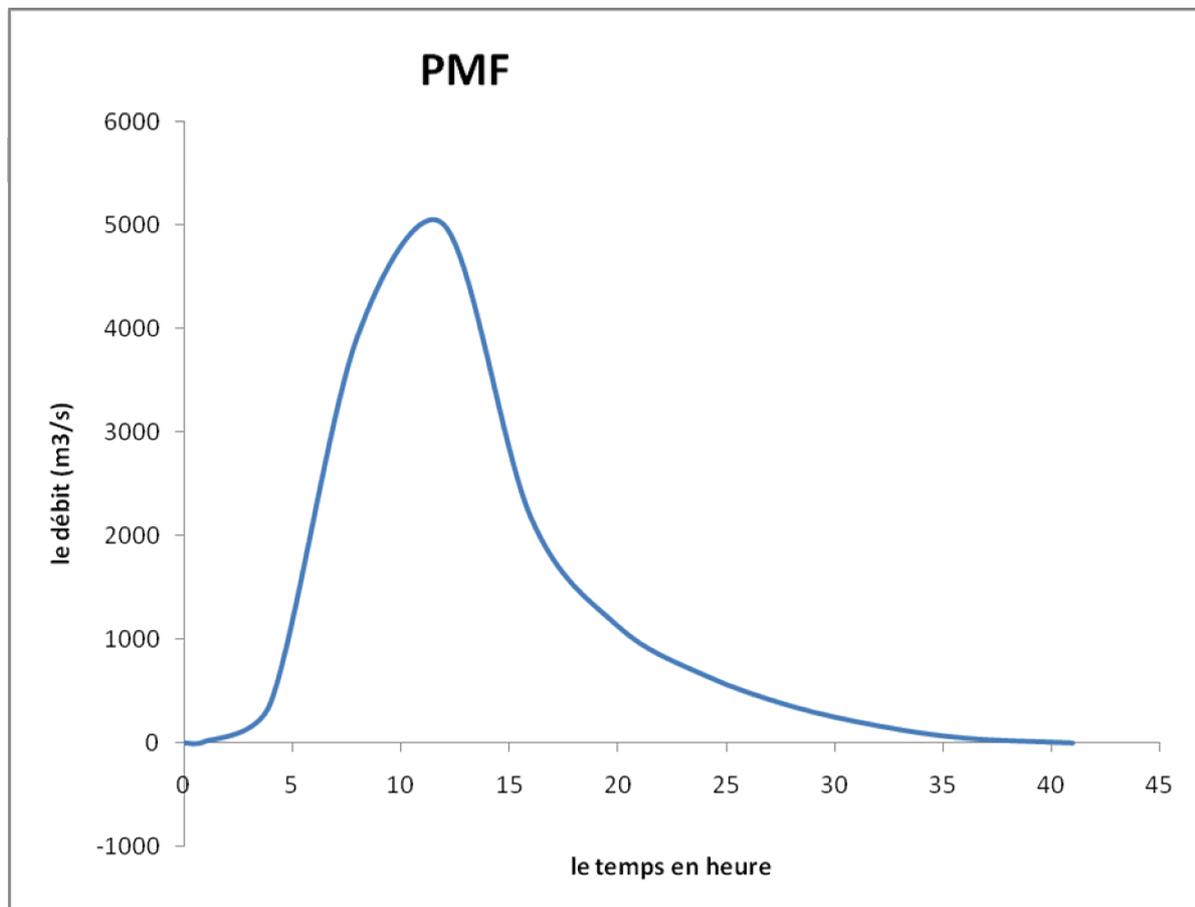


Figure VI.9 : Hydrogramme de la crue de projet (PMF)

4.1.3.3 Pression de soulèvement :

Des investigations géotechniques entreprises ont indiqué que la structure de base est relativement imperméable mais le béton ou l'interface de béton/roche est perméable à un certain degré.

Des pressions réelles de piézomètres enregistrées, un soulèvement généralisé de diagramme a été produit correspondant à plusieurs niveaux d'eau en amont, Le diagramme maximum théorique de soulèvement a été fait pour le but de déterminer le niveau maximal de sécurité.

Cette étude a été calculée au cours de laquelle les facteurs de sécurité acceptables ont été obtenus, ils ont trouvé que le niveau d'eau il ne faut pas dépasser l'altitude **301 m** (niveau maximal de sécurité), si non le barrage risque *le glissement*.

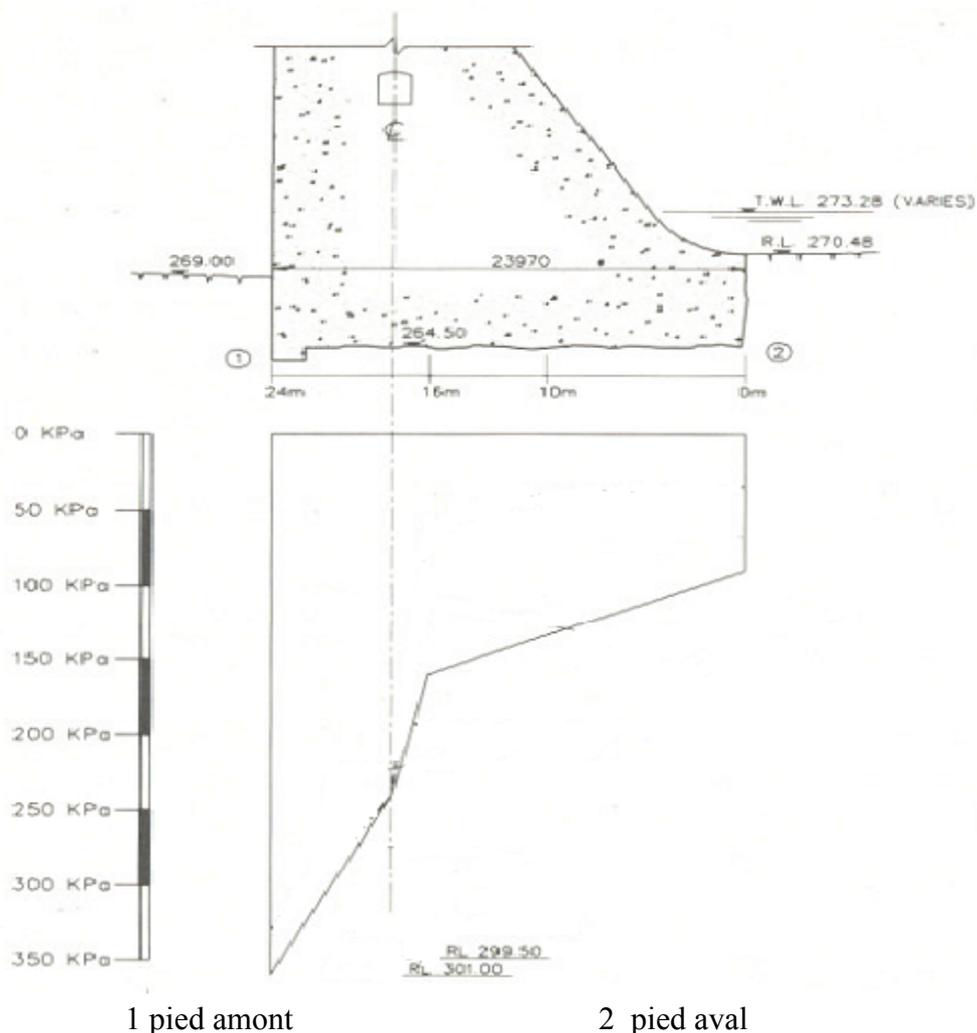


Figure VI.10 : La sous-pression

4.1.4 Approche générale :

Pendant la phase de faisabilité, une étude a été entreprise pour le renversement et le glissement ;

- ✓ Le niveau d'eau maximum (niveau maximum de sécurité) a été calculé au cours de laquelle les facteurs de sécurité ont été obtenus ;
- ✓ La crue de projet doit être passée de telle façon l'eau ne dépasse pas le niveau maximum de sécurité et ne déborde pas sur la crête du barrage ;
- ✓ Une autre considération importante et une qui a dirigé les travaux futurs, est le projet de développement du bassin du barrage, comme secteur environnemental de récréation par [La Réserve Des Ressources Et La Conduite De Faune De Shongweni](#) ;

Afin pour le développement du procédé, il a été jugé nécessaire pour toute diminution de l'évacuateur de crues à un minimum et pour les travaux de réhabilitation à cause que peu d'impact négatif sur l'environnement que possible.

Diverses options ont été étudiées pour une utilisation partielle de la crue de projet et pour répondre aux exigences du projet, c'était le dérasement du seuil de l'évacuateur de crues et l'installation des bouchures mobiles.

A cause de leurs difficultés durant l'exploitation et leur coût d'alimentation en énergie pour les manœuvres. Les vannes conventionnelles ont été exclues

Option 1 : les barrages gonflables

Même elle répond correctement aux exigences du projet, cette technique montre des faiblesses importantes, des déchirures par corps flottants sont envisageables ce qui provoque un lent affaissement du plan d'eau, il est nécessaire de prévoir le remplacement de la paroi gonflable du système tous les 25 à 30 ans de plus ils ont une hauteur généralement de 1,5 à 3 m, tout ça rend ce système peu économique.

Option 2 : les hausses fusibles

Cette technologie flexible grâce à leur simplicité de conception et l'absence de pièces mécaniques, les hausses ne demanderont qu'un entretien minimal dans le temps. Du fait qu'aucune intervention n'est requise, soit-elle mécanique ou humaine, lors de crues dangereuses, le système répond aux exigences de sécurité les plus sévères.

Le système de hausses fusibles Hydroplus comprend un certain nombre de unités de hausses fusibles indépendants qui reposent sur le rebord de l'évacuateur de crues et sont détenues en place par les seules forces de gravité, lorsqu'ils sont mis ensemble, forment un déversoir en labyrinthe qui est submergé par les crues modérées.

Il y a deux principaux critères qui doivent être satisfaits dans la conception de tout système Hydroplus, à savoir:

- Le projet suffisant sur le rebord de la large crête doit être fournie à assurer Le PMF peut être passé dans n'importe quelle contrainte imposée spatiales ou de stabilité.
- une profondeur suffisante de l'écoulement sur le déversoir doit avoir lieu afin d'assurer le succès du basculement de chaque unité.

La conception des hausses fusibles du barrage de Shongweni se base sur **trois** paramètres principaux, ces hausses fusibles doivent être capables d'évacuer la crue de projet de **5000 m³/s** en toute sécurité, le niveau d'eau ne dépasse pas le niveau maximum de sécurité qui est l'altitude **301 m** quelque soit les conditions, la conception se base sur la maximisation du niveau normal de retenue.

C'est pour cela les simulations suivantes ont été entreprises :

Pour le passage de la crue de projet de 5000 m³/s au moment de dernier basculement sur le seuil dérasé, il faut une lame déversante d'environ **8,8 m**.

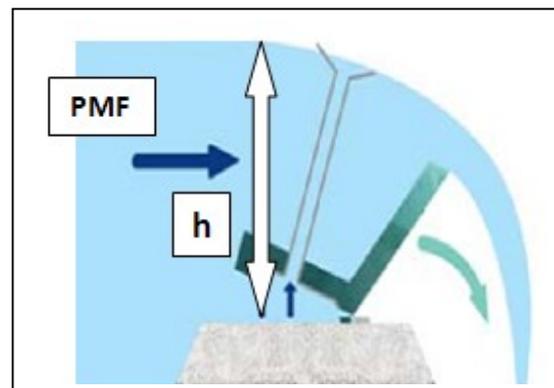


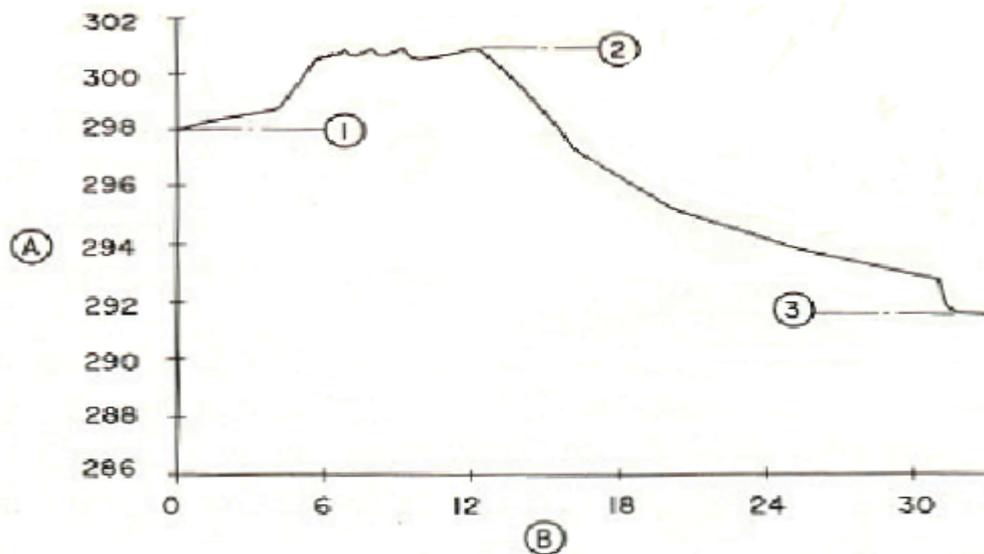
Figure VI.11 : le passage de la crue de projet (PMF)

Tableau VI.3 : Optimisation du système d'Hydroplus

Les hauteurs standards (H)	La lame déversante minimale H _d	La hauteur minimale pour le basculement (1,4 H)	La hauteur minimale pour la crue de projet	Niveau de dérasement	Nouveau niveau normal de retenue
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
9,4	3,8	13,2	8,8	287,8	297,2
7,8	3,1	10,9	8,8	290,1	297,9
6,5	2,6	9,1	8,8	291,6	298,1
5,4	2,2	7,6	8,8	292,2	297,6
4,5	1,8	6,3	8,8	292,2	296,7
3,75	1,5	5,3	8,8	292,2	295,9

On verra à partir du tableau ci-dessus que la hauteur Hydroplus, qui fournit le maximum de niveau normal de retenue est l'unité de 6,5 m de hauteur.

Après des essais sur un model réduit, cette hauteur de 6,5 m présente la solution la plus technico-économique, elle assure la sécurité soit pour le passage de la crue soit pour la stabilité du barrage.



1 : niveau normal de retenue, 298,1 m.

2 : niveau maximal de sécurité, 301 m

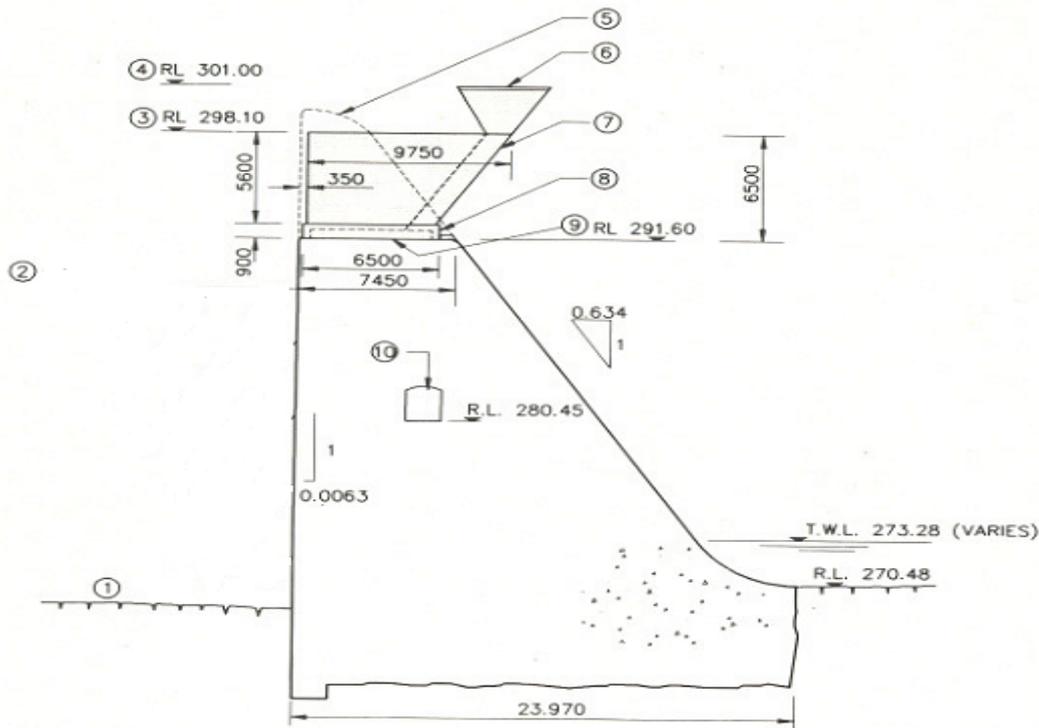
3 : déversoir à large seuil

A : niveau amont (m)

B : durée (h)

Figure VI.12: Niveau de la retenue et la durée de la crue de projet

Enfin Le seuil a été abaissé de **7,9 m** sur une longueur d'environ de 100 m où le dérasement ne présente pas d'inconvénient, il a été équipé par **10** hausses fusibles labyrinthes de type **A** de **6,5 m** d'hauteur et **9,75 m** de largeur.



- 1 : lit initial de la rivière
- 2 : l'amont du barrage (la retenue)
- 3 : nouveau niveau normale de retenue
- 4 : niveau maximal de sécurité
- 5 : Déversoir initial
- 6 : Puits de mise en pression de la chambre inférieure
- 7 : Hausse fusible par basculement
- 8 : Chambre inférieure
- 9 : Déversoir à large seuil
- 10 : Galerie de visite

Figure VI.13 : Coupe transversale de l'évacuateur de crue équipé par les hausses fusibles

Le premier basculement est réglé pour se produire pour la crue de 1600 m³/s, soit la crue de 240 ans.

10 huasses fusibles de 6,5 m d'hauteur et 9,75 m de largeur de type A :

$$H = 6,5 \text{ m}$$

$$h = 2,6 \text{ m}$$

$$\Rightarrow h/H = 0,4 \Rightarrow C_d = 0,9 \text{ d'après la figure V.6}$$

$$Q = C_d \cdot b \cdot (2g)^{1/2} \cdot h^{3/2} = 1629,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

Avec la solution adoptée le premier basculement se produit à un temps de retour de 240 ans.

La probabilité du premier basculement ne se produit pas dans des périodes perspectives certaines pour cette solution est la suivante:

Tableau VI.4 : La probabilité de ne pas arriver la crue pour le premier basculement

Periode de retour (année)	2	5	10	20	50
La probabilité de ne pas arriver dans ces périodes (%)	99,2	97,9	95,6	92,0	81,2

4.1.5 Analyse et critique :

- Cette solution qui offre le moins de réduction du NNR, La perte de niveau normal de retenue a été **1,4 m**.
- Cette option est également la solution la plus simple et plus économique.
- Un autre avantage en futur pour les promoteurs du bassin est la petite distance entre le niveau maximal de sécurité et NNR (**2,9 m**) qui permet une utilisation maximale pour la zone riveraine.



Figure VI.14 : Le barrage de Shongweni équipé par les hausses

❖ Le 25 décembre 1995, le barrage de Shongweni a connu une crue exceptionnelle (d'ordre de la crue de 100 ans) avec un débit estimé d'environ $1000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Cette crue a été évacuée sans que n'importe quelle hausse n'ait été inclinée comme prévue.

Les hausses ont été inspectées après cette crue et aucun dommage n'a été trouvé.

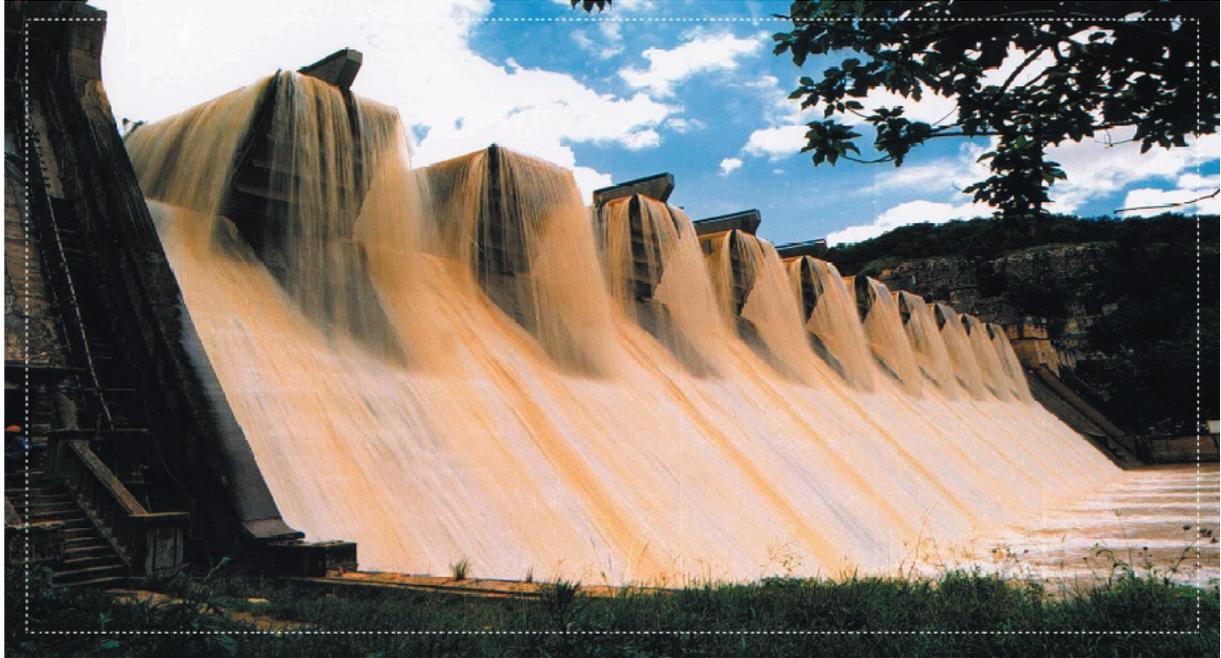


Figure VI.15 : La crue de 25 décembre 1995 sur le barrage de Shongweni

Conclusion générale :

Le renforcement de la capacité d'évacuateurs de crues constitue une solution très efficace pour augmenter la capacité de stockage des barrages et/ou du déversoir.

Cette solution permet d'augmenter la sécurité de déversement d'une retenue face aux conditions normales d'exploitation et face aux crues exceptionnelles, de stocker d'avantage de l'eau, de bien gérer le dévasement et d'améliorer la sécurité du barrage.

Le renforcement d'évacuateur se présente comme une solution très performante pour la fiabilité de gestion d'un barrage, notamment pour la lutte contre l'envasement par la surélévation de la crête de l'évacuateur de crue, récupérant partiellement la tranche d'eau exceptionnelle pour satisfaire, améliorer ou augmenter les besoins en eau, soit pour l'irrigation, soit pour l'alimentation en eau potable.

En conclusion, on peut voir parmi les techniques de renforcement que les hausses fusibles constituent une méthode économique, simple, sûre, et plus sécurisée par rapport aux systèmes conventionnels (clapet, vannes segment et secteur, boudins gonflables) pour augmenter la capacité de stockage des barrages et améliorer la capacité de déversement d'un évacuateur. L'un de leur avantage est qu'elles ne fonctionnent que sous l'action de l'eau et ne nécessitent ainsi aucun asservissement ni intervention humaine.

Bibliographie

André Musy (1998) « HYDROLOGIE APPLIQUEE »

Jean-Maurice DURAN « TECHNIQUES DES PETITS BARRAGES EN AFRIQUE SAHELIENNE ET EQUATORIAL ».

Ministère de l'agriculture, Direction de l'aménagement (1974) « TECHNIQUE DES BARRAGES EN AMENAGEMENT RURAL ».

Gérard Degoutte, ENGRF-Paul Royet, CEMAGREF (1993) « SECURITE DES BARRAGES EN SERVICE ».

Agence Nationale des Barrages et des Transferts « MONOGRAPHIE DES GRANDS BARRAGES »

Sari Ahmed (2002) « INITIATION A L'HYDROLOGIE DE SURFACE »

Voies Navigables De France, Sous la direction de centre d'études techniques maritimes et fluviales (1998) « LES BARRAGES MOBILES DE NAVIGATION »

Remini.B « LA PROBLEMATIQUE DE L'EAU EN ALGERIE DU NORD »

Dix-huitième Congrès des Grands Barrages Durban, (1994) « L'UTILISATION DU SYSTEME DES HAUSSES FUSIBLES POUR AMELIORER LA SECURITE DU BARRAGE DE SHONGWENI »

Hydroplus (2004) « BARRAGE DE FOUM EL GUEISS EQUIPE PAR DES HAUSSES FUSIBLES »

Benouniche, N. (2006). « ETUDE DES HAUSSES FUSIBLES SUR UN DEVERSOIR », thèse d'ingénieur d'état en hydraulique de l'ENP (Alger).

Chekiane K, Merazka.R (1998) « ETUDE ET CONCEPTION DU BARRAGE DE TAOURIRA SUR L'OUED MESSELMOUN », thèse d'ingénieur d'état en hydraulique de l'ENP (Alger).