



Faculté de Technologie
Département d'Hydraulique

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par :

- KRIMAT Bouhafs
- ALLOUANE Seifeddine

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER en Hydraulique**

Option : **OUVRAGES ET AMENAGEMENT HYDRAULIQUE**

INTITULE :

MODELISATION PAR MODELE REDUIT DE BARRAGE EL HAIMEUR (GHARDAIA) EN CAS DE RUPTURE ET L'IMPACT SUR LA VILLE

Soutenu le 02 /07/2017 devant le jury composé de :

- Président : Mr. **BENZERRA.A**
- Promoteur (s) : Mr. **HADDAD.S**
- Examineur (s) : Mr. **MERRAH**

Remerciements

« Tout d'abord Je remercie Dieu tout puissant qui m'a donné le courage, la volonté et la patience pour achever ce travail.

Je remercie en second mes parents, qui ont sacrifiés leur vie pour notre bien.

*En fin, j'adresse mes sincères remerciements, reconnaissances et gratitudes à tous mes enseignants, et en particulier notre cher encadreur, le directeur de ce mémoire **Monsieur HADDAD.S** pour ses précieux conseils, et sa disponibilité.*

Je tiens aussi à remercier également le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner mon travail. »

LISTE DES SYMBOLES

Symbole	Signification	Unité
B_{ave}	Largeur moyenne de la brèche	M
B_b	Largeur de base inférieure de la brèche	M
B_{top}	Largeur de base supérieure de la brèche	M
d	Profondeur de la brèche	M
F_i	La force d'inertie	N
$F_{pesanteur}$	La force de pesanteur	N
$F_{viscosité}$	La force de viscosité	N
Fr	Le nombre de Froude	/
g	Gravité	m/s^2
H	La hauteur du barrage	M
H_b	La hauteur de la brèche	M
K_0	constant	/
K_a	L'échelle d'accélération	/
K_h	L'échelle des hauteurs	/
K_L	L'échelle de longueur	/
K_l	L'échelle de largeur	/
K_m	L'échelle de masse	/
K_η	L'échelle de rugosité	/
K_μ	L'échelle de viscosité dynamique	/
K_v	L'échelle de viscosité cinématique	/

K_I	L'échelle de pente	/
K_ρ	L'échelle de masse volumique	/
K_Q	L'échelle de débit	/
K_S	L'échelle de surface	/
K_T	L'échelle du temps	/
K_V	L'échelle de vitesse	/
K_{vol}	L'échelle de volume	/
L	Longueur	M
l	Largeur	M
Q_{max}	Débit maximale	m^3/s
Q_p	Débit de pointe	m^3/s
Re	Nombre de Reynolds	/
T	Le temps	S
t_f	Le temps de formation de la brèche	H
V	Le volume	m^3
V_w	Volume de réservoir	m^3
v	La vitesse	m/s
Δ	Coefficient de distorsion	/

LISTE DES FIGURES

Figure-I- 1: Vue en plan d'un modèle de cours d'eau	14
Figure-II- 1: Barrage poids en béton.....	22
Figure-II- 2: Barrage poids à contreforts	22
Figure-II- 3: Barrage en voûte.	23
Figure-II- 4: Barrage de Roselend (photo h. Barthélémy).	24
Figure-II- 5: Barrage homogène	24
Figure-II- 6: Barrage à noyau étanche	25
Figure-II- 7: Barrage à masque amont.....	26
Figure-II- 8: Historique des ruptures de barrages	29
Figure-II- 9: Barrage de Fergoug, première rupture en 1881.....	31
Figure-II- 10: Le barrage de Fergoug après la catastrophe de 1927	31
Figure-II- 11: Rupture par renard	34
Figure-II- 12: Rupture par surverse	35
Figure III- 1: Localisation du barrage EL HAIMEUR	44
Figure III- 2: EL HAIMEUR-Crue 1:100 Durée d'immersion en fonction de la cote du plan d'eau...49	
Figure III- 3: la digue d'El Haimour	52
Figure III- 4: vue en plan de la digue El Haimour	53
Figure III- 5: profile en long suivant l'axe de la digue.....	53
Figure III- 6: profil type de la digue El Haimour.....	54
Figure III- 7: les paramètres de la brèche	56
Figure IV- 1 : Schéma technique du modèle de corps du barrage.....	60
Figure IV- 2 : Photo de modèle réduit de corps du barrage	61
Figure IV- 3 : Schéma descriptif de modèle réduit	62
Figure IV- 4 : Schéma descriptif de la mesure de vitesse de l'eau.....	64
Figure IV- 5 : Schéma descriptif de la mesure de la hauteur de l'eau.....	65
Figure IV- 6 : Barre en acier de 50 cm de hauteur	65
Figure IV- 7 : Critère de dommage des bâtiments en brique et en maçonnerie (basé sur Clausen et Clark 1990).....	66

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I- 1 :Variation de l'échelle donnée dans la nature.....	8
Tableau I- 2 : Quelques caractéristiques de plâtre.	12
Tableau-II- 1 : Pertes humaines et matérielles majeures aux 19ème et 20ème siècles.....	29
Tableau-III- 1 : Les coordonnées du site et la superficie du bassin versant	45
Tableau-III- 2 : Crues de diverses fréquences du barrage El Haimeur.....	46
Tableau-III- 3 :Apports solides au site du barrage El Haimeur.....	47
Tableau-III- 4 :Crue 1:100 El Haimeur – niveau max du plan d'eau en fonction de la cote de calage de la VF.....	48
Tableau-III- 5 :Situation en cas d'obstruction de la vidange de fond	48
Tableau-III- 6 :Calage retenu pour la vidange de fond et le seuil de l'évacuateur de crues	48
Tableau-III- 7 :Crue centennale – caractéristiques de la montée et la descente du plan d'eau.....	49
Tableau-III- 8 :El Haimeur - Résultats du laminage de la crue 1:10.000	50
Tableau-III- 9 :El Haimeur - Résultats du laminage de la crue 1:10.000.....	50
Tableau-III- 10 :Résultats du laminage de la crue 1:1.000.....	51
Tableau-III- 11 :Dimensions de la digue d'El Haimeur	51
Tableau-III- 12 :Dimensions du réservoir et de la partie aval du barrage	51
Tableau-III- 13 :Résumé des paramètres de la brèche du barrage.....	55
Tableau-III- 14 :Rapports d'échelle pour le modèle.....	56
Tableau-III- 15 : Valeurs des caractéristiques de modèle et de prototype.....	57

Sommaire

Introduction Générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre I : Généralités sur les modèles réduits

I.1. Introduction.....	4
I.2. Similitude Hydraulique.....	4
I.2.1. Loi de similitude mécanique.....	4
I.2.1.1. Similitude des écoulements à surface libre (non distordue).....	4
I.2.1.2. La similitude de Reynolds et celle de Froude	5
I.3. Modèle réduit.....	7
I.3.1. Définition	7
I.3.2. Principales caractéristiques des modèles réduits.....	7
I.3.2.1. Echelles et rapport de distorsion.....	7
I.3.2.2. Emprise conditions aux limites.....	8
I.3.3. Les matériaux utilisés dans les modèles.....	9
I.3.3.1. Caractéristiques générales des matériaux pour modèles.....	9
I.3.3.2. Quelques matériaux utilisable	9
I.3.4. Notions sur la construction des modèles et l'exécution des essais.....	14
I.3.4.1. Construction et équipement.....	14
I.3.4.2. Exécution des essais.....	17
I.4. Conclusion.....	18

Chapitre II : Barrages et ruptures

II.1. Introduction.....	20
II.2. Les barrages	20
II.2.1. Définitions	20
II.2.2 Types des barrages	21
II.2.2.1. Les barrages rigides	21
II.2.2.2. Les barrages souples	24
II.2.3. Rôles des barrages.....	26
II.2.3.1. L'irrigation	27
II.2.3.2. Hydro-électricité	27
II.2.3.3. Distribution d'eau pour usage domestiques et industriels	27
II.2.3.4. Navigation fluviale	27
II.2.3.5. Contrôle des crues.....	28
II.3. Rupture des barrages	28
II.3.1. Les cause de rupture	31
II.3.2. Modalités de rupture	32
II.3.2.1. Rupture instantané ou graduelle.....	32
II.3.2.2. Rupture par renard	33
II.3.2.3. Rupture par glissement.....	34
II.3.2.4. Rupture par surverse.....	34

II.3.2.5. Rupture des petites barrages d'accumulation.....	35
II.3.3. Choix des scénarios de rupture	36
II.3.4. Modélisation de la rupture.....	37
II.3.4.1. Initiation de la crue de rupture à l'ouvrage.....	37
II.3.4.2. Prévion de paramètre de la brèche.....	38
II.3.5. Prévion de la propagation de la crue de rupture	41
II.4. Conclusion.....	42

Chapitre III : Présentation du site et Dimensionnement de modèle

III.1. Présentation du site	44
III.1.1. L'accès au site de l'ouvrage.....	44
III.1.2. Topographie du site	44
III.1.2.1. Bassins versants	45
III.1.2.2. Cuvettes	45
III.1.2.3. Description du site	45
III.1.3. Hydrologie	46
III.1.3.1. Crues	46
III.1.3.2. Apports solides	46
III.1.3.3. Résultats du laminage des crues.....	47
III.2. Dimensionnement du modèle.....	51
III.2.1. Description de l'ouvrage.....	51
III.2.2. Dimensions du prototype.....	51
III.2.3. Définitions des Paramètre de la brèche	55
III.2.3.1. Calcul de la largeur moyenne de la brèche.....	55
III.2.3.2. Définition de la hauteur de la brèche.....	55
III.2.3.3. Définitions du temps de rupture.....	55
III.2.4. Calculs des dimensions du modèle réduit.....	56

Chapitre IV : Construction du modèle

IV.1. Introduction	59
IV.2. But de travail.....	59
IV.3. Plan de travail	59
IV.4. Les matériaux de construction	59
IV.5. La mise en place du modèle.....	60
IV.5.1. Le corps du barrage.....	60
IV.5.2. Le réservoir et le cours d'eau (l'amont et l'aval du barrage)	62
IV.6. Les essais et mesures	63
IV.6.1. Déroulement des essais	63
IV.6.2. Mesure de la vitesse de l'eau.....	64
IV.6.3. Mesure de la hauteur d'eau.....	65
IV.7. CONCLUSION.....	66

CONCLUSION GENERALE..... 68

Bibliographie et références.....	69
----------------------------------	----

Résumé

Introduction général :

Les digues et barrages en terre ont de tous temps été utilisés par l'homme, et participent aujourd'hui très largement à la dynamique des territoires, que ce soit pour la gestion des ressources en eau (barrages réservoirs, digues de canaux d'irrigations) ou pour la protection contre les inondations (barrages écrêteurs, digues de protection).

Alors que beaucoup de ces ouvrages sont aujourd'hui vieillissants, gestionnaires et scientifiques manifestent un intérêt croissant pour une meilleure compréhension des mécanismes de rupture, mais aussi pour des outils de modélisation et de prédiction.

En effet l'intérêt n'est pas des moindres et quelques chiffres peuvent suffire pour s'en convaincre : 90% des barrages existants de moins de 30 m sont en remblai et ces derniers seraient responsables à ce jour de 60 % des victimes par rupture (Brivois, 2001). Les digues ne sont pas en reste puisque Singh (Singh, 1996) rappelle que, en Chine, 98.3 % des ruptures sont le fait d'ouvrages en terre, dont 80% (sur presque 87000 ouvrages) sont des digues.

De nombreux scientifiques se sont déjà intéressés au problème de rupture de barrage en se focalisant principalement sur les aspects hydrodynamiques, et en négligeant les autres aspects éventuels comme par exemple la déformation de la géométrie du lit.

Un modèle réduit est un système qui peut être utilisée pour prédire les caractéristiques d'un système semblable, ou prototype, souvent plus compliqué ou construit à une échelle beaucoup plus grande. Ils peuvent être du type distordus ou non distordus selon que les échelles dans le plan horizontal et le plan vertical sont différentes ou identiques. Une autre classification des modèles réduits distingue les modèles à lit fixe et à lit mobile.

Une connaissance des lois régissant les phénomènes étudiés est indispensable pour que les résultats de l'étude sur modèle soient d'une précision acceptable. Toutefois, l'utilisation des modèles réduits pour l'étude dans les conditions de laboratoire de problèmes d'ouvrages hydrauliques nécessite une compréhension claire et précise des principes de similitudes : Géométrique, Cinématique et Dynamique.

Dans le cadre de notre projet de fin d'études : «Modélisation par modèle réduit d'un barrage en cas de rupture » nous irons construire un modèle réduit pour le barrage d'EL HAIMEUR (GHARDAIA) dans le but de :

- L'évaluation des dégâts et les enjeux humains et urbains causés par la rupture en aval du barrage.

Nous avons structuré notre travail suivant le plan méthodologique ci-dessous :

- Chapitre I : Généralités sur les modèles réduits
- Chapitre II : Barrages et rupture
- Chapitre III : Présentation du site et dimensionnement du modèle réduit.
- Chapitre IV : Construction du modèle réduit

I.1 Introduction

Il est assez évident que l'analyse mathématique seule est insuffisante pour résoudre tous les problèmes que l'on peut rencontrer, en mécanique des fluides comme en bien d'autres domaines, et cela malgré les progrès énormes réalisés ces dernières années aussi bien dans le domaine de l'analyse numérique que dans celui des moyens de calcul (ordinateurs de grandes performances)

Dans ces Conditions, l'expérimentation reste encore bien souvent la façon la plus sûre, la plus rapide et la moins onéreuse pour résoudre un problème donné. Ce recours à l'expérience n'est pas inutile lorsqu'une solution théorique a été obtenue, ne serait-ce que pour en vérifier la validité, notamment au niveau des hypothèses.

D'autre part, dès que le problème présente quelque complexité, il est certain que le choix judicieux des paramètres, l'analyse de la façon dont ils interviennent sont autant d'éléments qui, aussi bien dans l'étude théorique que dans l'exploitation des résultats expérimentaux, sont essentiels.

Pour satisfaire à ces deux nécessités, étude ou vérification expérimentale, choix de la formulation la plus rationnelle, la théorie de la similitude.

I.2 Similitude hydraulique

I.2.1 lois de similitude mécanique

En hydraulique, l'expérimentation joue un rôle de premier plan. Mais l'expérimentation en vraie grandeur est souvent délicate et difficile. Très souvent, on est obligé de passer au modèle réduit qui est d'un prix plus faible, facilite les mesures. Mais comment passer du modèle, au prototype, En effet, les lois de la similitude mécanique supposent la réalisation de la similitude géométrique, cinématique et dynamique. Par définition

« Deux écoulements sont semblables (similaires) s'ils ont lieu à l'intérieur de limites géométriques semblables et si les trajectoires des particules homologues sont géométriquement semblables ».

I.2.1.1 Similitude des écoulements à surface libre (non distordue)

Pour tout système, les résultats des mesures expérimentales sur le modèle ne sont transposables au prototype que si les données définissant les problèmes posés satisfont à un certain nombre de relations. Ce sont les conditions de similitude mécanique :

On distinguera les similitudes

- géométrique
- cinématique
- dynamique

- Similitude géométrique

Le rapport de toutes les dimensions du prototype et du modèle doit être constant :

$$K_L = \frac{L(\text{prototype})}{L(\text{modèle})} = \text{constante}$$

L est l'échelle de longueur.

Par la suite, on notera avec l'indice 1 ce qui se rapporte à la nature et avec l'indice 2 ce qui se rapporte au modèle.

- Similitude cinématique

Le rapport des accélérations doit être constant en tous les points correspondants des deux écoulements (nature et modèle) :

$$K_T = \frac{T_1}{T_2} = \text{constante}$$

$$K_V = \frac{K_L}{K_T} \Rightarrow K_a = \frac{K_V}{K_T} = \frac{K_L}{K_T^2}$$

- Similitude dynamique

Le rapport des forces appliquées à des éléments homologues doit être constant quelles que soient les forces homologues considérées.

1.2.1.2 La similitude de Reynolds et celle de Froude

Par ailleurs, deux lois de similitudes sont très importantes, la similitude de Reynolds et celle de Froude :

- Similitude de Froude :

Elle exprime le rapport des forces d'inertie aux forces de pesanteur. On suppose alors que celles-ci sont prépondérantes. Elle s'applique bien aux écoulements à surface libre. Elle se

traduit par, $\vec{F}_{\text{inertie}} = \vec{F}_{\text{pesanteur}}$

Soit : $m_a = m_g$. Or $K_a = \frac{K_L}{K_T^2}$ et $g = 1$.

On a donc :

$$\frac{K_L}{K_T^2} = \frac{K_L^2}{K_T^2} \frac{1}{K_L} = \frac{K_V^2}{K_L}$$

La similitude de Froude se traduit donc par :

$$K_V = \sqrt{K_L}$$

Remarque :

Ceci revient à écrire $F_r = 1$ où $F_r = \frac{V}{\sqrt{gh}}$ nombre de Froude (rapport des forces d'inertie aux forces de pesanteur)

- Similitude de Reynolds

Elle exprime le rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité. On suppose alors que celles-ci sont prépondérantes. Elle s'applique bien aux écoulements en charge.

Elle se traduit par :

$$K_{F_{inertie}} = K_{F_{viscosite}}, \text{ soit } K_m \cdot K_a = K_S \cdot K_\mu \cdot K_V / K_L$$

$$\Rightarrow K_\rho \cdot K_{vol} \cdot K_V / K_T = K_S \cdot K_\rho \cdot K_\nu \cdot K_V / K_L$$

$$\Rightarrow K_L^3 \cdot K_V / K_T = K_L^2 \cdot K_\nu \cdot K_V / K_L$$

Finalement, la similitude de Reynolds s'exprime par

$$\frac{K_V K_L}{K_\nu} = 1$$

Remarque :

Ceci revient à écrire $R_e = 1$ où $R_e = \frac{VL}{\nu}$ nombre de Reynolds (rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité).

- Incompatibilité des similitudes de Froude et de Reynolds

La similitude parfaite implique le respect des conditions de similitude de Froude et de Reynolds :

$$K_{F_r} = K_{R_e} = 1 \Rightarrow \frac{KV}{\sqrt{K_L}} = \frac{K_V K_L}{K_\nu}; \text{ soit } K_L^{-3/2} = K_\nu$$

La plupart du temps, on utilise le même fluide pour le modèle que dans la réalité. Ceci implique $L=1$, c'est-à-dire un modèle de la même taille que le prototype ...On ne peut donc pas satisfaire simultanément les deux conditions de similitude.

Pour la plupart des modèles d'écoulement à surface libre, et si on peut négliger les forces de viscosité, il est possible de ne respecter que la similitude de Froude. Il faut cependant veiller à ce que le prototype et le modèle soient dans le même régime d'écoulement, et à ce que les coefficients de rugosité relative soient les mêmes.

Remarque : si deux systèmes sont géométriquement et dynamiquement semblables, ils sont aussi cinématiquement semblables.

I.3 Model réduit

I.3.1 Définition

Un modèle réduit est un système qui peut être utilisée pour prédire les caractéristiques d'un système semblable, ou prototype, souvent plus compliqué ou construit à une échelle beaucoup plus grande. Les modèles réduits peuvent être du type distordus ou non distordus selon que les échelles dans le plan horizontal et le plan vertical sont différentes ou identiques.

Une autre classification des modèles réduits distingue les modèles à lit fixe et à lit mobile.

I.3.2 Principales caractéristiques des modèles réduits

I.3.2.1 Echelle et rapport de distorsion

Les prix de construction d'un modèle croit avec le surface de celui-ci ; en admettant en première approximation que le prix est proportionnel à la surface, il vari proportionnellement au carré de l'échelle adopté pour les longueurs en plan. Les dépenses d'exploitation croissent également avec l'échelle.

On s'efforce donc de réaliser les modèles à la plus petite échelle possible, compatible avec la précision des appareils de mesure et l'influence des effets d'échelle.

Il est possible de réduire l'échelle en plan en réalisant un modèle distordu en hauteur ; de cette façon, on augmente les variations de niveau qui, sur le modèle, correspondant à une variation de hauteur donnée dans la nature (voir le tableau I- 1).

Toutefois, l'adoption de coefficient de distorsion élevée présente les inconvénients suivants :

- L'étalonnage du modèle est plus difficile à réaliser (du fait de la rugosité artificielle importante à mettre en place, laquelle doit être déterminé empiriquement).
- Les talus des matériaux, dans le cas du fond mobile, sont trop raides et leur stabilité peut n'être plus assurée.
- Les courants transversaux ne sont pas reproduits en similitude.

Domain	Projet	L'échelle
1-travaux maritimes	ports maritimes, études relatives à la houle	1 :100 à 1 :200
	profils de jetée	1 :10 à 1 :25
	estuaires à marée	1 :10 à 1 :1000
2- aménagements de rivière	protection local contre les crues d'une rivière	1 :100 à 1 :200
	ouvrages de navigation intérieure – écluses	1 :20 à 1 :30
3-Aménagements Hydroélectriques	prises d'eau (modèles à fond mobiles)	1 :50 à 1 :100
	Profils de radier de barrage	1 :10 à 1 :100
	évacuateurs de crues	1 :50 à 1 :100
	Barrage	1 :50 à 1 :200 1/40 et 1/60 (2)

Tableau I- 1 :Variation de l'échelle donnée dans la nature [1]

1.3.2.2 Emprise conditions aux limites

Le choix de l'emprise d'un modèle ; c'est à dire de l'étendue de la région représentée, est liée à celui de la réalisation des conditions aux limites.

L'emprise doit être aussi restreinte que possible pour réduire le prix de la construction du modèle, mais elle doit être suffisamment grande pour que les conditions aux limites puissent être représentée de façon satisfaisante.

Le choix des limites, est en général, commandé par les deux conditions principales suivantes :

- Les limites doivent être suffisamment éloignées de la région dans laquelle des modifications sont apportés au site étudié par la mise en place des ouvrages (comme la construction d'un barrage), pour que ces modifications ne perturbent pas la condition aux limites réalisé ; sinon, on serait conduit à réaliser une condition aux limites particulière à chaque structure d'ouvrage
- Les conditions aux limites choisis doivent donner une représentation fidèle des phénomènes avec des installations aussi économiques que possible.

I.3.3 Les matériaux utilisés dans les modèles

I.3.3.1 Caractéristiques générales des matériaux pour modèles

En fonction des considérations émises précédemment, il est possible de faire le choix du matériau le plus adéquat à un essai déterminé. Ce matériau doit répondre à un très grand nombre de conditions parmi lesquelles nous retiendrons :

- Même coefficient de poisson que celui de prototype.
- Comportement rhéologique semblable à celui du prototype.
- Coefficient d'élasticité ou de déformation suffisamment réduit pour que les déformations soient mesurées avec précision.
- Dans certaines expériences, poids spécifiques suffisant.
- On peut qualifier les conditions qui précèdent de nécessaires. Pour que le modèle soit pratiquement réalisable il est souhaitable que :
- La structure du modèle se constitue rapidement pour réduire le plus possible la période de temps compris entre la fabrication et l'essai proprement dit.
- Les caractéristiques du matériau dépendent peu des conditions climatiques du local d'essai (sauf si celui-ci est parfaitement climatisé).
- L'élaboration du modèle soit facile.
- Le modèle soit aussi peu que possible soumis à des contraintes initiales.
- La matière soit aisément travaillable.
- Les appareils de mesure puissent s'adapter sans artifice spécial.
- L'application des sollicitations ne donne pas lieu à des dispositifs incommodes.
- Le modèle et son expérimentation soient économiques.

I.3.3.2 Quelques matériaux utilisables

On examine ici quelques-uns des matériaux répondant aux conditions précédentes pour réaliser des modèles de structure :

I.3.3.2.1 Le caoutchouc

Une des premières matières auxquelles on ait songé pour la réalisation des modèles élastiques est le caoutchouc. Son élasticité et son bas module en sont évidemment la raison.

On rappelle de quelques propriétés de cette matière :

- Origine : naturelle ou synthétique.
- Couleur : opaque.
- Module d'élasticité : 150 à 250 bar.
- Coefficient de poisson égal à 0.5 environ.

- Rupture en traction : 200 à 300 bar.
- Allongement de rupture : 200 à 1000 %.
- Rupture en compression : 700 bar.
- Température de ramollissement : 70 à 80 (0C).
- Dilatation thermique : 17 à 22 (10-5 0C-1).

Il y a cependant de très sérieuses entraves à l'utilisation de ce matériau.

La première est son anisotropie naturelle : aux essais relatifs au Boulder Dam, on a déterminé des coefficients d'élasticités assez différents dans trois directions perpendiculaires.

Il en résulte une mauvaise similitude vis-à-vis du béton, et des difficultés, non insurmontable s'il est vrai, pour déterminer les tensions à partir des mesures de déformation.

Un second désavantage est l'importance du coefficient de poisson qui est loin de la valeur idéale.

En fin un inconvénient d'ordre pratique cette foie est due à la fabrication du caoutchouc qui est fourni en plaque préalablement vulcanisées. Ces plaques doivent être collées au moyen d'un solvant pour réaliser un modèle à trois dimensions. Il en résulte une anisotropie complémentaire.

Ces plaques se laissent aisément découper pour réaliser n'importe quel profil .on en enlève généralement « la peau » en évitant l'échauffement en cours d'opération.

REMARQUE

Pour la construction des modèles ou les forces de gravité interviennent, on peut charger le caoutchouc de baryte ou de litharge en vue d'en augmenter le poids spécifique.

I.3.3.2.2 Les matières plastiques

Sous le générique de plastique, on comprend diverses matières obtenues par synthèse chimique .leur seule caractéristique commune semble bien être le fait que ce sont des composés du carbone rendus rigides par polymérisation sous l'action de la température ou de la pression .on peut citer par ordre chronologique d'apparition sur le marché :

- Les celluloïds
- Les bakélites
- Le méthacrylate de méthyle
- Les polyéthylènes
- Les résines de polyester
- Les résines polyamides
- Les résines époxydes

La plupart de ces matières sont aisément travail ables, possède un bas module

d'élasticité, une bonne isotropie, une faible fragilité qui les rendent aptes à la construction des modèles.

Quelques remarques s'imposent cependant au sujet des propriétés mécaniques. Les plastiques sont des matériaux viscoélastiques : le facteur temps possède sur certains d'entre-eux une influence importante.

Les expressions de la théorie classique de la similitude en domaine élastique sont cependant applicables aux matières à coefficient d'élasticité suffisamment élevé, à condition d'appliquer rapidement les charges et de lire les déformations immédiatement.

Il est permis de répéter les essais, mais il faut attendre un temps suffisamment long pour que les déformations visqueuses aient complètement disparu.

Même si la mise en charge et les lectures des appareils prennent un certain temps, il est encore possible d'appliquer la théorie de la similitude élastique si on note le temps au cours des essais et si le matériau peut être considéré comme ayant un « module instantané ».

En première approximation, les plastiques peuvent être considéré comme homogène et isotropes. Cependant, si le modèle est construit par empilage de tranche il peut être indispensable de définir trois modules d'élasticité dans trois directions orthogonales.

REMARQUE

La température a une influence considérable sur les propriétés mécaniques de toutes les matières plastiques : quand la température croît, les macromolécules commencent à se dépolymériser et la matière devient plus flexible. L'inverse se produit lors d'un abaissement de température.

Les inconvénients d'inélasticité, de retrait, de réaction exothermique et de susceptibilité à la température sont considérablement réduits en chargeant les résines synthétiques en vue d'en constituer d'authentique mortiers.

Un mélange fréquemment réalisé est celui de résine et de sable qui a pour résultat d'accroître le module d'élasticité.

Une charge réalisée par des grains de liège ajoutés avant la polymérisation permet d'abaisser le coefficient de Poisson et le module élastique de la résine.

1.3.3.2.3 Les mortiers de plâtre

Les modèles en mortier de plâtre sont très adaptés à l'étude des structures tridimensionnelle telles que les barrages : l'intervalle des déformations élastique de ces matériaux est sensiblement plus large que celui des bétons surtout en extension et leur rigidité beaucoup plus faible permet la réalisation de modèle d'échelle relativement réduite. (comme cité dans le tableau ci-dessous Tableau I- 2)

Nature des produits	Tenseurs	Caractéristiques
	(g)	mécaniques
Epikote 828 Sable fin Durcisseur résamide	95 225 50	E=55000 bar V=0.35
Epikote 828 Sable fin Durcisseur résamide	100 600 60	E=110000 bar V=0.237
Epikote 828 Sable fin Durcisseur résamide	100 600 140	E=80000 bar V=0.287
Epikote 828 Sable fin Durcisseur résamide	100 100 65	E=120000 bar V=0.205

Tableau I- 2 : Quelques caractéristiques de plâtre. [1]

Les plus grands avantages que présentent ces matériaux sont la facilité avec laquelle on peut mouler les modèles quelle que soit leur forme, et leur bas prix.

Le plâtre et les mélanges plâtre-kieselguhr sont en général utilisés avec des dosages d'eau qui leur donnent une consistance à peu près liquide.

Après l'addition de l'eau, on doit forcer le matériau à travers un crible afin de déduire les granulats qui tendent à former. Dans un pourcentage d'environ 0.5 par rapport au poids du plâtre.

Les modèles peuvent être en métal s'il s'agit de formes simple ou en bois ; les surfaces des moules en bois doivent être imperméabilisées avant le moulage au moyen de gomme laque ou de paraffine.

Le module d'élasticité de ces matériaux qui est à peu près le même en traction qu'en compression peut varier entre des limites très écartées d'après la quantité d'eau de gâchage et

la teneur en eau lors de leur utilisation. Plus cette teneur est faible, plus le module d'élasticité et l'extension limite de proportionnalité sont élevés et moins le fluage est accentué. Dans le cas de pièces d'épaisseur appréciable. Le séchage naturel est excessivement lent.

Pour cette raison il convient très souvent de recourir au séchage artificiel, surtout quand on désire obtenir des humidités très basses, les températures ne devant pas excéder 40°C environ, afin d'éviter des altérations de structure de matériaux.

Etant donné la forte influence de l'humidité ambiante sur celle du matériau, les matériaux doivent être, après séchage, revêtus d'une couche imperméable : cette opération doit se faire d'autant plus soigneusement que l'humidité du matériau est plus faible par rapport à l'humidité d'équilibre dans l'ambiance où on va la mettre.

L'imperméabilisation peut être faite avec de la gomme-laque, du vernis, de la paraffine...etc

Le plâtre et les mélanges plâtre-kieselguhr présentent du fluage. Pour un matériau dont les dosages, en poids sont :

$$\frac{\text{plâtre}}{\text{kieselguhr}} = 2 \quad \text{et} \quad \frac{\text{plâtre}}{\text{eau}} = 2$$

Pour des modèles dont on empêche le retrait du au séchage, ou si celui-ci est irrégulier, il peut se produire des fissures, parfois invisibles, gênant considérablement la fidélité des résultats des observations. C'est la raison pour laquelle il est préférable de couler les modèles dans des blocs que l'on taille doivent après séchage. Les essais évidemment s'effectuer en atmosphère conditionnée.

S'il s'agit d'un modèle pour lequel le retrait est spécialement à craindre, par exemple, pour un ouvrage à fondations rigides, on pourra faire usage d'un mélange plâtre- craie en proportions 2/3 ,1/3 en poids que l'on réalise à sec puis que l'on vide dans l'eau de gâchage selon les proportions eau-plâtre 1/1.2. un tel mélange n'offre aucun retrait mais présente un module d'élasticité plus élevé.

Il possède une résistance à la rupture en compression de 70 bar, en flexion de 25 bar, un module d'élasticité de 40000 à 50000 bar et un coefficient de Poisson de voisin de 0.28. Le diagramme contraintes-dilatations est linéaire pour des tensions inférieures à 20 bar.

Ces mélanges se stabilisent rapidement et dans un délai de quelques jours, offre des caractéristiques physico-mécaniques assez semblables à celles d'un béton normal.

1.3.3.2.4 Les mortiers de ciment :

Il est indubitable qu'un important gage de succès lors d'essais sur modèle est d'employer le même matériau que celui du prototype

I.3.3.2.5 Les métaux :

Les métaux les plus employés sont l'acier, le laiton, le bronze et les alliages d'aluminium.

Tous réalisent les conditions de similitude dans le domaine élastique : le choix de l'un ou de l'autre est fonction de la déformabilité désire et de la facilité de reproduction des diverses pièces de la structure à tester.

Lorsqu'on emploie des métaux pour les essais, c'est que l'on fait appel au même matériau que le prototype.

I.3.4 notion sur la construction des modèles et l'exécution des essais

I.3.4.1 Construction et équipement:

Un modèle représentant un site naturel et des ouvrages comprend trois parties principales : (voici un exemple d'un modèle de cours d'eau dans la figure suivante)

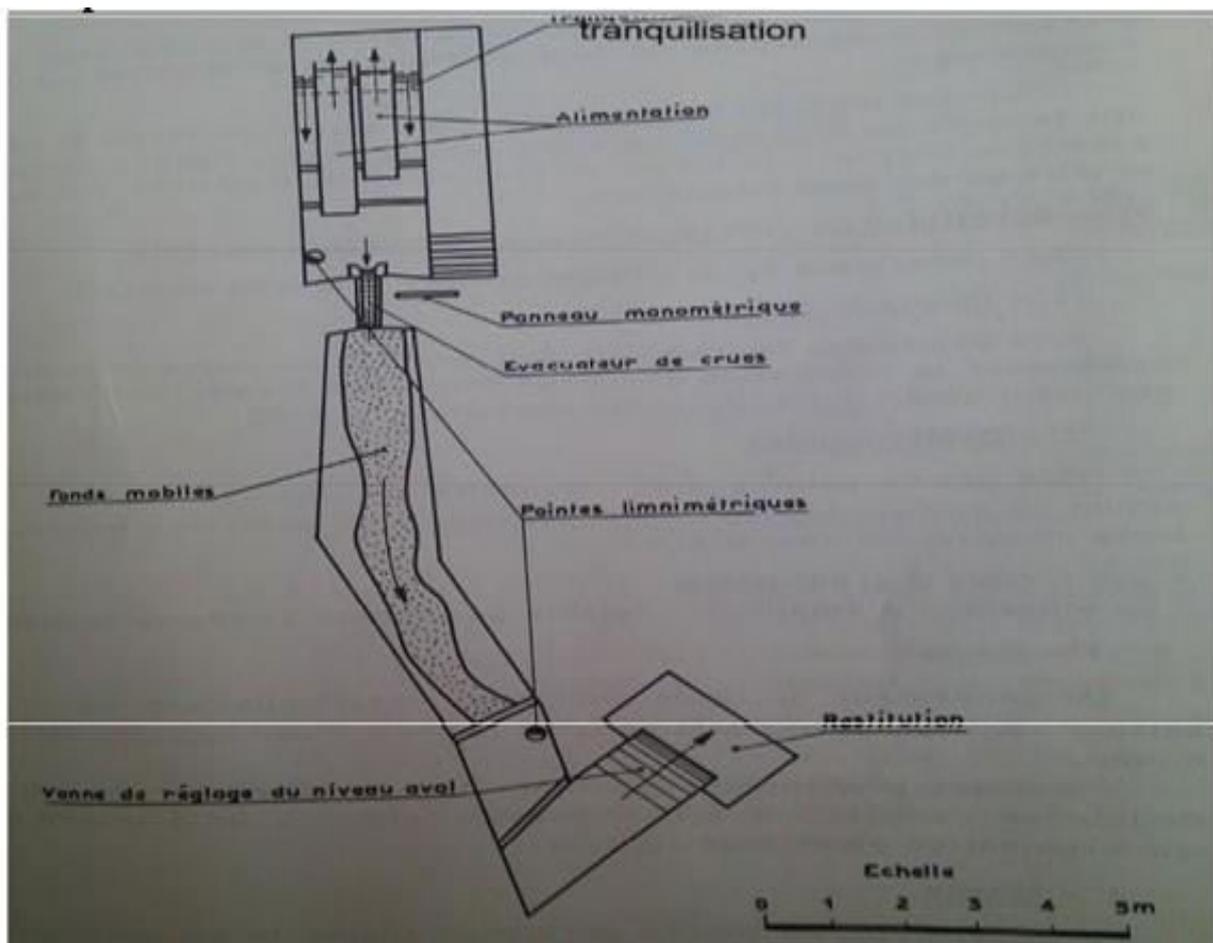


Figure-I- 1: Vue en plan d'un modèle de cours d'eau (évacuateur de crues du barrage de Monteynard)

I.3.4.1.1 Infrastructure

Les modèles à fond fixe de cours d'eau ou de littoral maritime sont construits en général en maçonnerie. Le fond de la rivière ou de la mer est défini soit par des profils en travers métallique, soit par des lignes de niveau en feuillard métallique.

Entre ces éléments de repère, on exécute un remplissage en pierrailles et on réalise le fond en ciment lissé appliqué sur ce remplissage.

Pour les modèles à fond mobile on réalise une forme de fond sur laquelle on dépose le matériau mobile, la forme du fond étant matérialisée par des profils ou des lignes de niveau.

I.3.4.1.2 Appareillage de reproduction des phénomènes naturels

Les principaux appareillages utilisés sont :

- ✚ Débit liquide : les débits des cours d'eau sont réalisés au moyen des pompes produisant la circulation d'un débit en circuit fermé ; une citerne permet d'amortir les effets des variations du débit.
- ✚ Débit solide : les débits solides sont introduits de manière continue en amont du modèle au moyen de distributeurs de matériaux pulvérulents.
- ✚ Houle : un générateur de houle comprend essentiellement un volet batteur oscillant produisant un front de houle d'une longueur déterminée. Plusieurs générateurs peuvent être installés sur un même modèle et osciller en synchronisme, grâce à un dispositif de synchronisation électrique approprié.
- ✚ Marée : un générateur de marée permet de régler le niveau du plan d'eau à l'entrée d'un estuaire d'après une loi de variation de hauteur en fonction du temps ; il comporte essentiellement :
 - Un bloc hydraulique d'alimentation qui comprend une canalisation d'arrivée d'eau de débit constant et une canalisation d'évacuation commandée par une vanne.
 - Un ensemble de réglage composé d'un appareil à programme et une pointe vibrante ; cet ensemble règle le niveau en fonction de l'écart entre le niveau théorique fourni par l'appareil à programme et le niveau réel ; le moteur d'entraînement de la vanne agit de façon à ramener en permanence cet écart à une valeur nulle.

I.3.4.1.3 Appareillage de mesureI.3.4.1.3.1 Mesures des vitesses

Auxquelles on a trois procédés principaux a utilisés qui sont :

- Chronophotographie de trajectoire : cette méthode permet de mesurer la grandeur de la vitesse et de déterminer la direction des vectrices vitesses à la surface d'un plan d'eau ; elle consiste à photographier les trajectoires de flotteur en liège.
- Moulinet : la méthode est analogue à celle utilisée sur les cours d'eau naturels.
- Tube de Pitot : ce procédé n'est utilisable pratiquement que lorsque la vitesse dépasse 10cm/s.

I.3.4.1.3.2 Mesures des hauteurs

Elle est réalisée au moyen de limnimétrie à pointe. L'appareil comprend essentiellement une pointe placée à l'extrémité d'une tige qui peut coulisser verticalement et dont la position peut être repérée au moyen d'une règle graduée. la pointe est amené au contact de la surface liquide et le contact est repéré visuellement ou est met en évidence au moyen d'un indicateur électrique. Dans le cas de niveau d'eau rapidement variable, on utilise une linographie enregistreuse.

I.3.4.1.3.3 Mesures de débit

Les débits des écoulements à surface libre sont en générale mesurés au moyen de déversoirs placés sur le circuit d'alimentation des modèles : la mesure du débit se ramène à une mesure de niveau au moyen d'un limnimètre .les débits d'écoulements en charge sont mesurés au moyen de dispositifs déprimogènes : venturis, diaphragmes. La mesure se ramène à celle d'une différence de pression ; elle est effectué au moyen de manomètre ou de dispositifs du type « gyromètre ».

I.4.4.2 Exécution des essais

I.3.4.2.1 Etalonnage

Cette opération consiste à reproduire, sur le modèle, des conditions d'écoulement ou de mouvement en similitude géométrique et cinématique aussi rigoureuse que possible avec les conditions naturelles. On agit sur les écoulements et sur les conditions aux limites.

I.3.4.2.1.1 Modèles de cours d'eau

Modèle à fond fixe

L'étalonnage est réalisé en cherchant à reproduire des lignes d'eau en similitude avec celle observées dans la nature pour différents débits. Pour obtenir cette similitude, on agit sur la rugosité du fond et des berges.

Modèles à fond mobile

Dans le cas d'un modèle à fond mobile, l'étalonnage hydraulique doit être suivi de l'étalonnage relatif au débit solide.

I.3.4.2.1.2 Modèle à houle

L'étalonnage consiste essentiellement à vérifier que l'agitation due à la houle dans la région étudiée est semblable à celle de la nature et à réaliser des conditions aux limites satisfaisantes.

I.3.4.2.1.3 Modèles à marée

L'étalonnage peut être réalisé en agissant soit sur les niveaux soit sur les vitesses. Le procédé le plus souvent utilisé est celui du réglage par les niveaux : en particulier, pour les estuaires, on règle le dispositif générateur de marée de façon que le niveau du plan d'eau à l'aval suive rigoureusement la loi homologue de celle de la nature ; on agit pour cela sur la rugosité du fond.

I.3.4.2.1.4 Essais d'ouvrages

Les essais d'ouvrage consistent à réaliser successivement sur le modèle diverses implantations ou modifications de structures et à déterminer l'influence de celle-ci sur les phénomènes étudiés, en caractérisant cette influence par la valeur de paramètre convenablement choisi. Dans certains cas, un contrôle qualitatif permet de guider l'expérimentateur dans ces tentatives et, de ce fait, de gagner du temps.

I.4 Conclusion

L'hydraulique, nous le savons déjà, pour une bonne part se développe et résout beaucoup de ses problèmes par la voie expérimentale. De nombreux projets, de nos jours, sont étudiés à partir de modèles aux dimensions réduits qui permettent de conduire des études que l'on ne saurait effectuer sur l'objet, le site grandeur nature. L'analyse dimensionnelle et la similitude hydraulique sont là pour faire en sorte que les caractéristiques principales du modèle réduit soient les mêmes que celles du modèle grandeur nature

II.1. Introduction

Il existe près de 50 000 grands barrages dans le monde, utilisés pour recueillir de l'eau, l'irrigation, le contrôle des inondations, et l'approvisionnement en énergie. Pour une grande partie de la population, les barrages sont essentiels et contribuent au développement économique et à la satisfaction des besoins essentiels.

Comme tout ouvrage de génie civil, les barrages peuvent connaître des défaillances de sécurité. Au cours de l'histoire, de maints incidents se sont produits lors de la construction ou de l'exploitation de ces ouvrages. Certains de ces incidents ont fini même par la rupture du barrage, due à de différentes raisons. Ces incidents et ruptures de barrages se sont traduits par des conséquences de différente envergure, allant des conséquences mineures à celles catastrophiques (Marche C. 2008).

En Algérie, seulement deux accidents majeurs de rupture de barrage ont eu lieu " Fergoug en 1830 et en 1927 " causant la perte d'environ 250 personnes; cette rareté des accidents de rupture ne doit pas conduire à penser que le risque de rupture de barrage est négligeable. En fait c'est le résultat d'un aspect de surdimensionnement des ouvrages d'évacuations notamment les évacuateurs de crues. (Bouhali M. 2006), (Djemili L. 2010).

II.2. Les barrages

II.2.1 Définition

Selon le Larousse un barrage est un « *ouvrage artificiel coupant le lit d'un cours d'eau et servant soit à en assurer la régulation, soit à pourvoir à l'alimentation en eau des villes sou à l'irrigation des cultures, ou bien à produire de l'énergie* » et une digue est un « *ouvrage destiné à contenir les eaux, à élever leur niveau ou à guider leur cours.* »

Les deux termes barrage et de digue ne sont pas sans confusion; on emploie parfois le terme digue pour décrire un petit barrage réalisé en remblai. Les berges des canaux ou cours d'eau canalisés peuvent également constituer des digues. Si les barrages sont généralement implantés sur des cours d'eau, il existe également des ouvrages construits pour stocker de l'eau de ruissellement d'un talweg en créant une « retenue collinaire » ainsi que des ouvrages situés hors d'un lit majeur, et se remplissant par pompage ou par dérivation d'un cours d'eau.

Un barrage est un ouvrage d'art placé en travers d'un cours d'eau, destiné à retenir et stocker de l'eau ou à la dériver.

Les techniques de la fin du XIX^e et du début du XX^e siècle ne permettaient pas l'édification de retenues de grande capacité. Les premiers barrages ont surtout une fonction de dérivation d'une partie de l'eau (écrémage) vers une conduite forcée ou un canal d'irrigation.

L'amélioration des techniques et des bétons dans le premier quart du XX^e siècle permet d'envisager la réalisation de retenues plus conséquentes, capables de réguler la production hydro-électrique.

La géologie (nature des roches sur lesquelles sera édifié le barrage, agrégats extraits sur place) et la topographie (largeur de la vallée), commande le type de barrage utilisé.

II.2.2 Types de barrages

Les principaux paramètres à prendre en compte dans le choix des sites et du type des barrages en vue d'une mobilisation et d'une gestion optimale des ressources hydrauliques sont les suivants :

- La topographie et les vallées
- La morphologie de la vallée
- Les conditions géologiques et géotechniques
- Le contexte météorologique et le régime des crues.

Les matériaux, les modes de résistance à la poussée de l'eau, et les techniques de construction de barrages sont nombreux. Il en résulte par conséquent un ensemble d'ouvrages variés, mais qui se prêtent à une classification simple et, par ailleurs, importante en matière de sécurité.

Les digues et les barrages peuvent être composés des mêmes matériaux. Ils ont les mêmes fonctions de base : résister à la poussée hydrostatique et aux autres aléas naturels tels que les séismes, les crues et assurer l'étanchéité de la retenues.

On distingue deux grandes familles de barrages selon les matériaux qui les composent :

- Les barrages rigides, en béton ou en maçonnerie
- Les barrages souples, en enrochement ou en terre.

II.2.2.1. Les barrages rigides

- **Barrage poids en béton**

Les barrages rigides en béton sont construits selon les principes de la résistance des matériaux et la théorie d'élasticité. Le plus souvent ces ouvrages sont réalisés en béton conventionnel vibré. L'emploi du BCR pourrait être envisagé dès que le volume du barrage dépasse 40 000 m³. Le type le plus ancien des barrages rigides est le barrage poids, appelé ainsi parce qu'il oppose son poids à la poussée des eaux. Il peut être simple, de profil triangulaire, précontraint

en faisant participer des tirants d'acier à la reprise des charges, évidé lorsqu'on ménage des vides dans son profil ou mobile lorsqu'une grande partie du parement amont est constituée de vannes qui transmettent la pression de l'eau sur des piles et au radier de l'ouvrage.

Comme on n'était pas certain de la tenue des bétons à cette altitude, le barrage a été recouvert d'un parement de pierres taillées.(voir la Figure II- 1)

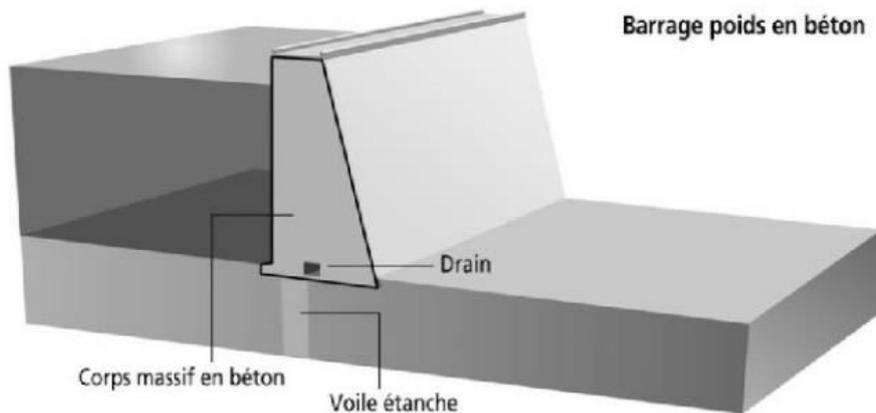


Figure II- 1 : Barrage poids en béton

- **Barrage à contreforts**

C'est un grand mur en béton qui s'appuie sur des contreforts en laissant des évidements, économisant ainsi du béton. Les contreforts, relativement minces, conduisent les efforts jusqu'aux fondations. (Carrère A. 2000)

Ce mode de construction se subdivise en sous-catégories; contreforts à têtes arrondies à masque amont, à voûtes multiples.(voir Figure II- 2)

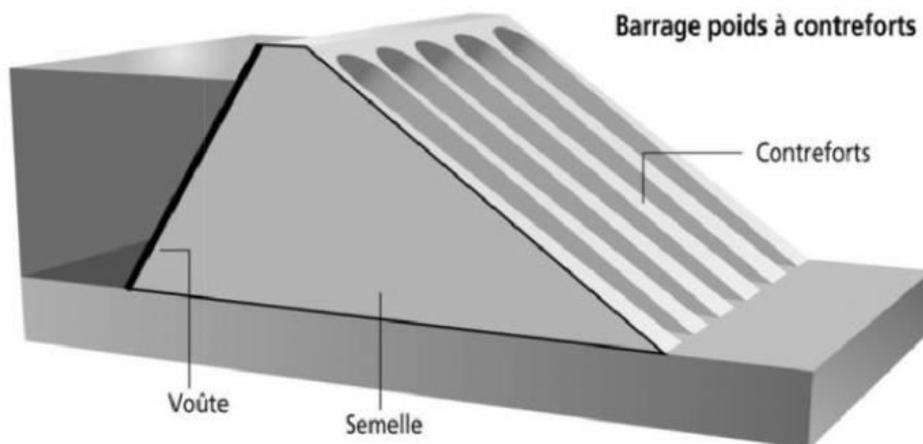


Figure II- 2 : Barrage poids à contreforts

- **Barrages voûte :**

De forme arquée tournée vers l'amont (Figure II- 3), le barrage voûte permet de reporter la pression de l'eau du réservoir sur les rives. Cela permet également de diminuer le volume de béton et d'utiliser au mieux ses capacités à supporter la compression.

De ce fait, c'est un barrage extrêmement sûr et la seule rupture connue (Malpasset, 1959) a été due non à la voûte elle-même, mais à la défaillance en profondeur d'une rive, dans des conditions de structure géologique, de pétrographie et de pressions interstitielles très particulières. (Carrère A. 2000) (voir Figure II- 3)

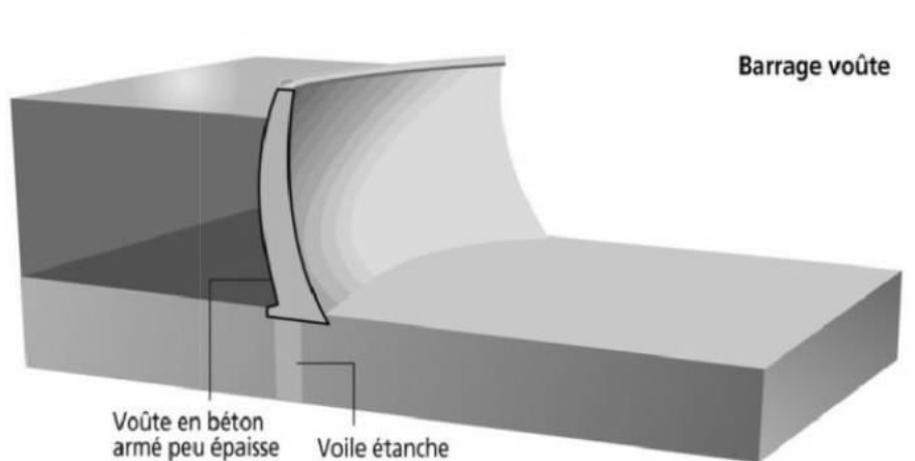


Figure II- 3 : Barrage en voûte

- **Barrages mixtes :**

Le barrage de Roselend est sans doute le plus bel exemple de barrage mixte. Une gorge étroite et profonde, aux versants dissymétriques a nécessité l'utilisation d'une technique originale :

Voûte à laquelle on a accolé deux barrages-poids latéraux d'inégale longueur. (voir Figure II- 4)



Figure II- 4 : Barrage de Roselend (photo h. Barthélémy).

II.2.2.2. Barrages souples

Il existe trois schémas principaux de structure de barrage souple:

- **Barrage homogène**

Le barrage en terre homogène est constitué d'un seul matériau meuble suffisamment imperméable pour assurer à la fois l'étanchéité et la résistance, la terre est généralement mise en place par compactage.

La structure de ces barrages est souvent complétée par un dispositif de drains dans sa partie aval et d'une protection mécanique contre l'érosion dans sa partie amont. (Djemili L. 2006) (voir Figure II- 5)

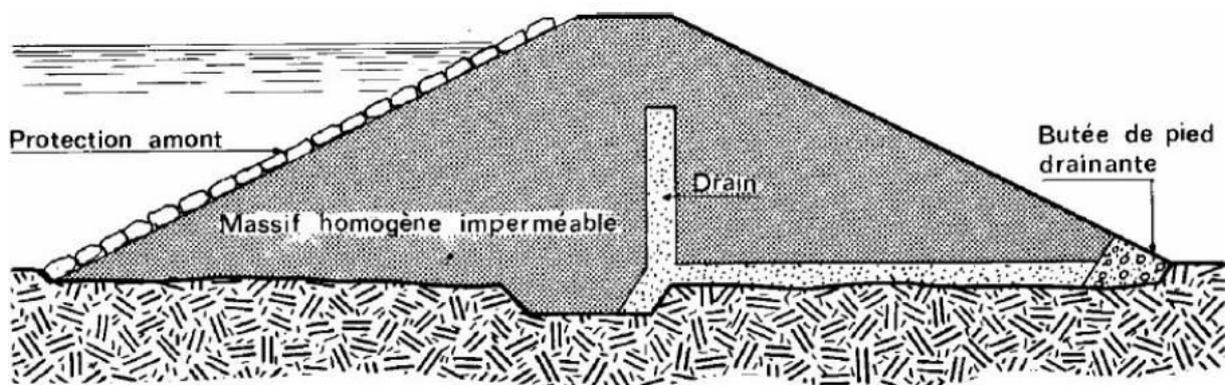


Figure II- 5 : Barrage homogène

- **Barrage à noyau étanche**

Souvent l'hétérogénéité des matériaux disponibles sur place ou leurs caractéristiques géotechniques ne permettent pas d'envisager une digue homogène étanche. Dans ce cas, une solution couramment adoptée consiste à concevoir un massif en plusieurs zones (Figure II- 5), dont chacune est constituée d'un matériau différent suivant le rôle que doit jouer chaque zone. L'étanchéité est assurée par un noyau imperméable constitué de terres argileuses, d'argile, de terres caillouteuses ou tout autre matériau terreux comportant une forte proportion de matériaux fins lui conférant une faible perméabilité.(voir Figure II- 6)

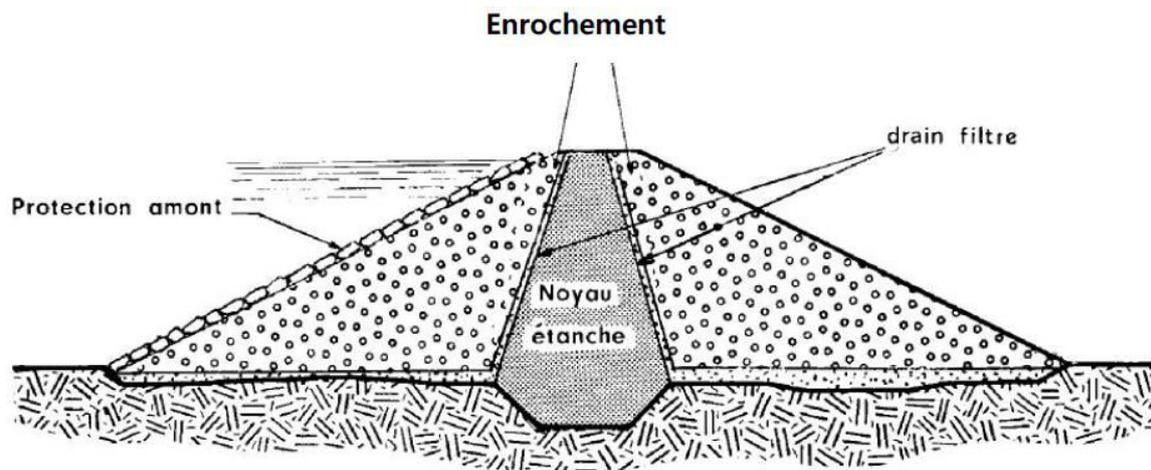


Figure II- 6 : Barrage à noyau étanche

Cette technique permet de faire de grandes économies dans les volumes mis en œuvre et d'utiliser au mieux les matériaux disponibles sur le site. (Djemili L. 2006)

- **Barrage à masque amont**

La réalisation d'une digue à noyau étanche peut présenter des difficultés telles que l'indisponibilité de matériaux conformes et la difficulté de mise en œuvre, cette technique devrait être alors comparée à celle d'une digue homogène à masque amont étanche.

Le masque amont (Figure II-6) est une paroi étanche posée sur le talus amont du barrage, il peut être de nature très différente: béton armé, matériel bitumineux, "bâche" et même tôle d'acier. Le corps du barrage assurant la stabilité peut être en matériau quelconque pour autant qu'il soit peu déformable. (Djemili L. 2006)(voir Figure II- 7)

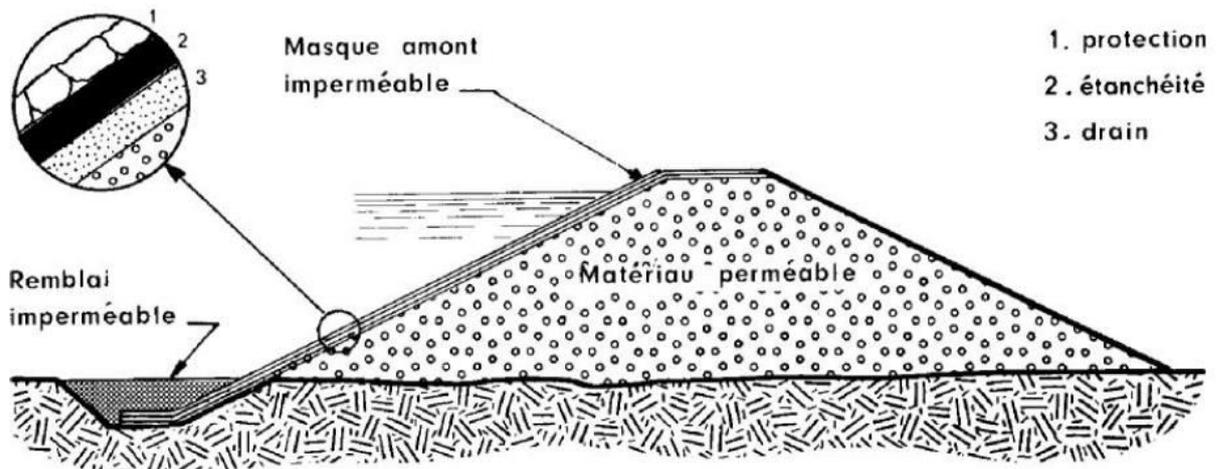


Figure II- 7 : Barrage à masque amont

II.2.3. Rôle des barrages

A l'origine, les barrages furent construits afin de satisfaire des besoins assez précis: l'approvisionnement en eau et l'irrigation. Avec le développement des civilisations, les besoins furent plus importants et plus nombreux, ajoutant aux précédents la nécessité de contrôler les crues, la navigation, la qualité de l'eau, le contrôle des sédiments et la production de l'énergie. Par conséquent des barrages ont été construits pour répondre à ces besoins spécifiques.

Les barrages sont conçus dans un objectif bien précis, mais certains ouvrages peuvent être polyvalents en combinant plusieurs usages. D'après les dernières publications du Registre mondial des Grands Barrages, l'irrigation est de loin la raison la plus courante pour construire un barrage. Parmi les barrages à but unique, 48% sont pour l'irrigation, 17% pour l'hydroélectricité,

13% l'approvisionnement en eau, 10% le contrôle des crues, 5% pour les loisirs et moins de 1% pour la navigation et la pisciculture. (CIGB. 2007)

II.2.3.1. L'irrigation:

Les terres irriguées couvrent aujourd'hui environ 277 millions d'hectares soit 18% des terres arables du monde, elles produisent 40% des récoltes et emploient 30% de la population dispersée dans les régions rurales. Du fait de l'importante croissance démographique pressentie pour les années à venir, l'irrigation doit être étendue afin d'augmenter la capacité de production. On estime que 80% de la production additionnelle de nourriture en 2025 viendra de terres irriguées. Même avec le développement qui ne cesse d'accroître des méthodes de conservation de l'eau et des techniques d'irrigation, la construction de réservoirs supplémentaires sera nécessaire. (CIGB. 2007)

II.2.3.2. Hydro-électricité:

Les usines de production d'énergie hydro-électrique produisent en général entre plusieurs centaines de kilowatts et plusieurs centaines de mégawatts, certaines usines immenses peuvent produire jusqu'à 10 000 mégawatts afin d'approvisionner en électricité plusieurs millions de personnes. La capacité mondiale combinée de ces usines est estimée à 675 000 mégawatts, elles fournissent 2,3 trillions de kilowatts d'électricité par heure et couvrant 24% des besoins en électricité mondiaux. (CIGB. 2007)

II.2.3.3. Distribution d'eau pour usages domestiques et industriels:

Il est important de signaler que la grande partie des précipitations retournent aux océans et qu'une grande proportion de celles qui tombe sur les terres s'écoule aussi jusqu'aux étendues salées. Au fait, seulement 2% des précipitations s'infiltrent et alimentent les nappes phréatiques. Les barrages planifiés, conçus, construits et entretenus convenablement pour stocker l'eau contribuent amplement à satisfaire nos besoins d'approvisionnement en eau pour usages domestiques et industriels. Pour ajuster les variations des cycles hydrologiques, les barrages et réservoirs sont indispensables pour emmagasiner l'eau et approvisionner avec régularité lors de pénurie. (CIGB. 2007)

II.2.3.4. Navigation fluviale

À cause des conditions naturelles, les rivières subissent des modifications de débit, niveau, formation de glace, du cours du lit dû à l'érosion et à l'envasement, cela cause des problèmes et obstacles pour la navigation fluviale. Le développement de cette activité résulte de l'aménagement accompli de bassins, barrages et réservoir qui sont régulés afin de réaliser

des bénéfiques économiques. De plus, ce système et les activités des loisirs en découlant réduisent l'érosion et stabilise le niveau des nappes phréatiques. (CIGB. 2007)

II.2.3.5. Contrôle des crues

Les barrages peuvent être utilisés pour réguler le niveau d'eau dans les rivières et réguler efficacement le débit déversé en stockant temporairement l'eau et en la relâchant plus tard. La méthode la plus efficace pour réguler le débit est la mise en œuvre d'un système intégré de gestion de l'eau qui contrôle le stockage et les relâches des principaux barrages d'un bassin fluvial. Chaque barrage est réglé selon un programme d'exploitation spécifique afin de contrôler les flux d'eau sans causer de dommage. • titre d'exemple, lors des saisons pluvieuses il faut baisser le niveau de la retenue pour faire plus de capacité d'accumulation.(CIGB. 2007)

II.3. Rupture de barrage

La rupture de barrage correspond à une destruction partielle ou totale de l'ouvrage, elle entraîne la formation d'une onde de submersion se traduisant par une élévation brutale du niveau de l'eau à l'aval, voire un gigantesque torrent.

Bien que les ruptures de barrage soient des événements rares, on en a recensé 2000 depuis le 12ème siècle. La figure II.8 montre qu'au 20ème siècle, il se produisait entre 10 et 40 ruptures de barrage chaque décennie. Les données les plus récentes indiquent que le nombre de ruptures de grands barrages tend vers 1,5 par année. Si l'on met en relation ces ruptures avec le nombre de barrages en service pendant la même période, on constate néanmoins un recul progressif du taux de rupture. (Marche C. 2008).(voir Figure II- 8)

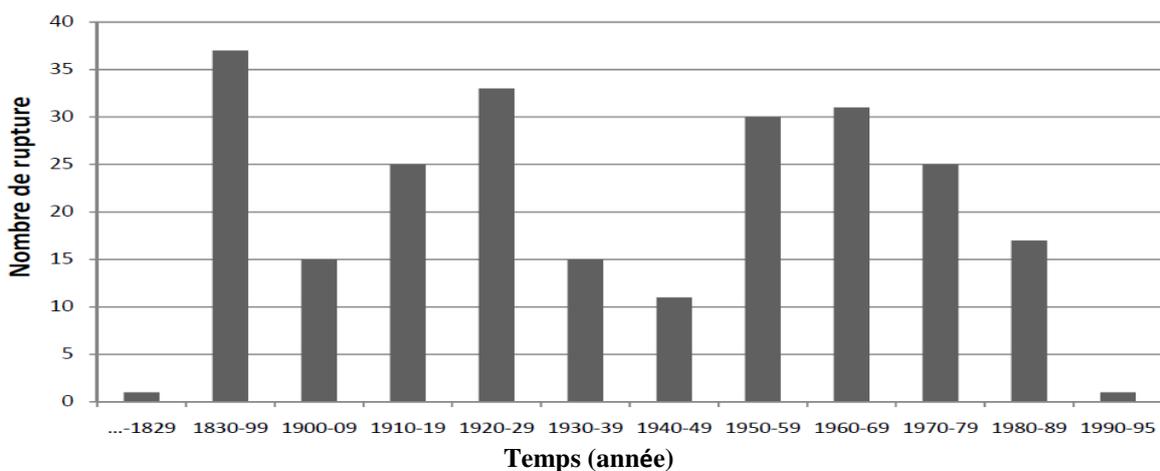


Figure II- 8 : Historique des ruptures de barrages

Tableau II-1 énumère les catastrophes les plus marquantes depuis le 19^{ème} siècle.

Barrage	Pays	Date de rupture	Hauteur du barrage (m)	Volume de la retenue (hm ³)	Nombre de victimes
Barrage en remblai, rupture durant la construction					
Panshet	Inde	1961	49	214	1 000
Sempor	Indonésie	1967	60	56	200
Barrage en remblai, rupture lors de la première mise en eau					
Dale Dyke	Grande-Bretagne	1864	29	3,2	230
Barrage en remblai, rupture en service					
Iruhaïke	Japon	1868	28	18	1200
Mill River	États-Unis	1874	13	<i>Inconnu</i>	140
South Fork	États-Unis	1889	21	18	2 200
Walnut Grove	États-Unis	1890	33	11	129
Hyogiri	Corée du Sud	1961	15	0,2	139
Nanak Sagar	Inde	1967	16	210	100
Machu	Inde	1979	26	101	2 000
Gotvan	Iran	1980	22	<i>Inconnu</i>	200
Kantale	Sri Lanka	1986	27	135	127
Barrage poids, rupture lors de la première mise en eau					
Puentes	Espagne	1802	69	13	600
Saint Francis	États-Unis	1928	62	47	450
Barrage poids, rupture en service					
Fergoug I	Algérie	1881	33	30	200
Tigra	Inde	1917	25	124	1 000
Malpasset	France	1959	60	49	423
Khadakwasla	Inde	1961	33	137	1 000
Barrage à contreforts et voûtes multiples					
Gleno	Italie	1923	35	5	600
Vega de Terra	Espagne	1959	33	7,3	140

Tableau-II- 1: Pertes humaines et matérielles majeures aux 19ème et 20ème siècles

En considérant l'ensemble des ruptures postérieures à 1800 dans le monde, quelle que soit la hauteur du barrage, on compte 144 ruptures dont :

71 sans victime ;

31 avec moins de 10 morts ;

17 avec 10 à 99 morts ; 25 avec 100 morts et plus.

En Algérie 2 ruptures de barrages sont répertoriées selon les recensements faits par la Commission International des Grands Barrages (CIGB). Il s'agit des deux accidents du barrage de l'Habra à Mascara ayant eu lieu durant la période coloniale en 1881 et en 1927. Le barrage de l'Habra, sur l'oued Fergoug, est un ouvrage en maçonnerie, de hauteur 35 m au-dessus du terrain naturel. Achievé en 1871 et dimensionné pour une lame déversante de 1,60 m (500 m³/s). (Deroo L., Jimenez B. 2011)

Il subit successivement deux crues importantes : la première (1872, 700 m³/s) avec une lame de 2 m cause de « sérieux dégâts que l'on se contente de réparer », y compris une rupture partielle de l'évacuateur ; la seconde (1881, 850 m³/s) avec une lame de 2,25 m emporte la rive droite de l'ouvrage. 250 personnes furent noyées, ponts, et maisons emportés par les flots déchaînés. La reconstruction du barrage dura deux années, de 1883 à 1885, et coûta 1300000 fr. (Bouhali M. 2006)

Le barrage est reconstruit avec un profil type pratiquement identique. Il subit une crue en 1900 avec un niveau d'eau supérieur (par obstruction du déversoir), sans désordres. (Bouhali M. 2006)

Une nouvelle crue en 1927 cause une rupture complète du barrage. Cette rupture s'est également produite en crue, avec cette fois-ci réservoir initialement presque vide ; et une lame d'eau maximale de 3,85 m au-dessus du déversoir, niveau maximal jamais atteint au barrage. La brèche s'est amorcée au voisinage de l'évacuateur (rive gauche), dans les maçonneries, puis s'est propagée vers la rive droite.

Trois quarts d'heure après l'annonce de la rupture du barrage, les flots torrentiels déferlaient dans la ville de Perrégaux, emportant sur son passage le pont métallique du chemin de fer, les locomotives et les wagons. Les routes sont coupées, les vergers arrachés, les récoltes anéanties. Une cinquantaine de maisons n'ont pas résisté et se sont effondrées. Dans les rues, la hauteur des eaux boueuses atteint deux mètres. Grâce à l'appel téléphonique de l'ingénieur du barrage, mais aussi du fait que la catastrophe se soit déroulée de jour, il n'y eut pas de victime à Perrégaux. On dénombra cependant quelques noyés dans la plaine. (Deroo L., Jimenez B. 2011) (voir les figures II-9 et II-10)

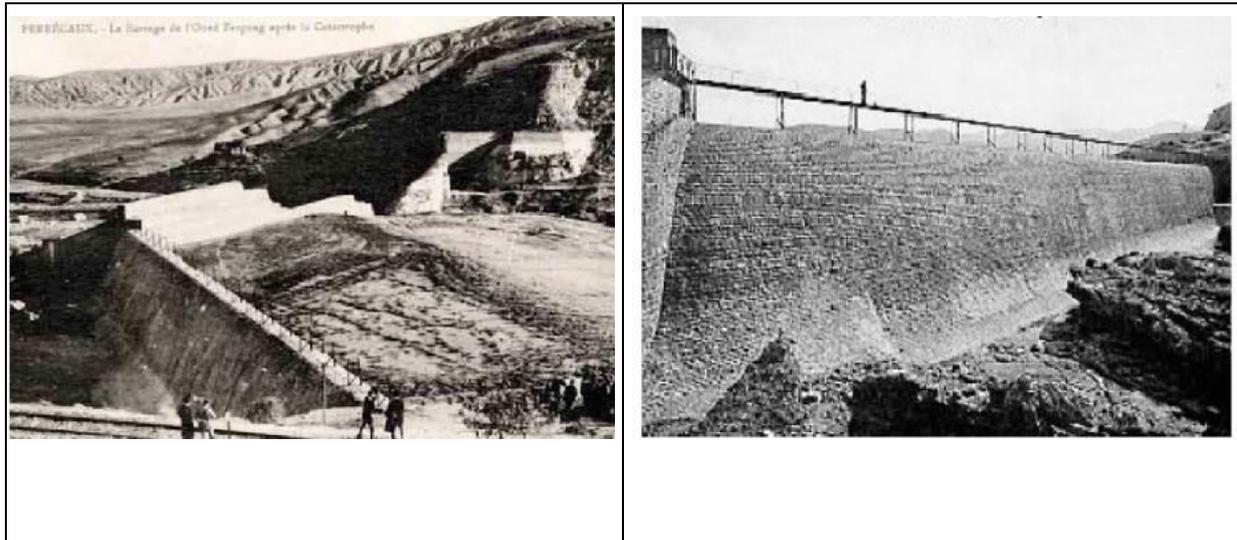


Figure-II- 9: Barrage de Fergoug, première rupture en 1881

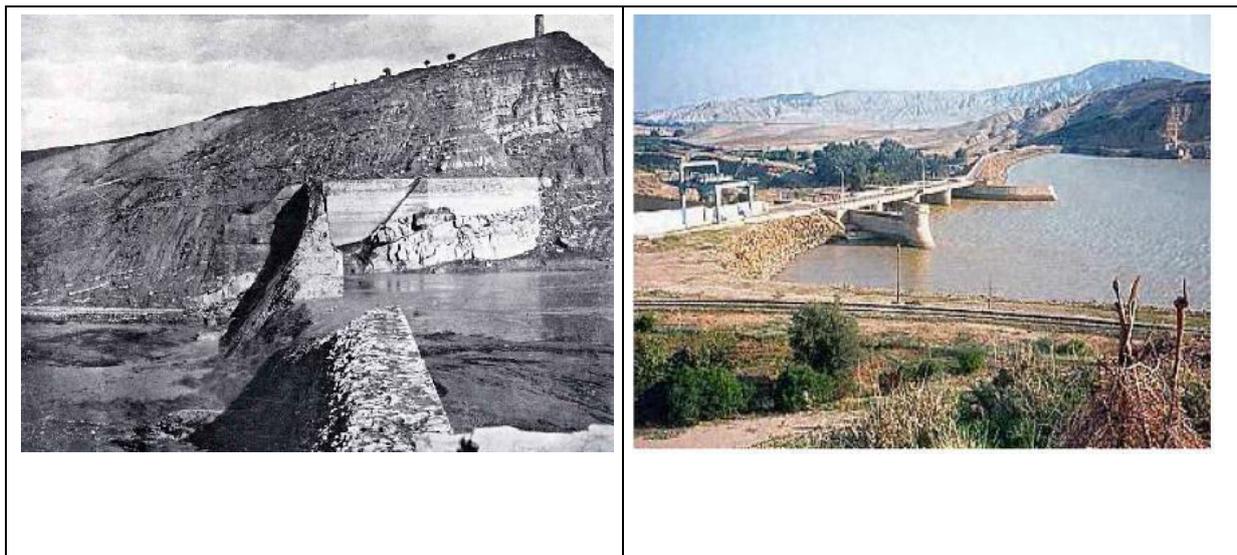


Figure-II- 10: Le barrage de Fergoug après la catastrophe de 1927

II.3.1. Les causes de rupture

Les causes de rupture d'ouvrage peuvent être de différents ordres.

- **Des problèmes techniques**

Peuvent entraîner la rupture d'un ouvrage. Il peut s'agir d'un défaut de fonctionnement des vannes permettant l'évacuation des crues ou bien d'un vice de conception, de construction

ou de matériaux. Le type de barrage, les matériaux utilisés, la nature des fondations ainsi que l'âge de l'ouvrage vont avoir une influence sur l'apparition de ces problèmes.

Cependant, l'évolution des techniques de construction rend les barrages modernes beaucoup plus sûrs.

- **Des causes naturelles** peuvent également être à l'origine de rupture de barrage. Il en est ainsi des crues exceptionnelles, d'intensité supérieure à celle retenue pour le dimensionnement des ouvrages évacuateurs, appelée *crue de projet*. Le niveau de sécurité retenu est généralement compris entre la crue millénaire et la crue déci millénaire. Les barrages en remblai ne supportent pas la submersion et sont donc plus vulnérables aux débordements. La phase de chantier pour les barrages en construction est une période sensible aux risques de crue, car les ouvrages d'évacuation ne sont pas encore opérationnels.

Les glissements de terrains, soit de l'ouvrage lui-même dans le cas de barrages en remblai, soit des terrains entourant la retenue sont également une cause de rupture. L'ouvrage peut être déstabilisé par un glissement (barrage de Malpasset, 1959) ou bien submergé par la vague engendrée par un glissement en amont de la retenue (barrage du Vajont, 1963).

Enfin les séismes peuvent causer des dommages mineurs à ne pas négliger (déformations, tassements, fissures, etc.). En France, le risque sismique est systématiquement pris en compte lors de la conception des ouvrages, même s'il est peu élevé. Les ruptures débarrages dues aux séismes sont d'ailleurs très rares.

- **Des causes humaines** peuvent enfin être à l'origine d'accidents : études préalables pas assez approfondies, contrôle d'exécution insuffisant, erreurs d'exploitation, défaut de surveillance et d'entretien ou encore actes de malveillance, sabotage, attentat, guerre (les barrages sont néanmoins protégés par la convention de Genève).

II.3.2. Modalités de rupture

II.3.2.1. Rupture instantanée ou graduelle

La rupture d'un barrage est rarement instantanée. Que cela soit pour un barrage en béton ou bien en remblai, il y a en généralement la formation d'une brèche dans le barrage, qui s'agrandit progressivement. La libération de l'eau se fait donc de façon graduelle. Ce processus de formation de brèche dans un barrage ou une digue a fait l'objet de plusieurs

études pour en étudier la dynamique. Cela reste un processus complexe et en général, on fait l'hypothèse que le volume d'eau est lâché instantanément : on parle d'effacement du barrage.

Cette hypothèse va dans le sens de la sécurité, mais peut induire à majorer le risque hydraulique induit par l'onde de crue, en particulier pour les barrages en remblai (qui sont majoritaires) ; pour des barrages en remblai, on observe que la largeur b de la brèche est généralement située dans la fourche $h_b \leq L \leq 3h_b$, où h_b est la hauteur du barrage. Pour ces barrages, le temps nécessaire à former une brèche varie de façon considérable (de quelques minutes à quelques heures) selon le matériau et la cause de la rupture.

En Suisse, l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) recommande de procéder ainsi pour le scénario de rupture :

- Pour les barrages-voûtes et barrage-poids : rupture totale et instantanée de tout barrage ;
- Pour les digues : formation d'une brèche de forme trapézoïdale de base égale à deux fois la hauteur d'eau et avec une pente de talus de 1:1 (en veillant que la surface ne soit pas plus grande que la digue elle-même) ;
- pour les barrages mobiles : rupture totale ou partielle en fonction du type de déconstruction.

II.3.2.2. Rupture par renard

Les ruptures consécutives à une érosion interne (effet renard) sont peu fréquentes. (4 à 6% des cas observés). La rupture par effet renard est fréquente lorsque les matériaux constitutifs du barrage ont pour propriétés d'être :

- perméables,
- fortement érodables,

Les barrages naturels sont constitués de matériaux hétérogènes ayant été peu compactés (en comparaison aux barrages de construction. De ce fait ces barrages sont souvent poreux, non imperméabilisés et non drainés. Il y a donc présence d'écoulements internes. Ces écoulements peuvent entraîner de l'érosion interne, qui peut aboutir à une rupture par renard.

Des suintements sont souvent observés à la base de nombreux barrages. Mais ces suintements sont rarement assez importants pour provoquer un « renard ».

L'érosion interne peut aussi provoquer un affaissement partiel du barrage, suivi du débordement, de la formation d'une brèche et de la rupture (donc rupture par surverse).

Il y a peu d'exemple de rupture par renard car celle-ci arrive rarement. Deux cas ont tout de même pu être observés. En 1966, rupture de l'éboulement ayant entraîné la formation du lac Yashinkul sur la rivière Isfayramsay (Centre sud de l'ex URSS) et en 1906 rupture de l'éboulement sur le cache creek (Californie). (voir Figure II- 11)

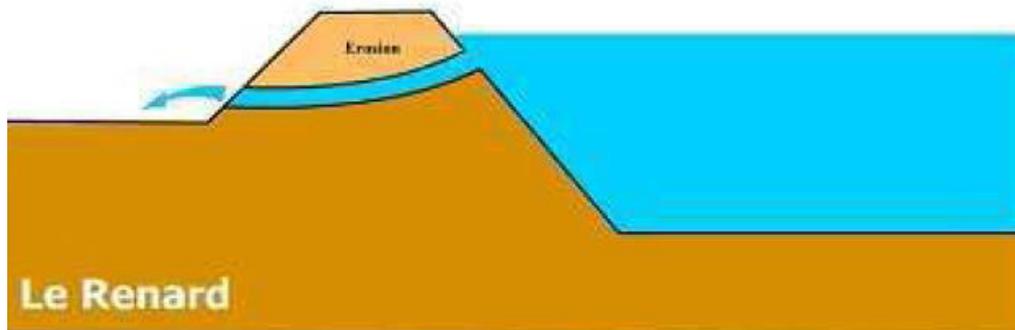


Figure-II- 11: Rupture par renard

II.3.2.3. Rupture par glissement

Il existe peu de cas de rupture par glissement des pentes du barrage. Ceci est dû au fait que naturellement les pentes du barrage se sont formées à un état d'équilibre naturel. Les glissements sont observés dans les cas où les pentes du barrage s'avèrent trop raides. Les masses éboulées avec leurs pentes relativement douces sont souvent peu vulnérables au glissement.

Un seul cas de glissement semble avoir été identifié, celui du Cerro Condor-Senca au Pérou sur la rivière Mantaro, bien qu'il soit possible que la rupture fût due à un effet renard.

II.3.2.4. Rupture par surverse

La surverse est la principale cause de rupture de barrages naturels. Elle représente 92 à 95 % des cas de rupture

Observés. Si il n'y a pas d'infiltration d'eau dans le barrage, le barrage se remplit jusqu'au déversement. Il y a alors apparition d'un écoulement, sur le parement aval de la masse éboulée. L'écoulement emporte progressivement les matériaux constituant le barrage pour aboutir par érosion régressive à la formation d'une brèche. Une fois la brèche formée, la rupture du barrage et la vidange de la retenue peuvent alors être très rapides.

La brèche due à la surverse se forme localement au point le plus bas ou le plus faible de la crête du barrage, puis se développe jusqu'au point bas du barrage, avant de s'élargir jusqu'à une situation d'équilibre (qui n'atteint pas la largeur totale du barrage).

Il est rare que la brèche descende jusqu'au niveau d'origine du cours d'eau car la présence de matériaux grossiers au sein de l'éboulement limite l'incision. (voir Figure II- 12)

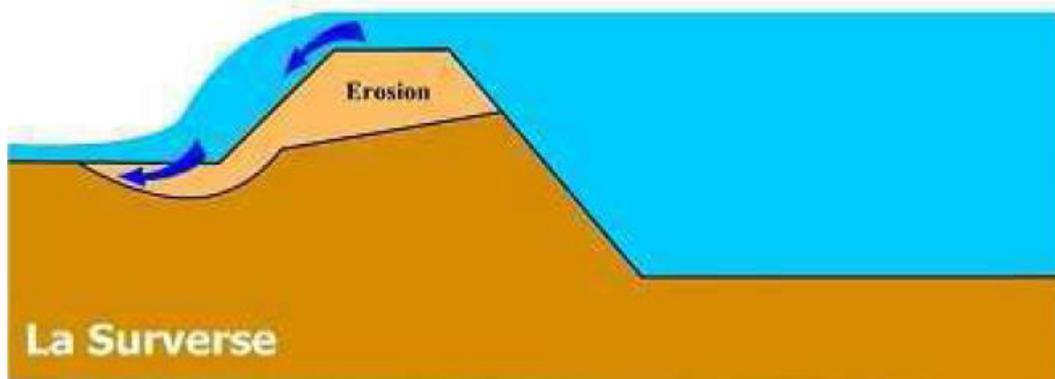


Figure-II- 12: Rupture par surverse

Comme dit précédemment, la plupart des ruptures de barrages sont dues à la surverse. On peut notamment citer le cas du barrage de « La Josefina » sur le Rio Paute, en Equateur en 1993. [20]

II.3.2.5. Rupture de petit barrage d'accumulation

Les Alpes ont été équipées au cours du XXe d'un grand nombre de barrages pour la production d'électricité. Plus récemment, au cours des 10–20 dernières années, des petits barrages ont été construits pour la production de neige de culture dans les stations de ski et, dans une moindre mesure, pour assurer l'approvisionnement en eau potable lors des pics de fréquentation touristique. On prévoit au cours des 10–20 prochaines années un accroissement considérable du nombre de petites retenues (d'un facteur 3 environ d'après les études prospectives) et une augmentation du volume de stockage (qui passerait de l'ordre de 50 000 m³ en moyenne actuellement à quelques centaines de milliers de m³ dans le futur). Les petites retenues peuvent connaître des accidents plus ou moins graves. Ainsi, en août 2004 et au printemps 2005, deux ouvrages ont connu une rupture lors de leur mise en eau enfance, entraînant une ruine partielle ou totale. En mars 2006, une retenue pour la production de neige de culture à Pelvoux (Hautes-Alpes, France) a été impactée et vidée par une avalanche, heureusement sans conséquence pour le camping (vide en saison) situé en contrebas.

Les ouvrages d'accumulation sont pourtant placés dans un milieu naturel hostile et donc exposés à des contraintes sévères (cycle gel/dégel, vieillissement des bétons, géo membranes, etc.) Ainsi qu'à des dangers naturels (mouvement de terrain, avalanche, chute de blocs, etc.). Comme ils sont assez souvent construits à l'amont d'enjeux significatifs (typiquement une station de ski), leur rupture peut éventuellement causer des dommages sévères.

L'effet de la rupture d'un petit barrage est l'un des points les plus importants pour estimer la sécurité d'un barrage et c'est assurément l'un des moins bien traités, ce qui peut s'expliquer par plusieurs éléments.

II.3.3. Choix des scénarios de rupture

L'étude de rupture d'un barrage a pour but de déterminer l'impact d'un tel accident sur les infrastructures situées en aval de l'ouvrage. Elle s'agit d'une des principaux volets de l'étude de sécurité d'un barrage. (Hossaini N. 2009)

Les études de rupture de barrages sont portées sur des situations hypothétiques. Leur probabilité de réalisation est extrêmement faible, de plus chacune de ces situations s'appuie sur un contexte et de multiples conditions très précises. (Marche C. 2008), (Bischof R., et al.2002).

Le choix des scénarios de rupture est toujours difficile à définir. Un barrage est souvent inséré dans un système complexe où il peut être soumis à plusieurs risques qui peuvent causer sa rupture, ces risques peuvent être d'ordre naturel par exemple les crues, le tremblement de terre, la poussée de la vase, le vieillissement et la dégradation des structures en béton, ou bien des risques liés aux erreurs humaines dans la conception, la gestion ou dans l'entretien de l'ouvrage. L'analyse de ces risques doit permettre d'identifier les scénarios susceptibles d'être, directement ou par effet domino, à l'origine la rupture de l'ouvrage. (Marche C. 2008), (Paquier A. 2002).

Un facteur s'avère déterminant dans le choix des scénarios de rupture; les apports hydrologiques au site. En effet, l'état initial du bassin et des cours d'eau, l'état de mobilisation des exploitants et l'état de préparation à l'urgence des populations ne sont pas les mêmes lors d'une belle journée ensoleillée et après plusieurs jours de pluies diluviennes. (Marche C.2008)

Un seul scénario suffit généralement pour donner un portrait assez précis du développement de la situation associé à rupture en apports hydrologiques normaux. Il permet de comparer cette situation aux ruptures éventuelles attribuables au premier remplissage d'une nouvelle retenue, à un séisme ou à un acte de malveillance sur un ouvrage plus ancien. (Marche C. 2008)

Deux concepts sont à définir avant d'aborder les ruptures en période de crues, souvent liée à un manque de capacité effective au site : la crue de première rupture et les conséquences différentielles.

La crue de première rupture d'un aménagement est une crue dont l'hydrogramme des apports introduits au réservoir et laminés par celui-ci conduit à l'atteinte de la première condition de rupture sur l'un des ouvrages de l'aménagement. (Marche C. 2008)

On nomme conséquences différentielles de rupture l'augmentation des conséquences engendrées par la rupture par rapport aux conséquences qu'aurait eues la même crue dans la vallée s'il n'y avait pas de barrage. (Marche C. 2008)

Les scénarios de rupture en période de crue sont déterminés après une analyse hydrologique préalable portée sur le bassin versant alimentant la retenue, cette analyse permet de déterminer les hydrogrammes des crues de faibles périodes de retour. Le laminage de ces crues selon le plan de gestion de l'ouvrage permet d'établir la crue de première rupture, appelée aussi la crue de sécurité de l'aménagement.

Le premier scénario de rupture hydrologique à considérer est celui d'une crue supérieure de quelques mètres cubes par seconde à la crue de première rupture, et ce, pour deux raisons.

D'abord, c'est cette crue qui causera les plus forts dommages différentiels en aval; en outre, dans un calcul de risque conventionnel, elle aura la probabilité qui contribuera le plus à risque total de rupture. On étudie ensuite les écoulements de la crue naturelle combinée à la rupture le long de la vallée jusqu'en un point où les apports seront redevenus sans conséquence. (Marche C. 2008)

II.3.4. Modélisation de la rupture

II.3.4.1. Initiation de la crue de rupture à l'ouvrage

L'effacement d'un barrage peut être plus ou moins brusque. C'est essentiellement la nature du barrage qui conditionne l'allure de sa rupture potentielle, plus encore que les causes de cette rupture. (Marche C. 2008),

C'est ainsi qu'un barrage en béton est susceptible de se rompre quasi instantanément, comme une porte qui s'ouvre. Les ruptures des barrages-poids se produisent par renversement ou par glissement d'un ou plusieurs plots. Pour les barrages à contreforts, il est possible d'imaginer qu'un seul plot s'efface instantanément. Mais il est ensuite raisonnable de penser que les autres plots s'effacent rapidement, comme un château de cartes. Pour les barrages-voutes, le mécanisme de rupture le plus courant est la perte d'appui ou de fondation, l'effacement total et instantané est l'hypothèse la plus probable. (Marche C. 2008)

A l'opposé, la rupture d'un barrage en remblai ne peut pas être instantanée, car elle est due à des phénomènes d'érosion. Les accidents recensés à ce jour font état de modes de destruction, soit par suite d'un renard apparu dans le corps de l'ouvrage ou dans sa fondation, soit par déversement et érosion de la crête et du parement aval dû à une crue ou à l'onde de rupture d'un barrage amont (Marche C. 2008), ces deux modes de rupture supposent l'arrachement progressif et le transport des éléments constitutifs de l'ouvrage par les écoulements et donc un démarrage assez lent et une accélération progressive pour parvenir à un équilibre dicté par le comportement de la retenue et les apports qui l'alimentent. La rupture du barrage Teton illustre ce type de rupture par érosion interne du corps de l'ouvrage.

II.3.4.2. Prévision des paramètres de la brèche

Pour estimer les conséquences d'une rupture de barrage pour un scénario choisi, on doit en premier lieu modéliser le processus de la rupture elle-même et la formation de l'écoulement au droit de la digue (Paquier A. 2002). Il est essentiel de connaître au droit du barrage, la géométrie de la brèche, le temps de formation de la brèche ainsi que le débit maximal à l'ouvrage.

Plusieurs formules sont disponibles dans la littérature pour estimer ces paramètres, elles ont été généralement développées sur la base de données de laboratoire et de cas réels observés de rupture de grand barrage:

Les travaux théoriques de Ritter, supposant une retenue infinie et une rupture instantanée, donnent une première estimation du débit maximal à la brèche:

$$Q_{\max} = 0.81 * L * H_0^{1.5} \quad (\text{II.1})$$

Avec:

L = largeur constante de l'ouvrage s'effaçant, en mètres

H_0 = profondeur initiale d'eau en amont.

Les formules de Costa (II.2), de Molinaro (II.3) et de Lempérière (II.4) (pour des matériaux de petites dimensions et de cohésion nulle) relient la hauteur H du barrage (m) et le volume V de la retenue (m^3) au débit maximal à la brèche Q_{\max} (m^3/s).

$$Q_{\max} = 0.116 * (g * H)^{0.5} * H^2 * (V/H^3)^{0.22} \quad (\text{II.2})$$

$$Q_{\max} = 0.7 * \sqrt{g * H} * H^2 * \sqrt{V/H^3} \quad (\text{II.3})$$

$$Q_{\max} = 325 * (H * V / 10^6)^{0.42} \quad (\text{II.4})$$

Le temps nécessaire pour atteindre le débit maximal peut être estimé à l'aide de la formule (5.2) :

$$T = 10 * V^{0.5} * g^{-0.5} * H$$

La formule de Hagen fait intervenir les mêmes paramètres, mais en unité impérial : H' (pi), V' (acres-pieds) et Q'_{\max} (pi³/s)

$$Q'_{\max} = 370 * \sqrt{V' * H'^2} \text{ (II.5)}$$

Les formules du U.S. Bureau of Reclamation (1982) (7.2) et Evans(1986) (8.2) mettent en-avant l'importance des caractéristiques du réservoir dans l'évaluation du débit maximal de rupture :

$$Q_{\max} = 75 * D^{1.85} \text{ (II.6)}$$

Avec Q_{\max} en pi³/s

D : profondeur du réservoir (pi)

$$Q_{\max} = 0.072 * V^{0.53} \text{ (II.7)}$$

Avec Q_{\max} en m³/s, V : volume du réservoir (m³)

Mac Donald et Langridge-Monopolis (1984) relie le débit maximal à la brèche Q_{\max} (m³/s), la hauteur d'eau H_w dans le réservoir au dessus de la brèche (m) et le volume dans le réservoir V_w au moment de la rupture (m³) :

$$Q_{\max} = 1.175 (H_w * V_w) \text{ (II.8)}$$

Singh fait intervenir les rapports H_s/H et H_s/B_m dans l'évaluation de la forme de la brèche, du débit maximal de rupture et du temps pour l'atteindre :

$$H_s = V^{0.33} \text{ (II.9)}$$

Avec

H_s : hauteur de l'ouvrage

B_m : largeur moyenne de la brèche

B : largeur au sommet de la brèche

d : profondeur de la brèche

Il propose

$$B/d=0.4H_s/H \text{ (II.10)}$$

$$Q_{\max}/(gB_m^2H^3)^{0.5}=0.0125H_s/H \text{ (II.11)}$$

$$T(g/h)^{0.5}=1.5H_s/B_m \text{ (II.12)}$$

L'étude du développement de la brèche dans les ouvrages en remblai pour différents mécanismes de rupture révèle une forme de brèche triangulaire ou trapézoïdale de largeur moyenne :

$$B = 9.5K_0(VH)^{0.25} \text{ (II.13)}$$

La brèche se développant en un temps T :

$$T = 0.59^{0.47} H^{0.9} \text{ (II.14)}$$

Avec B : largeur moyenne de la brèche (pi)

T : durée de formation de la brèche (h)

V : volume d'eau dans la retenue (acres-pieds)

H : hauteur d'eau de la retenue (pi)

K_0 : coefficient égal à 1 pour une rupture par submersion et égal à 0.7 pour une rupture par érosion interne

On obtient alors le débit maximal (pi^3/s) par la formule suivante :

$$Q_{\max} = 3.1B \frac{C}{T+C\sqrt{H}} \text{ (II.15)}$$

Avec (1.16)

$$Q_{\max}=23.4 * A/B \text{ (II.16)}$$

Où A est la surface au miroir du réservoir à l'élévation du sommet du barrage (acres-pieds).

Les formules de Froehlich (18.2), (19.2), (20.2) établies pour les barrages en remblai en étudiant 63 cas réels proposent :

$$B_m = 0.1803K_0V^{0.32}h_b^{0.19} \text{ (II.17)}$$

$Z=0.9$

$$T = 0.00254V^{0.53}h_b^{-0.9} \text{ (II.18)}$$

Où

V : le volume de la retenue

K_0 : égal à 1.4 pour un déversement sur la crête et égal à 1 dans les autres cas.

Le débit maximal de l'onde de crue est donné par la formule suivante :

$$Q_p = 0.607V_w^{0.295}h_w^{1.24} \quad (\text{II.19})$$

II.3.5. Prévision de la propagation de la crue de rupture

La prévision de la propagation de la crue de rupture peut être abordée de multiples manières. Selon le cas, on aura recours aux approches théoriques, aux modèles numériques, aux similitudes sur modèle réduit et aux essais en nature, compte tenu des particularités du site, des objectifs visés et des ressources disponibles.

Dès le 19^e siècle, on a développé les équations fondamentales et des solutions théoriques exactes du problème du bris de barrage, on les a améliorées jusqu'en 1970 environ. Ces équations désormais appelées « de Barré de Saint-Venant », sont encore aujourd'hui d'une extrême importance en hydraulique maritime ou fluviale et en particulier dans les études de propagation de crue de rupture de barrages, cependant l'utilisation des solutions théoriques pour les résoudre est de plus en plus limitée en raison de l'émergence et de la croissance rapide des capacités de traitement et de résolution numériques. (Hervouet J. M. 2003)

Le recours à la modélisation numérique de la propagation des crues de rupture devient de plus en plus incontournable eu égard à leur capacité de prendre en compte le mode de rupture de l'ouvrage, la forme détaillée du cours des et des affluents, les effets aux frontières ainsi que les différents phénomènes produits par les diverses singularités rencontrées le long de la vallée. Cependant, alors qu'une formule simple ne comporte que deux ou trois facteurs et un nombre de données réduit, les modèles numériques nécessitent, pour produire des résultats à la hauteur de leurs capacités, un grand nombre de données de qualité. La collecte de ces données peut générer des coûts inconciliables avec les objectifs de l'étude. (Marche C. 2008)

Lorsque la vallée est trop accidentée ou bien a une pente trop forte les équations de Barré de Saint-Venant ne sont plus représentatives et il faut réaliser un modèle physique en similitude de Froude en général à l'échelle de géométrie 1/500 sans distorsion, ce qui permet de conserver le même régime d'écoulement turbulent sur le modèle et en nature. Les modèles physiques nécessitant plus de temps et de ressources comparés aux autres techniques sont réservés à l'étude de zones particulières où les outils numériques s'avèrent moins fiables.

Depuis quelques années, le démantèlement de quelques anciens barrages a permis aux groupes de recherche de faire des essais de rupture contrôlée (Projet IMPACT Breach Modelling Program, 2001-2004 en particulier) après instrumentation appropriée de l'ouvrage et de la vallée. Une technique se portant sur des cas plus représentatifs des situations réelles et donc peut apporter des données très importantes, cependant peu employée, car elle est très spécifique et orientée vers la validation des autres outils. (Marche C. 2008) (Paquier A. 2002)

II.4. Conclusion

La prévision du processus de rupture au droit d'un barrage ainsi que celui de la propagation de l'onde de rupture dans la vallée située en aval sont des étapes importantes de l'étude de sécurité d'un ouvrage. Pour chacun des scénarios de rupture initialement retenus, ils permettent de dresser un portrait hydraulique des crues de rupture que l'ouvrage pourrait engendrer et de définir les zones à risque impactées par l'onde de rupture du barrage ainsi que toutes les informations nécessaires pour la création des plans d'alerte et d'intervention pour la gestion des risques qui peuvent être encourus.

Il est important de signaler que les études de rupture de barrages comportent plusieurs sources d'incertitudes qui peuvent mettre en question la validité des résultats obtenus par une analyse d'un scénario choisi, certainement les plus importants sont les valeurs paramètres retenus pour définir la brèche, en effet ces paramètres ont une incidence importante sur le débit évacué et sur l'inondation engendrée à proximité du barrage. Ces valeurs perdent progressivement de leur influence à mesure que l'onde progresse vers l'aval".

D'autres paramètres ont aussi une incidence sur la crue de rupture nous citons la forme de la vallée, les coefficients de rugosité, le volume et la forme du réservoir ... etc., il convient par conséquent avant de choisir l'outil de prévision de la propagation de l'onde résultante, reconnaître les possibilités et les limites de chaque outil et d'évaluer comment les simplifications associées à chaque outil risquent d'altérer la fiabilité de la description des événements.

III.1.Présentation du site

III.1.1.L'accès au site de l'ouvrage

L'accès au site d'El Haimeur se fait depuis Ghardaïa en suivant l'ex CW 103 jusqu'à l'entrée de Daya Ben Dahoua : à cet endroit, proche de la confluence El Abiod – El Haimeur, on traverse l'oued El Abiod puis on remonte la vallée de l'oued El Haimeur en suivant une piste de qualité médiocre.

L'accès à ce site est également possible en suivant la RN 1 en direction d'Alger sur 9 à 10 km avant d'emprunter une piste sur la gauche qui conduit dans la vallée de l'oued El Haimeur.

(voir Figure III- 1)

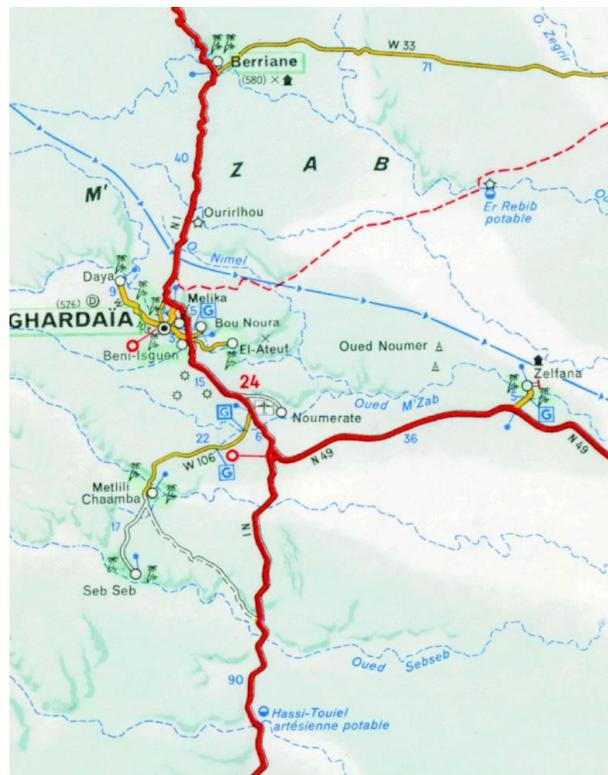


Figure III- 1: Localisation du barrage EL HAIMEUR

III.1.2.Topographie du site

Lorsque les sites d'ouvrages sur l'oued El Haimeur a été identifié au début des études préliminaires, des levés des zones des sites au 1:2.000, pour le choix de l'axe et l'implantation des ouvrages et des levés des cuvettes au 1:5.000, pour l'établissement des courbes de capacité des retenues ont été réalisés par le Bureau d'Etudes.

III.1.2.1. Bassins versants

Les coordonnées du site et la superficie du bassin versant correspondant sont portées dans le tableau ci-dessous.

Site d'ouvrage	X	Y	Z	S en Km2
ELHaimeur	561.138	3.605.862	543	385

Tableau-III- 1: Les coordonnées du site et la superficie du bassin versant

III .1.2.2. Cuvettes

La cuvette du site potentiel sur l'oued El Haimeur a fait l'objet de relevés topographiques à l'échelle 1/5.000.

III.1.2.3. description du site

Sur la branche El Haimeur, l'axe envisagé au stade des études préliminaires a été légèrement déplacé vers l'amont pour profiter du resserrement en rive droite que les documents topographiques à disposition lors des études antérieures ne représentent pas fidèlement.

Le point bas de l'oued se situe au pied de la rive gauche, à la cote 543.5 NGA. Le profil en travers reste assez plat jusqu'à la cote 545, où la largeur est de 300 m environ. Les rives s'élèvent ensuite d'abord de manière assez douce jusqu'à la cote 548 avec une pente de l'ordre de 1V/10H puis de manière plus abrupte jusqu'à la cote 560 avec une pente de l'ordre de 1V/3H en rive droite et 1V/2,5H en rive gauche.

III.1.3.Hydrologie

III.1-3-1-Crués

L'étude hydrologique a analysé, pour un ensemble de sous-bassins de l'oued M'Zab, les valeurs caractéristiques conduisant au hydrogramme de crue de différentes fréquences.

En faisant appel à toute une série d'approches (analyse historique, paramètres caractéristiques, formules de type Myer, courbes enveloppes, lois régionales, hydrogramme synthétique, enquête de crues) cette étude a permis d'établir des lois reliant les temps de montée et de base de la crue centennale à la superficie et à la classe de relief. Elle a également fixé des relations entre le coefficient de ruissellement, la perméabilité du bassin et la classe de relief pour différentes pluies. Ces relations ont permis d'établir pour le bassin versant de barrage El Haimeur un hydrogramme de crue de diverses fréquences. (voir le tableau ci-dessous)

		Q Pointe	Volume
		[m ³ /s]	[10 ⁶ m ³]
<i>Fréquence</i>	1/10.000	1030	20.8
	1/1.000	695	15.2
	1/100	399	8.0
	1/50	303	6.1
	1/20	209	4.2
	1/10	145	2.9

Tableau-III- 2 : Crués de diverses fréquences du barrage El Haimeur

III.1.3.2.Apports solides

La concentration en matières solides et le charriage sur le fond de l'oued M'Zab n'ont pas fait l'objet de mesures directes. L'étude hydrologique s'est référée en conséquence à des mesures faites sur des bassins arides ou semi-arides dans d'autres régions en appréciant les différences possibles avec le M'Zab au niveau de l'érodabilité du bassin versant (topographie et géologie). Cette étude a ainsi conduit à proposer une concentration moyenne de 5g/l de matières solides en suspension et à un charriage de fond équivalent en poids au transport en suspension.

L'évaluation des apports liquides a été faite en ne considérant que les pluies dont l'intensité est suffisante pour provoquer un écoulement et en appliquant à ces pluies un coefficient de ruissellement inférieur à 1. Selon les conclusions de l'étude hydrologique sur les précipitations, seules les pluies journalières supérieures à 7.5 mm, qui représentent 50 % des

précipitations totales (70 mm/an), soit environ 35 mm/an, déclenchent un écoulement ; au niveau des intensités, ce sont les pluies d'intensité moyenne supérieure à 2 mm/h, et de hauteur supérieure à 5 mm, soit environ 30 mm/an, qui sont susceptibles de déclencher un écoulement. Le coefficient de ruissellement pour une pluie centennale et une superficie de 100 km² est de 50 % environ. Ce coefficient diminue pour des événements pluvieux plus fréquents et pour des superficies de bassin versant plus grandes.

Pour un calcul prudent de ces apports solides, on a finalement retenu une hauteur de précipitation annuelle conduisant à un écoulement de 35 mm et un coefficient de ruissellement de 50 %. Ces valeurs définissent un apport de matières en suspension pendant une durée de 50 années de :

$$MES50 \text{ en T} = S_{km^2} \times 50 \% \times 35 \text{ mm} \times 5 \text{ g/l} \times 50 \text{ années}$$

L'application au bassin du site sur l'oued El Haimeur est présentée dans le tableau ci-dessous: les valeurs calculées ont ensuite été quasiment doublées pour tenir compte des incertitudes liées à ce type d'évaluation, une seule crue "historique" étant susceptible d'entraîner à elle seule un volume de matériaux équivalent à 10 ou 20 années moyennes.(voir le tableau ci-dessous)

Bassin	Superficie Km ²	Apports liquides annuels Mio m ³	Transport solide annuel tonne		Transport solide totale 50 ans		Valeur adoptée
			Suspension Tonne	Chariage tonne	Poids tonne	Volume m ³	Volume Mio m ³
Barrage El Haimeur	385	6.7	33.688	33.688	3 368750	2 113725	4.0

Tableau-III- 3:Apports solides au site du barrage El Haimeur

III.1.3.3.Résultats du laminage des crues

III.1.3.3.1.Passage de la crue centennale : calage et dimensions de l'ouvrage de vidange.

Pour ce site, les conditions de passage de la crue centennale ont été simulées avec trois calages altimétriques de l'ouvrage de vidange. Pour chacune de ces simulations, les dimensions du puits ont été déterminées par approximations successives pour que le débit maximum sortant corresponde aux objectifs fixés. Les résultats de ces simulations sont récapitulés dans le tableau ci-après. (voir le tableau III-4)

Pour El Haimeur, la cote du fond de la vallée est approximativement à 544 NGA et le niveau théorique d'envasement total est de 549.5 NGA environ. Trois cotes de calage de vidange ont été testées : 546, 548 et 549.5 NGA.

Cote	Cote maximale plan d'eau
[NGA]	[NGA]
546	555.76
548	555.78
549,5	555.82

Tableau-III- 4:Crue 1:100 El Haimeur – niveau max du plan d'eau en fonction de la cote de calage de la VF

Il faut signaler qu'une obstruction accidentelle de l'ouvrage de fond au cours d'une crue n'aurait pas de conséquence immédiate sur la sécurité des ouvrages : en effet les cotes et débits maximaux obtenus dans ces conditions sont présentés dans le tableau ci-dessous pour quelques largeurs de déversoir :

	Longueur de déversement [m]	Débit max [m3/s]	Cote max plan d'eau [NGA]
El Haimeur	80	21.4	556.09
	100	24.3	556.07
	120	26.9	556.06

Tableau-III- 5:Situation en cas d'obstruction de la vidange de fond

Il faudrait cependant en cas d'obstruction accidentelle intervenir rapidement de façon à reconstituer la capacité de laminage et ne pas trop solliciter les organes de drainage des ouvrages.

En conclusion les cotes retenues pour le calage des pertuis de vidange et les cotes de retenue normale des trois ouvrages de laminage sont présentées dans le tableau ci-dessous :

	Cote section vidange de fond [NGA]	Cote entrée VF [NGA]	Cote seuil de crues [NGA]
El Haimeur	546	548	555.76

Tableau-III- 6:Calage retenu pour la vidange de fond et le seuil de l'évacuateur de crues

Pour illustrer le comportement de la retenue et les conditions de charge hydraulique auxquelles sont soumis les ouvrages lors d'une crue centennale (en particulier vis-à-vis des problèmes d'infiltration et de saturation), on présente ci-dessous d'une part un tableau

indiquant les durées et les vitesses de montée et de descente du plan d'eau ainsi que des graphiques représentant la durée pendant laquelle une cote donnée est atteinte ou dépassée par le plan d'eau.

	Montée		Descente		
	Durée	Vitesse Moyenne	Durée	Vitesse moyenne	Vitesse Pointe
	[heures]	[m/s]	[heures]	[m/s]	[m/s]
El Haimeur	15	$2.2 \cdot 10^{-4}$	117	$1.8 \cdot 10^{-5}$	$2.7 \cdot 10^{-5}$

Tableau-III- 7:Crue centennale – caractéristiques de la montée et la descente du plan d'eau

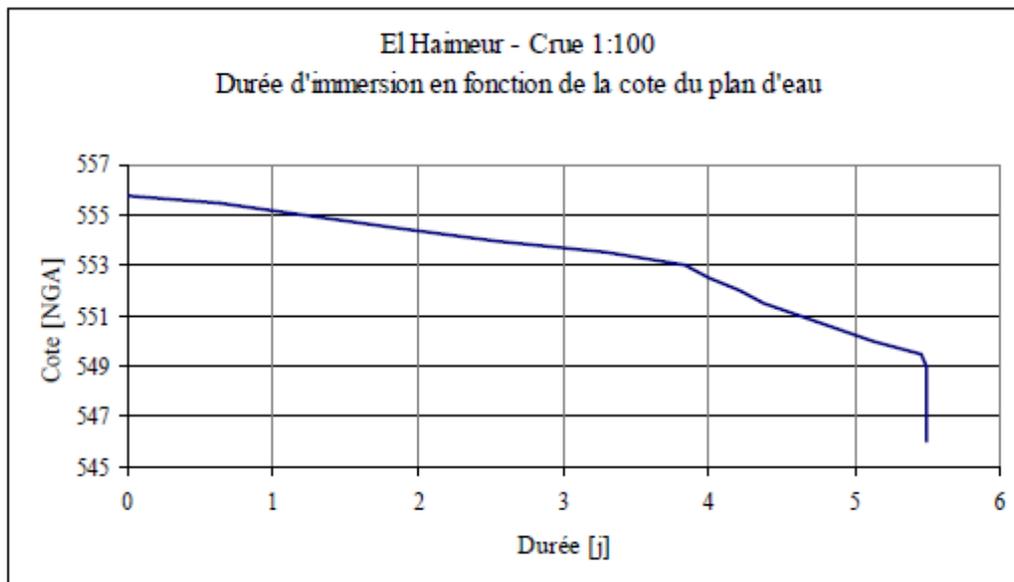


Figure III- 2 : EL HAIMEUR-Crue 1:100 Durée d'immersion en fonction de la cote du plan d'eau

III.1.3.3.2. Passage de la crue 1:10.000 avec différentes longueurs déversantes

Les cotes maximales du plan d'eau atteintes pour la crue décennale avec diverses largeurs du seuil déversant sont portées dans le tableau qui suit.

L déversoir [m]	Cote max. [NGA]
50	558.4
60	558.3
80	558.1
100	557.9
120	557.8
140	557.6
160	557.6
180	557.4
200	557.4

Tableau-III- 8:El Hameur - Résultats du laminage de la crue 1:10.000

Des mètres de la digue d'El Hameur pour différentes hauteurs, il ressort que la variation du volume de remblai par centimètre de hauteur au voisinage de la cote prévisionnelle de crête est de 360 m³ / cm. Pour l'évacuateur de crues, la longueur développée d'amont en aval, en intégrant soit un bassin d'amortissement, soit une cuillère de rejet,

On constate que pour des longueurs comprises entre 50 et 100 mètres, et même jusqu'à 120 mètres, on reste proche de l'optimum économique. Les choix définitif de la longueur déversante sera donc guidé par les considérations relatives au débit unitaire et à l'effet de laminage de la crue exceptionnelle, dont le débit de pointe naturel est de 1030 m³/s : ces caractéristiques sont présentées dans le tableau ci-après.

L déversoir	Q _{max}	Laminage	q max unitaire	Charge de déversement
[m]	[m ³ /s]	[%]	[m ³ /s/ml]	[m]
50	310	30%	6.2	2.7
60	344	33%	5.7	2.5
80	401	39%	5.0	2.3
100	446	43%	4.5	2.2
120	480	47%	4.0	2.0
140	508	49%	3.6	1.9
160	532	52%	3.3	1.8
180	552	54%	3.1	1.7
200	571	55%	2.9	1.6

Tableau-III- 9:El Hameur - Résultats du laminage de la crue 1:10.000

Sur la base des éléments rappelés dans le tableau ci-dessus, il est proposé de retenir une longueur de seuil déversant de 100 m de longueur qui constitue un bon compromis vis-à-vis de l'optimum économique et de l'efficacité du laminage et vise à limiter le débit unitaire.

III.1.3.3.3. Résultats du laminage de la crue 1:1.000

Avec les longueurs déversantes déterminées ci-avant, le passage de la crue de fréquence milléniales aux trois sites correspond aux conditions présentées dans le tableau ci-dessous :

Barrage	Qmax [m ³ /s]	Zmax [NGA]	Laminage [%]	q max unitaire [m ² /s]	Charge de déversement [m]
El Haimeur	179	556.9	26	1.8	1.2

Tableau-III- 10:Résultats du laminage de la crue 1:1.000

III.2.Dimensionnement du modèle

III.2.1. Description de l'ouvrage

Il s'agit d'une digue conçue pour lutter contre les crues en minimisant le risque des inondations qui constituent de réels danger, pour les habitants, les palmeraies et les terres agricoles, sis à l'aval. La digue est construite en matériaux en terre.

III.2.2.Dimensions du prototype

Le modèle réduit prend en compte le réservoir du barrage, les différents ouvrages qui composent le barrage et l'aval du barrage qui s'étend jusqu'à la ville de GHARDAIA.

Les dimensions du prototype et les différentes dimensions du digue ainsi que du réservoir et de la partie aval sont présentées dans les tableaux ci-dessous :

Longueur L (m)	430
Hauteur H (m)	20
Largeur l (m)	110

Tableau-III- 11:Dimensions de la digue d'El Haimeur

	Réservoir	Partie aval
Superficie S (km ²)	3.5	220.8
Longueur L (km)	6	24
Largeur l (km)	0.6	9.2

Tableau-III- 12:Dimensions du réservoir et de la partie aval du barrage



Figure III- 3:la digue d’El Haimeur

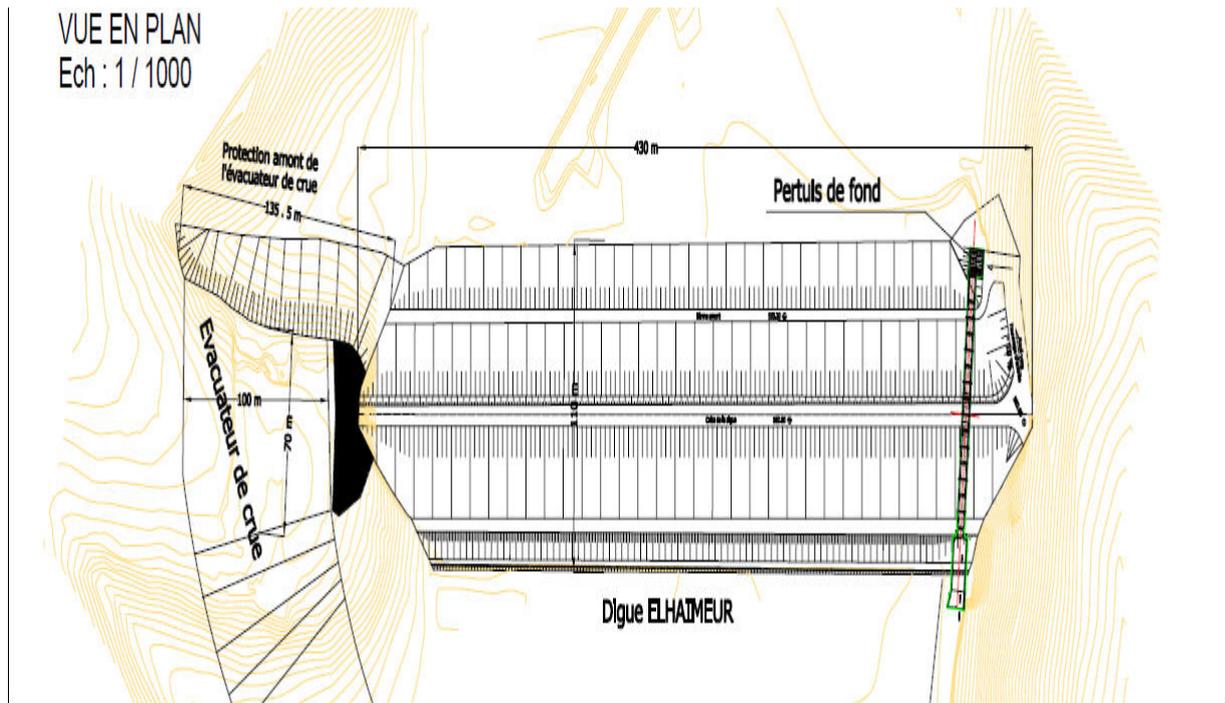


Figure III- 4: vue en plan de la digue El Haimeur

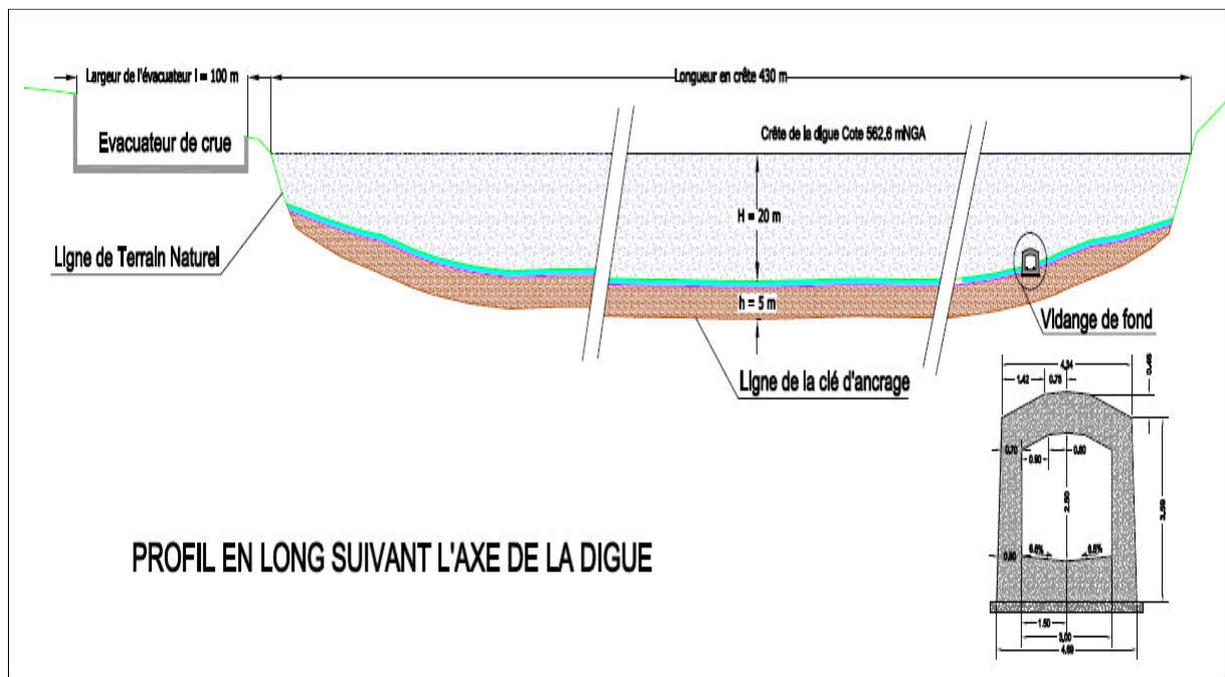


Figure III- 5: profile en long suivant l'axe de la digue

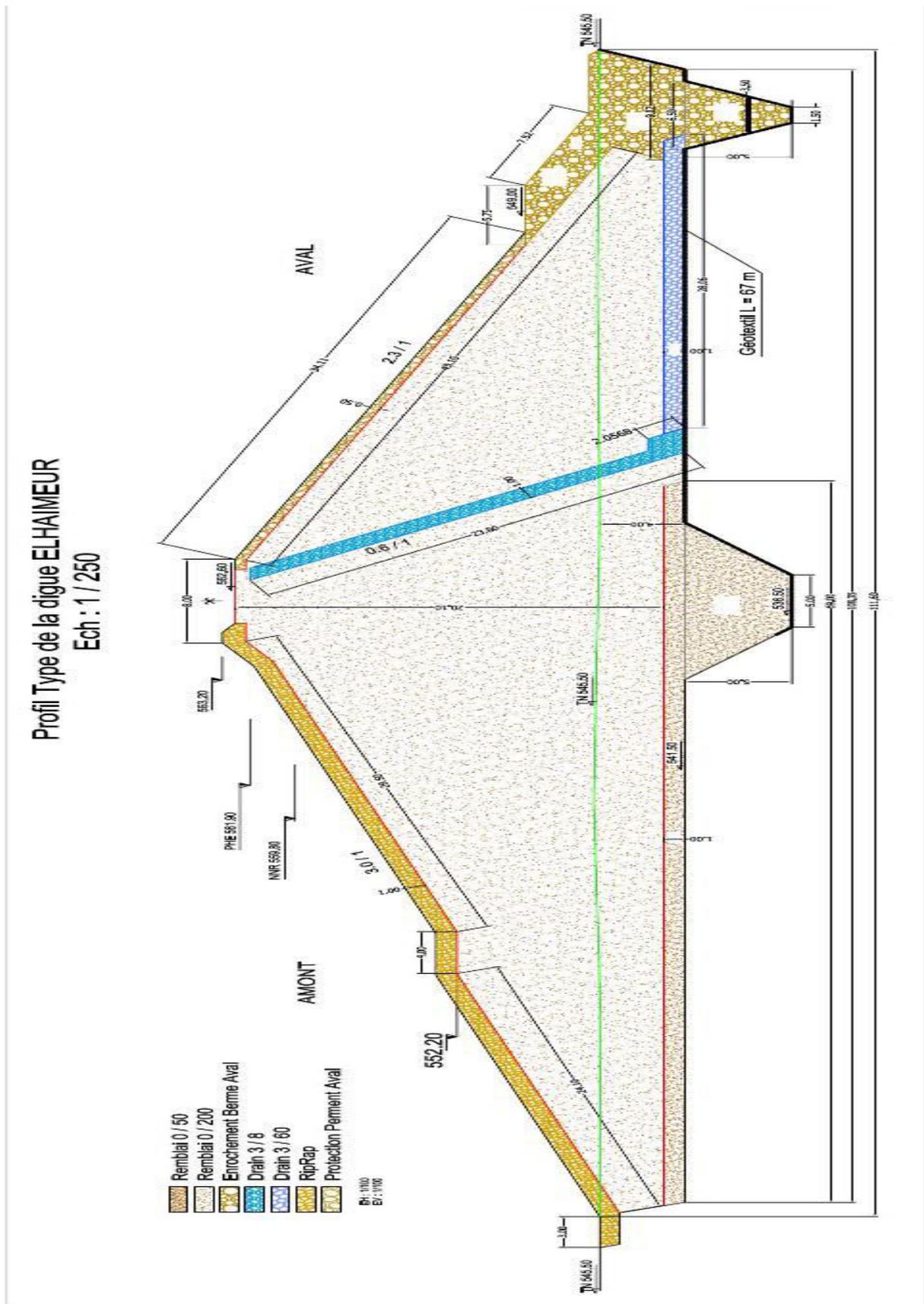


Figure III- 6:profil type de la digue El Haimeur

III.2.3.Définition des paramètres de la brèche

Pour le calcul des différents paramètres de la brèche du barrage on va utiliser la méthode du Froehlich (2008)

III.2.3.1.Calcul de la largeur moyenne de la brèche

$$B_{ave} = 0.27 K_0 V_w^{0.32} h_b$$

Avec :

Bave = La largeur moyenne de la brèche

K₀ = constant (1.3 pour le surverse)

V_w = le volume du réservoir

h_b = la hauteur finale de la brèche

III.2.3.2.Définition de la hauteur de la brèche

La hauteur totale de la brèche est calculée en assumant que la brèche va de la crête du barrage jusqu'au niveau du sol naturel et prend ainsi la valeur de la hauteur totale du barrage qui est de 20 mètres

III.2.3.3.Définition du temps de rupture du barrage

Selon Froehlich le temps de rupture est défini comme suite :

$$t_f = 63.2 \sqrt{\frac{V_w}{gh_b^2}}$$

Avec

t_f = temps de formation de la brèche

g = la force de pesanteur

Sachant que la forme de la brèche est trapézoïdale , on prend en considération trois cas possibles en variant la hauteur d'eau de la surverse , on résume donc les paramètres de la brèche comme suite :

h (m)	B avg (m)	Bb (m)	Tf (h)	Btop (m)	Zb
23	70.89	56.90	0.93	84	0.7
24	94.49	80.50	1.46	108	0.7
25	98.75	84.76	1.56	112	0.7

Tableau-III- 13:Résumé des paramètres de la brèche du barrage

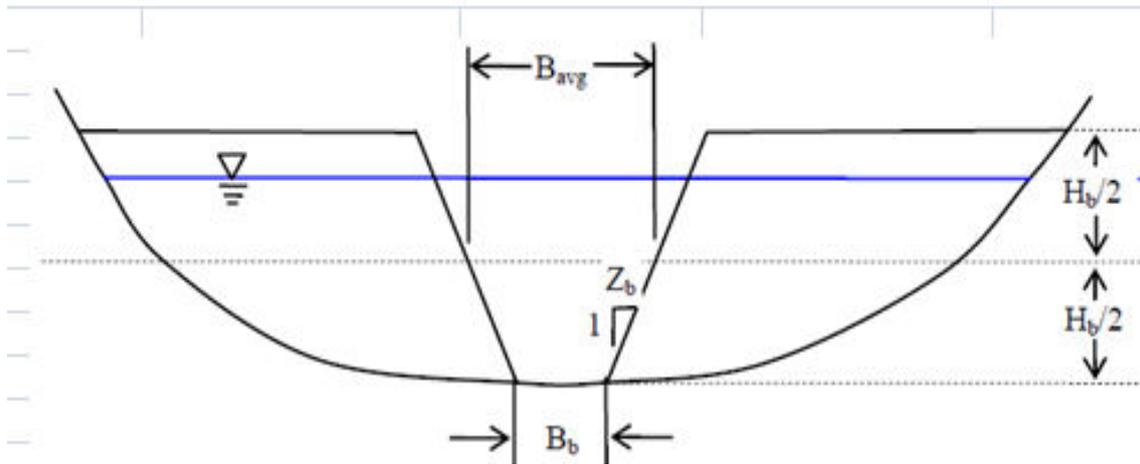


Figure III- 7: les paramètres de la brèche

III.2.4.Calculs des dimensions du modèle réduit :

Après avoir fait différents calculs pour le choix de l'échelle finale, le choix est tombé sur :

Paramètres	Symbole	Échelle
Longueur	K_L	1/2000
Largeur	K_l	1/2000
Hauteur	K_h	1/200
Débit	K_Q	$K_h^{3/2} * K_L = 1.76 * 10^{-7}$
Vitesse	K_v	$\sqrt{K_h} = 0.07$
Temps	K_t	$\sqrt{K_h} = 0.07$
Surface	K_s	$K_L * K_h = 2.5 * 10^{-6}$
Volume	K_{vol}	$K_L * K_l * K_h = 10^{-9}$
Pente	K_I	$\Delta z x = 10$
Rugosité	K_η	$K_h^{2/3} * K_L^{-1/2}$

Tableau-III- 14:Rapports d'échelle pour le modèle

Après l'application de l'échelle choisie sur les dimensions du prototype les dimensions du modèle seront comme suit :

Réservoir					
Prototype			Modèle		
S (sq km)	L (km)	l (km)	s (sq m)	L (m)	l (m)
3.5	6	0.6	8.75	3	0.3
B.V aval					
Prototype			Modèle		
S (sq km)	L (km)	l (km)	s (sq m)	L (m)	l (m)
220.8	24	9.2	55.2	12	4.6
Barrage					
Prototype			Modèle		
H (m)	L (m)	l (m)	H (cm)	L (cm)	l (cm)
20	430	110	10	21.5	5.5

Tableau-III- 15: Valeurs des caractéristiques de modèle et de prototype

IV.1. Introduction

De nombreux projets, de nos jours, sont étudiés à partir de modèles aux dimensions réduits qui permettent de conduire des études que l'on ne saurait effectuer sur l'objet, le site grandeur nature. La construction de ces modèles réduits, après les calculs et le dimensionnement, passe par des étapes principales :

- Le choix de méthode de construction, avec un plan de travail bien défini.
- La collection des matériaux de construction.
- La mise en place et la réalisation du modèle réduit.

Après construire le modèle suivant ces étapes, le modèle sera prêt pour les essais techniques.

IV.2. But de travail

Le travail attribué consiste à évaluer les dégâts causés par l'inondation en cas de rupture de barrage EL-HAIMEUR (Ghardaïa) , et informer les autorités pour prendre des mesures sérieuses afin de protéger la populations et la zone urbaine de toutes sortes de risques provoqués par la rupture du digue étudiée.

IV.3. Plan de travail

Selon les moyens disponibles, on a choisis une méthode simple qui consiste a construire le modèle en 3 parties principales :

- le corps du barrage,
- le bassin versant qui contient les deux cotés ; amont et aval du barrage,
- la zone urbaine située dans le coté aval du barrage.

IV.4. Les matériaux de construction :

Généralement les matériaux utilisés pour la construction de modèle sont souvent disponibles localement :

- Caoutchouc
- Plâtre
- Ciment

- Bois
- Matières plastiques

Afin de réaliser notre modèle, les matériaux qu'on a choisis seront groupés selon les parties du modèle

- Le corps du barrage : en bois
- Le réservoir et le cours d'eau (l'amont et l'aval du barrage) : en sable, brique, ciment et plâtre
- Les bâtiments de la zone urbaine : en papiers-maquette

IV.5. La mise en place du modèle

IV.5.1. Le corps du barrage

Après avoir calculé les dimensions du modèle de corps du barrage et de la brèche (Tableau III-12, Tableau III-14), on a ramené la figure technique (Fig IV-1) chez le menuisier pour qu'il nous construise ce modèle en deux pièces facilement séparables (barrage avec sa brèche)

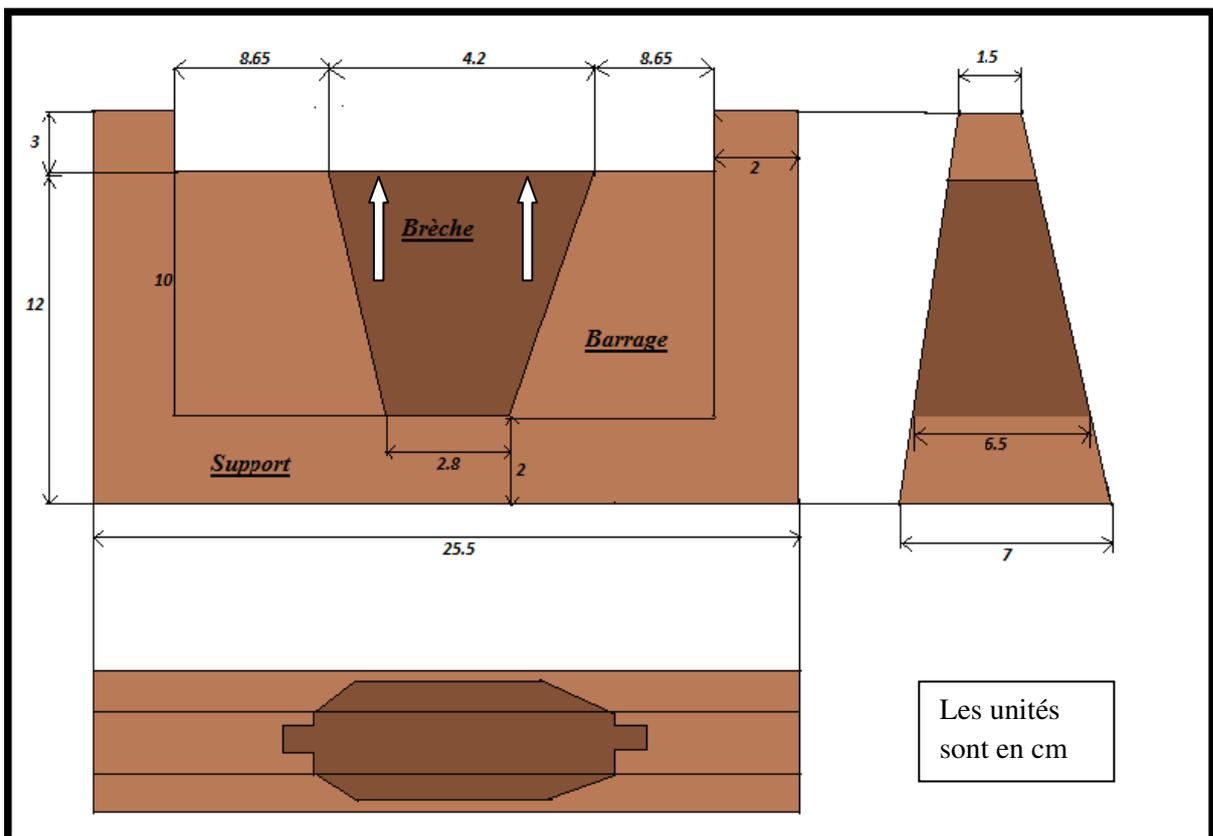


Figure IV- 1 : Schéma technique du modèle de corps du barrage

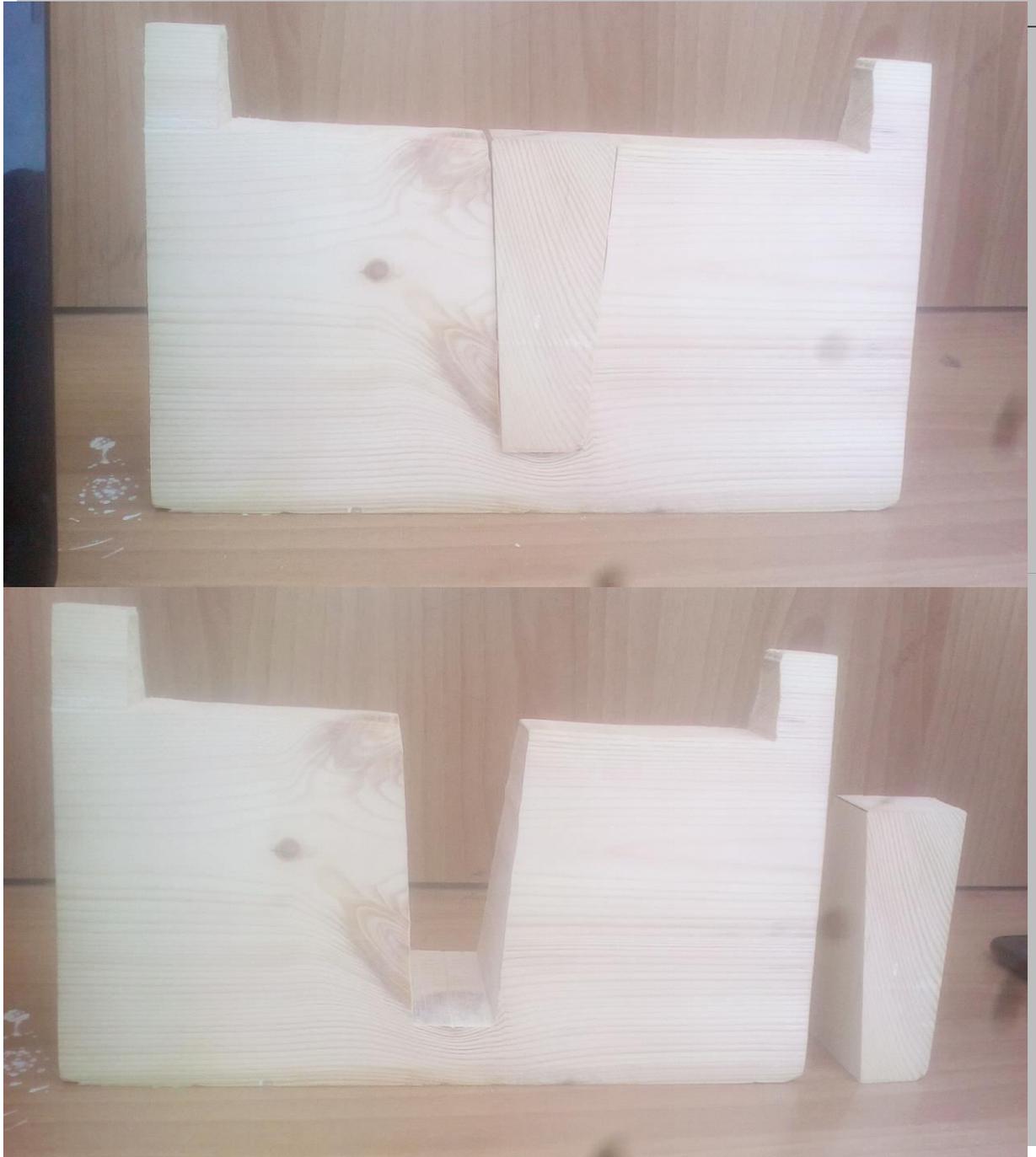


Figure IV- 2 : Photo de modèle réduit de corps du barrage

Le corps du barrage tiens sur un support de 2 cm de hauteur en bas , 3 cm en haut ,et de 2 cm des deux cotés qui sont accrochés aux deux rives de la vallée.

La brèche sera retirée manuellement durant le processus de l'essai après un certain délai calculé T_f (temps de formation de brèche)

IV.5.2. Le réservoir et le cours d'eau (l'amont et l'aval du barrage)

Avant commencer à construire la 2eme partie du notre modèle, on va d'abord trouver l'endroit approprié pour un espace de travail, il doit être plus que 50 m² de surface, pour qu'il peut contenir notre modèle dimensionné de (10x5m)

Pour la construction de cette grande partie on doit suivre les étapes ci-dessous:

- **Délimitation de l'espace de travail :**

En utilisant presque 300 briques, on va entourer l'espace de travail avec trois étages de brique avec du ciment, pour éviter les fuites, en créant un bassin (Figure IV-3) qu'il va contenir notre petit modèle de vallée et réservoir.

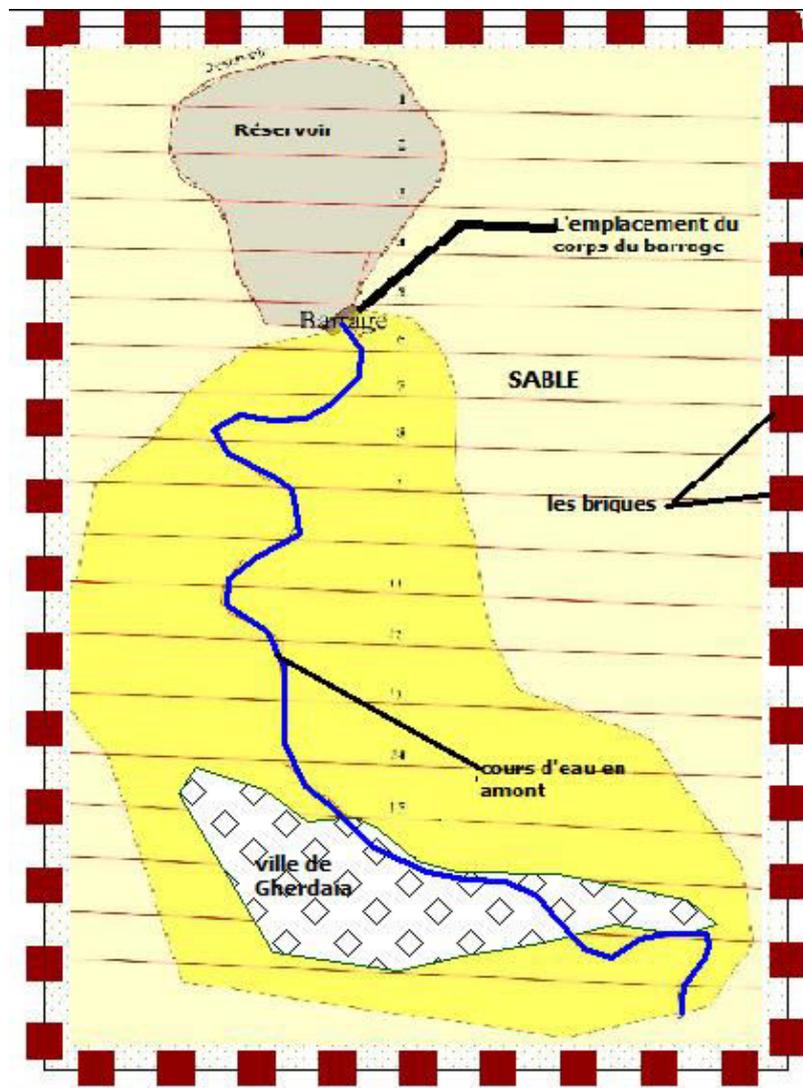


Figure IV- 3 : Schéma descriptif de modèle réduit

- **Morphologie de la vallée :**

On va verser un mélange de sable et de gravier à l'intérieure de notre bassin de brique. Après, on va former la morphologie et la topographie du terrain manuellement en se basant sur les coupes verticales qu'on a obtenues grâce à Google Earth (Annexe 1), en utilisant une règle. On va donner une forme au terrain identique à la morphologie réelle en se basant sur les coupes vertical qu'on a placé au début, et pour assurer l'imperméabilité de terrain, on va couvrir le mélange du gravier et du sable par une couche de plâtre pour éviter l'infiltration de l'eau.

- **La zone urbaine :**

On va représenter les immeubles et les bâtiments par des miniatures en utilisant Papier-Maquette.

IV.6. Les essais et mesures

Les essais qu'on a réalisés sont pour but de calculer :

- 1- la vitesse de l'eau écoulee après la rupture du barrage.
- 2- la hauteur de cette eau-là dans différentes parties du modèle réduit.

IV.6.1. Déroulement des essais

Pour l'exécution des essais on procède de la manière suivante :

- 1- en rempli le réservoir jusqu'au niveau de la crête du barrage.
- 2- on rajoute de l'eau pour avoir 5mm de hauteur (pour 1 m en réalité) au-dessus de la crête.
- 3- en ouvre la brèche en fonction du temps de rupture calculé.
- 4- en mesures la vitesse et la hauteur de l'eau.
- 5- On répète les étapes précédentes pour une hauteur de 10 mm (2 m en réalité) puis pour 15mm (3m en réalité)

IV.6.2. Mesure de la vitesse de l'eau

Vu qu'il n'y a pas de matériel adéquat disponible pour mesurer la vitesse de l'eau on a utilisé l'enregistrement vidéo pour avoir le temps qu'a pris l'eau pour se déplacer entre 2 points choisis préalablement et dont on connaît la distance, selon la loi de la vitesse :

$$V = \frac{d}{t}$$

L'enregistrement vidéo a été préféré à l'utilisation d'un chronomètre parce qu'il donne une plus grande précision. Selon le schéma suivant :

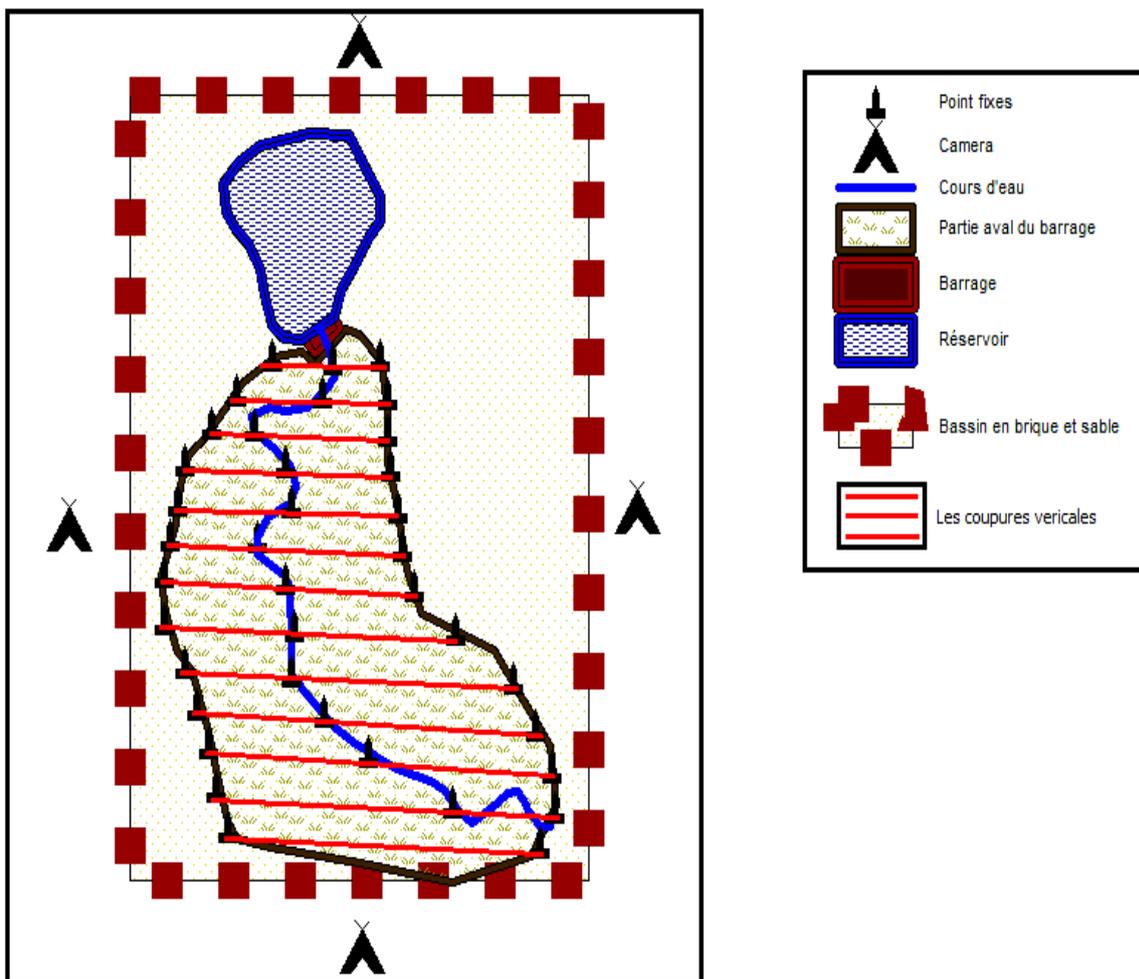


Figure IV- 4 : Schéma descriptif de la mesure de vitesse de l'eau

IV.6.3. Mesure de la hauteur de l'eau

La hauteur de l'eau a été prélevée grâce à barres colorées de 50 cm de hauteur implantées sur différentes parties du modèle comme dans les schémas qui suivent :

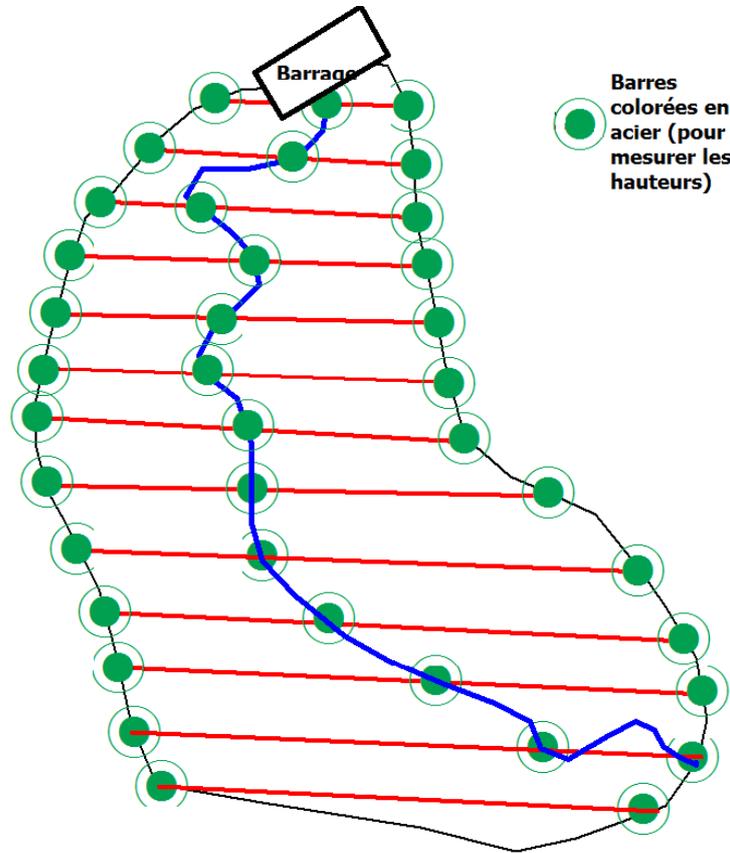


Figure IV- 5 : Schéma descriptif de la mesure de la hauteur de l'eau

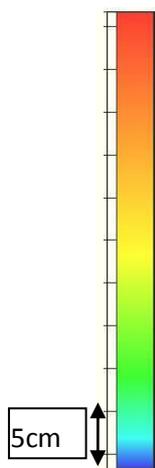


Figure IV- 6 : Barre en acier de 50 cm de hauteur

IV.7. CONCLUSION

Clausen et Clark (1990) ont élaboré un critère pour prédire les dommages causés par les inondations. Ils ont calculé les vitesses d'eau v (m / s) et les profondeurs h (m) de la défaillance du barrage Dale Dyke, Royaume-Uni 1864. Les emplacements et les dommages des structures ont été déterminés à partir des détails publiés par Harrison (1864). Clausen et Clark (1990) ont utilisé les catégories de dommages suivantes:

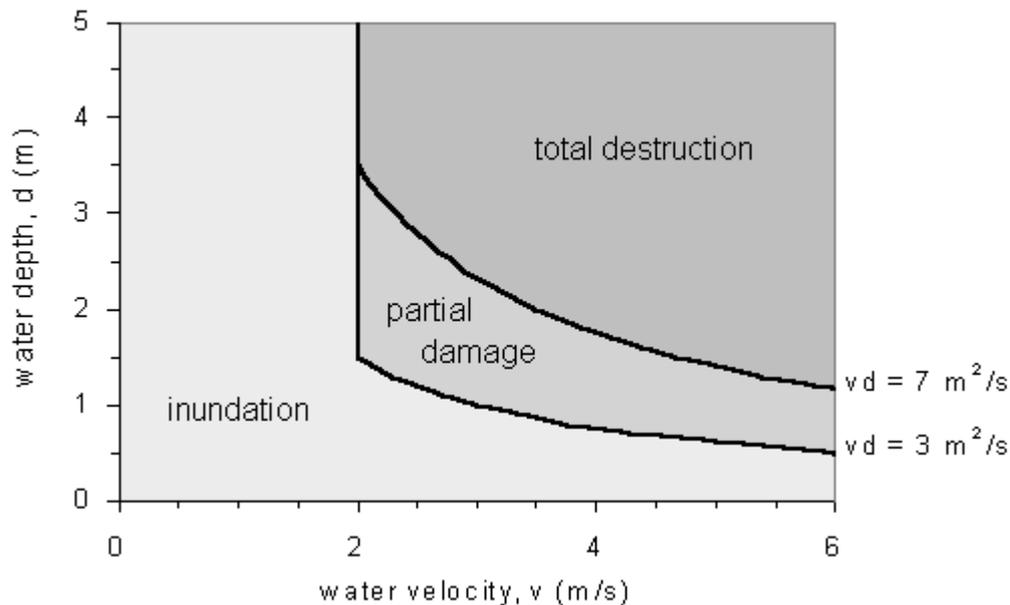


Figure IV- 7 : Critère de dommage des bâtiments en brique et en maçonnerie (basé sur Clausen et Clark 1990).

- Inondation: dommages similaires à ceux causés par une inondation naturelle de la rivière à basse vitesse. Aucun dommage structurel immédiat.
- Dégâts partiels: dommages structurels modérés, c'est-à-dire fenêtres et portes endommagés. Peu de dommages aux principaux éléments structurels du bâtiment.
- Destruction totale: effondrement structurel total ou endommagement majeur de la structure nécessitant la démolition et la reconstruction.

Le critère de Clausen et Clark (1990) est présenté à la figure IV-7. Les limites entre les catégories de dommages (inondation, dégâts partiels, destruction totale) peuvent être délimitées par des courbes de paramètre de dommage constant vh (m^2 / s). La limite entre l'inondation et le dommage partiel est de $vh = 3 m^2 / s$, la limite entre dommage partiel et destruction totale est de $vh = 7 m^2 / s$. De plus, un dommage partiel ou une destruction totale ne se produit pas si $v < 2 m / s$. (Clausen et Clark, 1990) .

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Les barrages et les retenues d'eau créés dans les vallées d'une part, jouent un rôle primordial dans le cadre de la gestion de l'eau et apportent une contribution à la qualité de vie de la société et d'autre part, constituent un danger potentiel pour les vallées à l'aval ; au cours de l'histoire, plusieurs barrages se sont rompus, provoquant l'écoulement à l'aval de la totalité du volume d'eau de la retenue avec des conséquences souvent tragiques dans la vallée.

Les préceptes tirés de ces catastrophes ont permis de réaliser de grands progrès en matière de conception, de surveillance et de sécurité des barrages. Cependant, lorsque la rupture est imminente la seule mesure qui a paru efficace c'est l'évacuation préventive des populations menacées par l'onde de rupture. L'accident du barrage de Fergoug Algérie 1927 présenté en détaille dans le chapitre II, confirme l'efficacité de cette mesure. Les autorités prévenues de la rupture inévitable du barrage ont pu évacuer à temps des milliers de personnes.

La délimitation des zones inondées en cas de rupture d'un barrage et la détermination des caractéristiques de l'onde de rupture dans ces zones sont des outils essentiels pour la préparation des mesures d'alerte et d'évacuation adéquates. Elles sont définies sur la base d'une étude de rupture du barrage, à laquelle sont jointes des cartes d'inondation. Cette étude consiste, par des méthodes reconnues, en une évaluation détaillée des conséquences de la rupture au moyen de la délimitation précise du territoire affecté et de l'identification des caractéristiques de ce territoire.

Le travail réalisé dans ce mémoire a comme objectif d'une part, d'appliquer, pour le cas du barrage el Haimeur, la méthodologie utilisée dans les études de rupture de barrage présentée dans le chapitre 2, à savoir : les causes de rupture, les différentes modalités de rupture, le choix du scénario de rupture, et la modélisation de rupture ainsi que la prévision du paramètre de brèche.

D'autre part de faire l'évaluation des dégâts et enjeux humains, matériels et environnementaux par des essais technique sur un modèle réduit calculé, dimensionné, bien détaillé et construit dans les chapitres III et IV .

Bibliographie et Références

- [1] N.M.Dehousse et R. Arnold (1971)., Les modèles réduits de structure en génie civil,
- [2] Bourgin A. (1955) Cours de calcul de barrages, Deuxième Edition, Edition Eyrolles, Paris.
- [3] Paquier A. (2002) Modélisation des écoulements en rivière en crue : pour une utilisation adaptée des équations de Saint-Venant. Document de synthèse en vue de l'obtention d'une habilitation à diriger des recherches ; université de Claude Bernard Lyon 1, 44 pages.
- [4] Djemili L., Benabelkader S., Rezgui N. et al. (2010) Étude de Rupture du Barrage Ain Dalia" Souk-Ahras-Algérie" Pour L'évaluation des Conditions de Sécurité de L'aménagement et des Dangers Potentiels en Aval. Revue Scientifique du Réseau International de Gestion des Conflits Environnementaux, 1(1), pp. 275-282.
- [5] Boussekine M., Djemili L. (2014) Hammam Grouz Dam Break analysis: Case study, Dam engineering, volume XXIV, issu 4, pp 1-15.
- [6] Remini B. (2000) L'envasement des barrages: Quelques exemples Algériens, Bulletin du Réseau Érosion, Montpellier, France, No. 20, pp. 165–171
- [7]Marche C. (2008) Barrage: crues de rupture et protection civil. Presse internationales polytechnique. Canada, 388p.
- [8]Bouhlali M. (2006) Les risques associant du barrage. Mémoire de Magistère. Université Abou Baker Belkaide, Tlemcen, 174p.
- [9]Carrère A. (2000) Bureau d'Ingénieurs Conseils COYNE et BELLIER, Techniques de l'Ingénieur, 26p.
- [10]Djemili L. (2006) Critères de choix de projet des barrages en terre: étanchéité par le masque en béton bitumineux. Thèse de doctorat. Université El Hadj Lakhdar de Batna.
- [11]La Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB) (2007), Les barrages et l'eau dans le monde, 68p.
- [12]SINGH V.P. (1996) Dam breach modeling technology. Kluwer Academy Publishers. Dordrecht, pp. 242.
- [13]Lebreton A. (1997) Prévision des risques dus aux barrages, Elsevier, Paris 16, pp108-113
- [14] Claude M. (2004) Barrage, crues de rupture et protection civiles. Presses Internationales Polytechnique, p37-40.

ANNEXES

- Les coupes verticales de site de Barrage El HAIMEUR obtenus du Google Earth

Résumé

Dans ces dernières années, les agences gouvernementales et le public dans le monde entier sont devenus beaucoup plus conscients du fait que la rupture de barrage pouvait provoquer des inondations catastrophiques et que les barrages constituaient un danger potentiel, afin d'assurer davantage de sécurité, des normes, lois et recherches ont été établis afin non seulement de diminuer le risque de rupture, mais également l'évaluation des conséquences de la rupture des ouvrages.

Un modèle réduit de barrage El Haimeur (Ghardaïa) en cas de rupture par surverse, est construit et présenté dans ce travail, pour l'étude de l'impact de propagation des ondes de rupture sur la ville Ghardaïa et ces environs dans l'aval du barrage, en basant sur les lois de similitude,

Mots clés : Modèle réduits - Similitude - Barrage - Rupture - Onde de rupture -El HAIMEUR - aval- surverse.

Abstract

In these last years, the authorities and the public in the world wide have become more aware that dams may cause catastrophic damage to human life and property if they collapse, in order to ensure greater security, laws, standards and researches were established not only to reduce the risk of dam failure but also to predict the consequences of the resulting flooding in the downstream area.

A scale model of El Haimeur dam (Ghardaïa) in case of an overtopping failure, was constructed and presented in this work, to study the impact of break waves propagation on the city of Ghardaïa and its surroundings in the downstream part of the dam , based on the similitude laws.

Keywords: scale model – similitude – dam – failure – break waves – EL HAIMEUR – downstream – overtopping.

ملخص

في السنوات الأخيرة, أصبحت الوكالات الحكومية والشعوب في جميع أنحاء العالم أكثر إدراكا لحقيقة وهي أن انهيار السدود يمكن أن يسبب فيضانات كارثية مما قد يتسبب في أضرار مادية و بشرية جسيمة . من أجل ضمان سلامة الأشخاص والممتلكات, تم وضع معايير وقوانين وإقامة بحوث ليس فقط من أجل الحد من خطر انهيار السدود, ولكن أيضا من أجل تقييم النتائج التي قد تترتب عن هذه الحوادث.

النموذج المصغر لسد الحيمر (غارداية) في حالة انهيار بالفيض , المبني و المعروف في عملنا هذا من أجل دراسة تأثير انتشار موجات الانهيار على مدينة غارداية و ضواحيها في المنطقة الواقعة بعد المصب , معتمدين في ذلك على قوانين التشابه .

كلمات البحث : نموذج مصغر – التشابه – سد – انهيار – موجات الانهيار – الحيمر – المصب

– الفيض .

