

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane MIRA de Bejaia



Faculté de Technologie
Département d'**Hydraulique**
Laboratoire de Recherche en Hydraulique Appliquée et Environnement (LRHAE)

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par :

Mr : Touazi Hanibal

M^{lle} : Menai Dahbia

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

Option : **Ouvrages et aménagements hydraulique**

INTITULE :

**Contribution à l'étude par modèle réduit des conditions
d'écoulement de l'évacuateur de crue du barrage Kerzaz
(Bechar).**

Soutenu le **17 / 09 / 2015** Devant le jury composé de :

- Président : Mr : IKNI.T
- Promoteur (s) : Mr : HADDAD.S
- Examineur (s) : Mr : AMIROUCH.A

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail on tient vivement à exprimer notre gratitude à ceux qui de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Qu'ils trouvent ici toute notre reconnaissance.

Monsieur HEDDAD.S qui a accepté de nous encadrer. Il a suivi, examiné et dirigé avec patience et rigueur notre travail. Ces conseils, son esprit de synthèse, et sa sympathie nous ont été bénéfiques pour la réalisation de ce travail, qu'il trouve ici l'expression de notre gratitude.

Nos parents, qui nous ont apportés tout le soutien et l'aide escomptés, on leurs dis: merci.

Tous LES ENSEIGNANTS DU DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUUE d'abord, pour leurs gentillesse, leurs générosités, ainsi que leurs disponibilités, en dépit de leurs nombreuses occupations et aussi pour leur disponibilité et leur serviabilité. .

Et à tous nos ami(e) s.

SOMMAIRE

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des symboles

Introduction générale :.....1

Chapitre I : Généralités

I.1 introduction :.....2

I.2 Analyse dimensionnelle :.....2

I.2.1 Théorème de Buckingham ou théorème des π :.....3

I.2.2 Produit sans dimension en hydraulique :.....4

I.3 Similitude hydraulique :.....4

I.3.1 lois de similitude mécanique :.....4

I.3.1.1 Similitudes géométrique :.....4

I.3.1.2 Similitudes cinématique :.....5

I.3.1.3 Similitude dynamique :.....5

I.3.1.3.1 La force d'inertie :.....5

I.3.1.3.2 La force de turbulence :.....6

I.3.1.3.3 La force de pesanteur :.....6

I.3.1.3.1.4 La force de viscosité :.....6

I.3.1.3.1.5 La force de capillarité :.....6

I.3.2 Principales lois de similitude :.....7

I.3.2.1 Similitude de Froude :.....7

I.3.2.1.1 A partir des relations de définitions des forces :.....7

I.3.2.1.2 A partir des équations de mouvements :.....7

I.3.2.2 Similitude de Reynolds :.....8

I.3.2.3 Incompatibilité des similitudes de Froude et Reynolds :.....8

I.4 Model réduit :.....8

I.4.1 Définition :.....8

I.4.2 Principales caractéristiques des modèles réduits :.....9

I.4.2.1 Echelle et rapport de distorsion :.....9

I.4.2.2 Emprise-conditions aux limites :.....	10
I.4.2.3 Nature du fond :.....	10
I.4.2.3.1 Model à fond fixe :.....	10
I.4.2.3.1.1 Similitude géométrique exacte :	11
I.4.2.3.1.2 Similitude de Froude pour les modèles fluviaux inclinés.....	11
I.4.2.3.2 modèle de rivières à lit mobile :.....	12
I.4.2.3.2.1 la similitude à lit mobile complète :.....	13
I.4.2.3.2.2 Similitudes à fonds mobiles incomplets :.....	15
I.4.3 Les matériaux utilisés dans les modèles :.....	18
I.4.3.1 Caractéristiques générales des matériaux pour modèles :.....	18
I.4.3.2 Quelques matériaux utilisables :.....	18
I.4.3.2.1 Le caoutchouc :.....	18
I.4.3.2.2 Les matières plastiques :.....	19
I.4.3.2.3 Les mortiers de plâtre :.....	22
I.4.3.2.4 Les mortiers de ciment :.....	24
I.4.3.2.5 Les métaux :	24
I.4.4 notion sur la construction des modèles et l'exécution des essais :.....	24
I.4.4.1 Construction et équipement :.....	24
I.4.4.1.1 Infrastructure :.....	25
I.4.4.1.2 Appareillage de reproduction des phénomènes naturels :.....	25
I.4.4.1.3 Appareillage de mesure :.....	26
I.4.4.1.3.1 Mesures des vitesses :	26
I.4.4.1.3.2 Mesures des hauteurs :	27
I.4.4.1.3.3 Mesures de débit :	27
I.4.4.2 Exécution des essais :.....	27
I.4.4.2.1 Etalonnage :.....	27
I.4.4.2.1.1 Modèles de cours d'eau :.....	27
I.4.4.2.1.2 Modèle à houle :.....	27
I.4.4.2.1.3 Modèles à marée :	27
I.4.4.2.1.4 Essais d'ouvrages :.....	28
I.5 Conclusion :.....	28

Chapitre II : DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE DU PROJET

II.1 La description de la région :.....	29
II.1.1 Situation géographique et présentation générale de la commune :.....	29
II.1.2 Les caractéristiques physique du relief :.....	29
II.2 Étude hydrologique :.....	30
II.2.1 Caractéristiques physique du versant :.....	30
II.2.1.1 Définition de bassin versant :.....	30
II.2.1.2 Paramètre morphologique :.....	30
II.2.1.3 Paramètre de forme :.....	31
II.2.1.4 Les paramètre du relief :.....	31
II.2.1.5 Courbes caractéristiques :.....	32
II.2.1.6 Caractéristiques climatiques :.....	34
II.2.1.6.1 Ajustement de la série des précipitations maximales en 24h :.....	34
II.2.1.6.2 Interprétation :.....	35
II.2.1.6.3 Calcul des débits :	36
II.2.1.7 Traçage de l'hydrogramme de crue :.....	37
II.2.1.7.1 Définition de l'hydrogramme :.....	37
II.2.1.7.2 Détermination du volume de crue :	39
II.2.1.7.3 Détermination du volume de décrue :.....	39
II.2.1.7.4 Apport solide :.....	39

Chapitre III : Calculs et réalisation du modèle réduit

III.1 But de l'étude :.....	41
III.2 Description de l'ouvrage :.....	41
III.3 calculs des dimensions du modèle réduit :.....	43
III.4 Travail expérimental :.....	45
III.4.1 Mesures :.....	47
III.4.2 Photos	47
III.4.3 Résultats :.....	50
III.5 Conclusion :	53
Conclusion générale.....	54
Bibliographie :.....	55

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau 1 : Variation de l'échelle donnée dans la nature.....	9
Tableau 2 : Rapports d'échelle pour les modèles hydraulique.....	16
Tableau 3 : Valeurs moyennes des caractéristiques de quelques matériaux.....	20
Tableau 4 : Quelque caractéristique de plâtre.....	22
Tableau 5 : Les différents paramètres du relief.....	31
Tableau 6 : Caractéristiques géomorphologiques du bassin versant de l'oued Kerzaz...32	
Tableau 7 : Les différentes altitudes en fonction de S_i et V_i	33
Tableau 8 : Pluies et débits caractéristiques	33
Tableau 9 : Températures moyennes mensuelles	35
Tableau 10 : Précipitations maximales en 24 h	36
Tableau 11 : $Q_m(t)$ en fonction du temps	39
Tableau 12 : $Q_d(t)$ en fonction de temps.....	39
Tableau 13 : Determination de H_{sed}	40
Tableau 14 : Les débits de crues et laminés	40
Tableau 15 : Les données de dimensionnement du déversoir.....	41
Tableau 16 : Rapports d'échelle pour le modèle	43
Tableau 17 : Valeurs des caractéristiques de modèle et de prototype	43
Tableau 18 : Valeurs des débits de laminage et de crue de modèle (l/min)	44
Tableau 19 : Calcul du coefficient de débit des déversoirs de Crump	46
Tableau 20 : Tableau des hauteurs mesuré.....	47
Tableau 21 : Les hauteurs de Q_{1000}	51

LISTE DES FIGURES :

Figure 1 : Vue en plan d'un modèle de cours d'eau (évacuateur de crues du barrage de Monteynard).....	25
Figure 2 : Schéma de principe d'un appareil générateur de marée.....	26
Figure 3 : La vallée de kerzaz	29
Figure 4 : les reliefs de la vallée de kerzaz	30
Figure 5 : Courbe caractéristique de la surface partielle	33
Figure 6 : Courbe des pluies et débits caractéristiques	34
Figure 7 : Courbe caractéristique de la Températures moyennes mensuelles	35
Figure 8 : Courbe caractéristique de la Température moyennes mensuelles maximale..	36
Figure 9 : Hydrogramme de crue	38
Figure 10 : Vue de face de déversoir.....	42
Figure 11 : Vue de face du modèle	45
Figure 12 : Vue par-dessus du modèle	45
Figure 13 : Schéma des points de mesure.....	45
figure 14 : Caractéristiques du débit dans les déversoirs de Crump	46
Figure 15 : Vue de face	47
Figure 16 : Vue par-dessus	48
Figure 17 : Vue de face	48
Figure 18 : Vue par-dessus	49
Figure 19 : Vue de face	49
Figure 20 : Vue par-dessus.....	50
Figure 21 : la courbe des lignes d'eau pour les débits de laminage Q_{50} , Q_{100} et Q_{1000}	51
Figure 22 : Hauteur du mur bajoyer	52

LISTE DES SYMBOLES :

symboles	significations	L'unité
M	Masse	Kg
L	Longueur	m
T	Temps	s
ρ	Masse volumique	Kg/m ³
V	Vitesse	m/s
H	Hauteur	m
g	gravité	m/s ²
Mt	Nombre de match	/
S	Surface	m ²
Y	Rapport de similitude géométrique	/
W	Rapport de similitude dynamique	/
Δ	Rapport de similitude cinématique	/
F _i	Force d'inertie	N
r	Rayon	m
F _t	Force de turbulence	N
F _p	Force de pesanteur	N
F _v	Force de viscosité	N
F _C	Force de capillarité	N
Re	Reynolds	/
F _r	Froude	/
Z _r x _r Y _r	Echelle de dimensions géométriques	/
τ *	Paramètre de bouclier	/
d _r	Diamètre des grains	m
ω	Vitesse des sédiments	m/s
u	Vitesse de cisaillement	m/s
∂/∂	Rapport de l'équation de continuité	/
P ₀	Porosité des matériaux du lit	%
t _{sr}	Variation de l'altitude	m
η	Manning	/
(G-1)	densité des sédiments	Kg/m ³
K _h	Echelle de profondeur	/
k _l	Echelle de largeur	/
k _L	Echelle de longueur	/
d _{sr}	Echelle de diamètre des particules	/
k _s	Echelle de la surface	/
K _v	Echelle de volume	/

k_t	Echelle du temps d'écoulement	/
k_v	Echelle de la vitesse	/
K_u^*	Echelle de cisaillement	/
k_{ω}	Echelle de la sédimentation	/
K_Q	Echelle du débit	/
k_{qb}	Echelle du débit unitaire	/
k_m	Echelle de la masse	/
K_p	Echelle de la pression	/
k_{τ}	Echelle de contrainte de cisaillement	/
k_F	Echelle de la force	/
k_I	Echelle de la pente	/
k_f	Echelle de Darcy-Weisbach	/
k_{Fr}	Echelle de Froude	/
k_{Re}	Echelle de Reynolds	/
k_{Re}^*	Echelle des boucliers	/
k_{τ}^*	Echelle des grains de Reynolds	/
K_D^*	Echelle des dimensions de diamètre	/
$K_{(G-1)}$	Echelle de densité des sédiments	/
C_r	Coefficient de ruissellement	/
Q	débit	m^3/s
P_r	Précipitation	mm
Q_m	Débit de crue	m^3/s
Q_d	Débit de décrue	m^3/s
V_m	Volume de la crue	m^3
V_d	Volume de la décrue	m^3
A_{min}	Altitude minimale	m
A_{max}	Altitude maximale	m
k	Echelle de longueur	/

Introduction générale :

INTRODUCTION GENERALES :

Contrairement aux autres champs d'ingénierie, l'hydraulique des ouvrages hydrotechniques a toujours été et reste encore, principalement basée sur les études expérimentales sur site ou sur modèle réduit. Les théories des couches limites et de la turbulence en Mécanique Des Fluides sont relativement récentes et même avec les outils informatiques les plus performants de nos jours les études théoriques restent insuffisantes à elles seules pour la description du comportement hydraulique des ouvrages hydrotechniques les plus simples (une prise d'eau ou un bassin de dissipation d'énergie par exemple). Le recours aux expérimentations et aux modèles réduits resteront probablement encore pour longtemps indispensables pour l'explication de ce que la théorie et les outils informatiques n'ont pu atteindre [6].

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 : « Contribution à l'étude par modèle réduit des conditions d'écoulement de l'évacuateur de crue du barrage Kerzaz (Bechar) » nous irons construire un modèle réduit pour de l'évacuateur de crue du barrage Kerzaz (Bechar) dans le but de :

- 1) Vérifier le bon fonctionnement du déversoir proposé pour Q_{50} et Q_{1000} (pas de débordement).
- 2) Dimensionner et vérifier le dissipateur d'énergie proposé :
 - ✚ La longueur du dissipateur.
 - ✚ La hauteur du mur bajoyer.

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

- Chapitre I : Généralité.
- Chapitre II : La description de la zone et l'étude de projet.
- Chapitre III : Calculs et réalisation du modèle réduit.

Chapitre I :

Généralité

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) [1].

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, d'une part, et l'analyse dimensionnelle, d'autre part, sont des outils précieux.


Nous commencerons par l'analyse dimensionnelle qui, au sens large, est l'étude de la forme générale des relations existant entre les grandeurs caractérisant un phénomène physique.

I.2 Analyse dimensionnelle :

Une loi physique, dans son expression mathématique, doit être indépendante du système d'unités choisi, en d'autres termes, elle doit être homogène. Une loi physique est concrétisée par une relation entre certain nombre de paramètres. Et ces paramètres ou grandeurs physiques peuvent s'exprimer en fonction de quatre grandeurs fondamentales [7] :

 La mase M

 La longueur L

 Le temps T

 La température Θ

On appelle équation aux dimensions d'une grandeur physique, l'expression de cette grandeur en fonction des grandeurs fondamentales plus hautes citées.

Ainsi une vitesse qui est une longueur divisé par un temps à pour équation à la dimension :

$$\frac{L}{T} \quad \text{Ou} \quad LT^{-1}$$

Une accélération est une vitesse divisée par un temps :

$$\text{Accélération} = \frac{LT^{-1}}{T} = LT^{-2}$$

Une force est le produit d'une masse par une accélération

$$\text{Force} = LT^{-2} * M = M LT^{-2}$$

L'analyse dimensionnelle est cette opération mathématique qui traite des dimensions des grandeurs physiques ou quantités en fonction des grandeurs fondamentales. Elle permet de trouver l'expression mathématique de la relation qui relie les diverses grandeurs physiques qui entrent dans un phénomène physique. Elle permet aussi de définir la forme la plus simple que peut revêtir une expression mathématique reliant les divers paramètres ou grandeurs physiques qui entrent dans un phénomène physique.

I.2.1 Théorème de Buckingham ou théorème des π :

Soient n le nombre de grandeurs physiques entrant dans un phénomène étudié, et r le nombre de grandeurs fondamentales entrant dans la définition de ces n grandeurs physiques, toute relation reliant ces n grandeurs physiques, fonctions des r grandeurs fondamentales peut être ramenée à une relation entre $(n - r)$ nombres sans dimensions qui constituent la série complète des nombres sans dimensions que l'on peut former avec les n grandeurs physiques considérées. Ces $(n - r)$ nombres sans dimensions sont appelés des termes π d'où le nom de théorème de π

Ainsi pour un phénomène dépendant de 7 grandeurs physiques, fonction de 3 grandeurs fondamentales, le nombre de produits sans dimensions que l'on peut former est : $n - r : 7 - 3$

Et au lieu d'avoir la relation entre 7 facteurs, on aura une relation entre 4 facteurs.

A la vérité le théorème de Buckingham est une simplification d'une méthode plus générale.

La méthode générale consiste à écrire le tableau des dimensions des diverses grandeurs n et à déterminer le rang r du tableau matriciel ainsi formé, ce qui donne le nombre $(n - r)$ des produits sans dimensions. Mais en général, on estime que le théorème des π donne des résultats assez corrects.

I.2.2 Produit sans dimension en hydraulique :

En hydraulique les diverses grandeurs qui interviennent dans les phénomènes sont en nombre limité et les produits sans dimensions que l'on peut former à partir d'elles sont les produits simples, dont quelques-uns portent le nom de celui-ci qui les a mis en évidence.

Ce sont :

$$\text{+ Rapport de dimensions linéaires : } \frac{D1}{D2} ; \frac{h1}{2h}$$

$$\text{✚ Rapport de pressions : } \frac{p_1}{p_2} ; \frac{P}{\frac{\rho v^2}{2}}$$

Avec $\frac{\rho v^2}{2}$ c'est la pression dynamique, nombre d'Euler

$$\text{✚ Rapport de charge : } \frac{H_1}{H_2} ; \frac{V^2}{gH} \text{ (rapport de force d'inertie aux forces de gravité, c'est le nombre de Froude)}$$

$$\text{✚ Nombre de Reynolds } \frac{VD}{\nu} \text{ rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité}$$

$$\text{✚ Nombre de Mach : qui est le rapport d'une vitesse à la vitesse du son dans le fluide}$$

$$M = \frac{V}{C}$$

$$\text{✚ Nombre de weber } \frac{\rho V^2 D}{\sigma} \text{ rapport des forces d'inertie à force de tension superficielle}$$

I.3 Similitude hydraulique :

I.3.1 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, c'est ce que les lois de la similitude mécanique supposent la réalisation de la similitude géométrique, cinématique et dynamique. La définition de la similitude est la suivante [6].

« Deux écoulements sont semblables s'ils ont lieu à l'intérieur de limites géométriques semblables et si les trajectoires des particules homologues sont géométriquement semblables » [1].

I.3.1.1 Similitudes géométrique :

On a deux corps S et S' sont dits géométriquement semblables si le rapport de toutes leurs dimensions homologues L et L' est constant

$$\frac{L'}{L} = Y$$

Est appelé le rapport de similitude des longueurs ou échelle des longueurs. Les rapports de similitudes des surfaces et des volumes sont déterminés à partir de Y.

I.3.1.2 Similitudes cinématique :

On a deux systèmes S et S' géométriquement semblables soient en mouvement ; les mouvements sont cinématiquement semblables si les vecteurs de vitesse V et V' des points homologues sont géométriquement semblables ; le rapport $\frac{V'}{V} = \Delta$, est appelé l'échelle des vitesses.

1.3.1.3 Similitude dynamique :

On a deux systèmes S et S' géométriquement semblables en mouvement sous l'action de deux systèmes de forces sont en similitude dynamique si les forces F et F' appliquées à des éléments homologues sont dans un rapport constant

La relation $\frac{f'}{f} = w$ est vérifié quelles que soient les forces f et f' homologues considérées

Nous allons considérer les principales forces qui interviennent en hydraulique. Ces forces sont : d'inertie, de turbulence, de pesanteur, de viscosité, de capillarité.

1.3.1.3.1 La force d'inertie :

La force d'inertie sur une particule de masse m et de vitesse v est donnée par :

$$F_i = m \frac{v^2}{r}$$

Ou :

r = rayon de courbure de la trajectoire

On aura pour le prototype et le modèle :

$$F_p = m_p \frac{v_p^2}{r_p}$$

$$F_m = m_m \frac{v_m^2}{r_m}$$

$$\frac{F_m}{F_p} = \frac{m_m}{m_p} * \frac{r_p}{r_m} * \left(\frac{v_m}{v_p}\right)^2$$

D'où :
$$F_r = \frac{k_m k_v^2}{k}$$

On peut écrire pour Mr

$$M = \rho L^3$$

$$M_r = k_\rho k^3$$

ce qui va nous donne :
$$k_{fi} = K_\rho K^4 K t^{-2}$$

1.3.1.3.2 La force de turbulence :

La force de turbulence, résulte de la théorie de longueur de mélange de Pradth et de Von Karman peut s'écrire [7] :

$$K_{ft} = k_{\rho i} k_v^2 k^2$$

k_{pi} et k_v : composante longitudinale et transversale de la fluctuation de la vitesse instantanée

S : section

$$K_{ft}=k_f$$

1.3.1.3.3 La force de pesanteur :

Les forces de pesanteur sur la particule de masse m est : $F=mg$

Donc on aura : $k_{fp} = k_m k_g$

$$k_m = k_\rho k^3$$

$$k_{fp} = k_\rho k^3 k_g$$

1.3.1.3.1.4 La force de viscosité :

La force de viscosité s'écrit :

$$F_v = \mu S \frac{V}{n}$$

On a pour rapport de similitude :

$$k_{fv} = k_\mu k^2 k_v k^{-1}$$

$$k_{fv} = k_\mu k k_v$$

1.3.1.3.1.5 La force de capillarité :

La force de capillarité est donné par : $F_c = Al$

Avec A = constante capillaire du liquide

l = longueur intéressé sur la surface libre

Le rapport de similitude sera : $k_{fg} = k_a k$

k_{al} = rapport des constantes capillaire des liquides

Dans le cas le plus générale, les 3 rapports de similitude Y , Δ , w peuvent être choisis indépendamment les uns des autres.

Mais en pratique, si l'on utilise le même sur le modèle et dans la nature et si le modèle est placé dans les mêmes champs de gravitation que le prototype, les rapports ne peuvent plus être choisis arbitrairement : ils sont liés par des relations qui définissent une loi de similitude particulière.

I.3.2 Principales lois de similitude :**I.3.2.1 Similitude de Froude :**

La similitude de Froude s'applique en toute rigueur aux écoulements pour lesquels les forces de viscosité sont nulles, c'est-à-dire aux écoulements des fluides parfaits [6].

Nous verrons plus loin que cette similitude s'applique avec une bonne approximation au fluide réel en régime d'écoulements tel que les forces de viscosité sont négligeables par rapport à celle due à la turbulence.

Les conditions de similitude dynamique relatives aux fluides parfaits peuvent être écrites en utilisant l'une des deux méthodes ci-dessous, que nous appliquons successivement à titre d'exemple

I.3.2.1.1 A partir des relations de définitions des forces :

Considérons deux canaux C et C' géométriquement semblables dans lesquels s'écoulent deux liquides parfaits. L'égalité des échelles des forces d'inertie et des forces de pesanteur donne la relation suivante :

$$k = \lambda$$

Si le liquide est le même dans les deux systèmes, cette relation devient

$$k \cdot k t^{-2} = k_g$$

C'est la condition de Froude.

Si g est le même pour le modèle et pour le prototype, la condition s'écrit :

$$k_t = k^{1/2} = k v$$

On peut énoncer cette condition sous une autre forme en introduisant le nombre de Froude qui est un coefficient sans dimension.

I.3.2.1.2 A partir des équations de mouvements :

Les écoulements dans les canaux C et C' obéissent de l'équation de Bernoulli, soit :

$$\text{Pour C :} \quad d \left(\frac{V^2}{2g} \right) + dz = 0 \quad (1)$$

$$\text{Pour C' :} \quad d \left(\frac{V'^2}{2g} \right) + dz' = 0 \quad (2)$$

Remplaçons dans l'équation (2) nous obtenons :

$$\frac{k v^2}{k g} \cdot d \left(\frac{V^2}{2g} \right) + k dz = 0 \quad (3)$$

Les deux écoulements seront dynamiquement semblables si l'équation (3) identique avec l'équation (1), d'où :

$$k v^2 = k \cdot \text{kg} \quad \text{d'où} \quad k \cdot k t^{-2} = \text{kg}$$

I.3.2.2 Similitude de Reynolds :

La similitude de Reynolds s'applique-t-on toute rigueur aux écoulements pour lesquels les forces de pesanteur sont nulles. La seule condition de similitude s'écrit : $k_{fi} = k_{fv}$

D'où la condition de Reynolds : $k \rho \cdot k^2 \cdot k t^{-1} = k \mu$

La condition s'exprime comme suit :

« Si deux écoulements de fluides non soumis à la pesanteur sont dynamiquement semblables, le nombre de Reynolds homologues de ces deux écoulements sont égaux »

I.3.2.3 Incompatibilité des similitudes de Froude et Reynolds :

Les deux conditions de similitude établies ci-dessus sont incompatibles si le fluide est le même dans le modèle et dans le prototype.

Il semble résulté, a priori, de cette incompatibilité qu'il n'est pas possible de réaliser des essais sur modèle réduit ; en fait, cette difficulté peut être surmonté, dans la plupart des cas, on observant que certaines catégories de force sont négligeables devant d'autres.

La résistance à l'avancement d'un Navier est la somme des deux termes :

- ✚ L'un résulte du frottement visqueux de l'eau contre la coque (similitude de Reynolds).
- ✚ L'autre exprime la résistance due aux vagues produite par le mouvement de Navier ; ces vagues sont des ondes de gravité régies par la similitude de Froude.

I.4 Model réduit :

I.4.1 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** [4].

I.4.2 Principales caractéristiques des modèles réduits :

I.4.2.1 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, correspondent à une variation de hauteur donnée dans la nature.

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

Tableau 1 : Variation de l'échelle donnée dans la nature

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⁾

1.4.2.2 Emprise-conditions aux limites :

Le choix de l'emprise d'un modèle ; c à dire de l'entendue 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.

1.4.2.3 Nature du fond :

Suivant la nature du phénomène étudié, on est conduit à utiliser un modèle à fond fixe ou un modèle à un fond mobile [5].

1.4.2.3.1 Model à fond fixe :

Ils sont construits pour simuler les écoulements autour des travaux de l'amélioration de la rivière et les structures hydraulique. Une limite rigide implique que le lit est fixe

Tel est le cas lorsque le paramètre de boucliers de la matière du lit est $\tau_* < 0.03$ les Échelles peuvent être déterminées dans l'un des deux cas suivants :

- ✚ similitude géométrique exacte, dans lequel la résistance à l'écoulement peut être négligée
- ✚ modèle distordu / incliné, dans lequel la résistance à l'écoulement est important.

Similitude géométrique exacte et la similitude de Froude peuvent être maintenues simultanément dans les modèles à lit fixe que lorsque la résistance à l'écoulement peut être négligée.

Ces modèles sont bien adaptés à l'analyse des flux 3D autour de la structure hydraulique, dans lequel le transport des sédiments n'est pas important. Quand les tronçons fluviaux longues sont considérées et la résistance à l'écoulement ne peut pas être négligé, à la fois le Froude et la similitude de résistance peuvent être satisfaites simultanément dans les modèles inclinés.

1.4.2.3.1.1 Similitude géométrique exacte :

Les échelles de modèle pour les modèles hydrauliques avec géométrie exacte peuvent être déterminées à partir du critère de similitude de Froude. Similitude géométrique exacte est nécessaire lorsque le débit est 3d et quand les accélérations verticales ne sont pas

négligeables. Ce type de modèle est particulièrement bien adapté pour la modélisation de l'écoulement à proximité des structures hydrauliques.

Les rapports d'échelle pour les modèles hydrauliques avec similitude géométrique exacte à réduire au $k_v=k_t=L_r^{0.5}$ et $k_m=L_r^3$. Tous les autres rapports d'échelle peuvent être dérivés de la longueur, de temps et de masse en utilisant des échelles de dimensions fondamentales de chaque variable considérée. Le rapport d'échelle pour plusieurs variables est listé dans la troisième colonne du tableau 2.

La similitude géométrique exacte impose des contraintes qui sont habituellement difficiles à travailler dans la modélisation des tronçons fluviaux. Mise à l'échelle de la taille d'éléments de rugosité selon l'échelle de longueur maintiendra le même paramètre de résistance, tant que $Re_* > 70$ à la fois le modèle et le prototype. Dans la pratique, cela est possible seulement pour les canaux à lit très grossières telles que les galets et le flux de lit de rochers. La difficulté avec le critère de similitude de Froude non distordu (non incliné) est que les conditions de lit prés sont radicalement modifiées.

Une similitude géométrique stricte ne peut être maintenue parce que la longueur de similitude nécessite que de très petites particules modélisation à l'échelle produit une très grande épaisseur de la sous-couche laminaire dans le modèle.

Dans le régime hydrauliquement lisse, la résistance à l'écoulement augmente lorsque diminue le nombre de Reynolds, et une résistance à l'écoulement est plus grande pour le modèle que pour le prototype.

1.4.2.3.1.2 Similitude de Froude pour les modèles fluviaux inclinés :

Modèle distordu et incliné est considérée comme une alternative pratique possible. Le modèle distorsion et l'inclinaison ne sont acceptables que lorsque les accélérations verticales et latérales de l'eau peuvent être négligées par rapport à l'accélération de la pesanteur. Cette solution permet l'utilisation pratique de différentes échelles de profondeur d'eau et la taille des sédiments. Le modèle est distordu lorsque $y_r \neq z_r$ et incliné quand $x_r \neq z_r$ qui devrait être approprié pour les conditions d'écoulement à 1d. Modèles à lit rigide (fixe) hydrauliques exigent que la résistance à l'écoulement soit la même pour le modèle et le prototype.

Dans le régime hydrauliquement rugueux, $Re > 70$, la résistance à l'écoulement dépend de rapport de la submersion h/h_d . L'équation gouvernante qui doit être préservé dans les modèles d'écoulement graduellement varié avec des limites fixe est la relation de résistance $k_f=k_{Fr}^2$. Par lequel l'inclinaison est nécessaire parce que $k_{Fr}=1$ et $d_{sr} \neq 1$. En terme général, la résistance à l'écoulement peut être définie comme :

$$B = \sqrt{8/f} = a \left(\frac{h}{d_s}\right)^m \quad \text{où} \quad m = \left[\frac{1}{(\ln 12.2 * (\frac{h}{d_s}))}\right].$$

L'équation gouvernante de similitude pour la résistance à l'écoulement peut être écrite comme :

$$k_{Fr}^2 = \frac{Zr}{Xr \left(\frac{Zr}{Dsr}\right)^{2m}} \quad (* \text{ ''})$$

Comme un cas particulier, selon la relation de Strickler entre coefficient de Manning n et le diamètre de la rugosité du lit $n \approx d_s^{1/6}$, l'équation de Manning-Strickler correspond à les échelles $m=1/6$.

Dans les modèles de Froude distordu doivent simultanément satisfaire la Froude et les critères de similitude Manning-Strickler. Le critère de similitude Manning Strickler dans un modèle distordu est défini comme $(z_r/d_{sr})^{1/6} [(z_r^{0.5} k_I^{0.5})/k_v]=1$. Le modèle hydraulique inclinée $k_I=z_r/x_r \neq 1$ qui satisfait la similitude de Froude $k_{Fr}=1$ implique que $d_{sr}=z_r^4/x_r^3$. selon cette relation, l'utilisateur dispose de deux degrés de liberté dans le choix de deux des trois paramètres d'échelle x_r, y_r ou z_{sr} . Lors de l'étalonnage des modèles limites fixes, le modèle rugosité est généralement augmentée quand les grand bloc et bâtons disproportionnés sont utilisés pour reproduire une relation hauteur-débit comparable à celle du prototype.

La modélisation de la structure de conception avec les modèles de lits fixes distordus nécessite donc l'intuition et le jugement des ingénieurs expérimentés.

Les rapports d'échelle pour un modèle de lit fixe distordu sont présentés dans la colonne 4 du tableau 2.

Modèle distordu est souvent rencontrées dans la pratique de l'ingénierie de sorte que la profondeur d'eau est augmentée par rapport à celle de similitude exacte. Un modèle distordu avec différentes échelles horizontales et verticales permet différentes échelles pour le matériau de lit et de profondeur d'eau. L'intérêt pratique dans des modèles distordus est que dans l'augmentation de la profondeur de l'écoulement et la diminution de la résistance à l'écoulement, et l'utilisateur du modèle peut empiriquement augmenter la taille des éléments de rugosité jusqu'à ce que les résultats du modèle se comparent aux mesures sur le terrain. Le modèle est alors dit étalonner. Parce que la similitude cinématique n'est pas exact, cependant, toute tentative visant à déterminer les propriétés cinématiques telles que les lignes de courant et un mélange turbulent ne peut pas être correctement mis à l'échelle dans des modèles distordus.

1.4.2.3.2 modèle de rivières à lit mobile :

Modèles de lits mobiles sont utiles lorsque le transport des sédiments est significatif, par exemple, lorsque $\tau_* > 0.06$. Des exemples typiques comprennent des structures de chute, affouillement local, l'érosion dessous déversoirs, seuils, écluses et des barrages, la sédimentation des réservoirs, etc. la mobilité de lit offre 1 degré de liberté supplémentaire dans le choix de la densité de la masse des sédiments. Similitude dans le transport des sédiments est obtenue lorsque le paramètre des boucliers τ_* et de la dimension de diamètre de grain d_r sont similaires dans les deux systèmes, i.e., $K_{\tau_*}=1$ et $K_{d_r}=1$. Bien entendu, ces conditions impliquent également que $K_{Re_*}=1$ parce que $\tau_* * d_r^3 = R_{e_*}^2$.

Il ya quatre critères de similitude pour les modèles à lit mobile :

-  La similitude de Froude.

- ✚ La résistance, par exemple, Manning-Strickler.
- ✚ Dimension de diamètre de grain.
- ✚ L'entraînement de la matière du lit ou paramètre des boucliers.

Ces quatre critères de similitude doivent être simultanément remplies dans l'atteint de la rivière avec un débit rapidement variée et transport des sédiments. Les critères régissant impliquent sept paramètres k_v , k_g , z_r , d_{sr} , $k_I, k_{(G-1)}$, et k_v . Modèles hydrauliques avec $k_g=k_v=1$ et quatre équations de similitude laissent seulement 1 degré de liberté, par exemple, la longueur de la maquette à l'échelle z_r , à l'exception de l'échelle latérale y_r , qui n'est pas spécifiée par les équations. Le modèle est incliné puisque les équations imposent $k_I=z_r/x_r$ pour exemple, l'utilisateur peut préférer un modèle qui est incliné mais non distordu, $y_r \neq z_r$, à un modèle distordu et incliné en forme plan qui conserve la géométrie $x_r=y_r$.

La similitude à lit mobile est dite complète, avec un degré de liberté, lorsque les quatre équations de similitude sont simultanément satisfaites.

Lorsque la similitude complète est impossible, il est parfois possible de sacrifier l'une des équations régissant pour un degré de liberté supplémentaire.

1.4.2.3.2.1 la similitude à lit mobile complète :

Il est important de reconnaître que la similitude à lit mobile complète implique que la direction de l'aval est dominante et les accélérations latérales et les directions verticales sont négligeables. La similitude à lit mobile complète est donc essentiellement adaptée pour les processus sédiments-transports à 1D. La similitude de diamètre de particule $d_{sr}=1$ sans dimension précédente dans les modèles hydrauliques impose la relation suivante entre le diamètre des particules et la densité des particules :

$$d_{sr}^3 = \frac{1}{k_{(G-1)}} \tag{*'}$$

Il est clair à partir de cette relation que les modèles hydrauliques nécessitent sédiments très léger lorsque de grandes particules sont utilisées dans le modèle.

Il est intéressant de noter que, pour les sédiments prototype à un poids spécifique de (2.65), tout matériau léger correspond à un rapport d'échelle spécifique pour le diamètre de particule.

Similitude dans paramètre de boucliers $k_{r*}=1$ impose la relation suivante entre le diamètre de la particule et de la similitude de la pente S_r :

$$K_I = \frac{z_r k_I}{k_{(G-1)} d_{sr}} = 1. \tag{*}$$

Il est clair à partir de (*') et (*), que pour satisfaire simultanément sur $k_{d*}=1$, $k_I=z_r/x_r$, et $K_{r*}=1$, la condition $d_{sr}=x_r^{1/2}/z_r$ doit être remplie. En un mot, l'échelle de diamètre des particules d_{sr} est directement obtenue à la suite de la relation Manning-Strickler et la similitude de Froude $d_{sr}=z_r^4/x_r^3$. la densité du sédiment est alors obtenu à partir du diamètre des particules sans dimension tels que $K_{(G-1)}=x_r^9/z_r^{12}$. Enfin, par substitution dans l'équation de

boucliers, la condition qui satisfait le même paramètre des boucliers impose que $z_r = x_r^{7/10}$. cette condition simplifie davantage les exigences précédentes tel que $d_{sr} = x_r^{-0.2}$ et $K_{(G-1)} = x_r^{0.6}$.

Le critère pour les sédiments en suspension est basé sur la vitesse de sédimentation peut être définie de $\omega = 8(v/d_s)[(1+0.0139 d_s^3)^{0.5} - 1]$. L'échelle de la vitesse de sédimentation dans l'eau est donc $K_\omega = 1/d_{sr}$ à condition que $d_{*r} = 1$. Le critère de suspension de sédiments est définie à partir des valeurs identiques du rapport de vitesse de cisaillement à vitesse de sédimentation, ou $K_{\omega r} / K_{u*} = 1$. Cela mène directement à $d_{sr} = x_r^{1/2} / z_r$, qui est identique à la condition précédemment obtenu à partir du paramètre des boucliers.

Nous pouvons donc conclure que la similitude dans paramètre des boucliers est équivalent à la similitude dans le rapport de charriage à la suspension de sédiments, à condition que $K_{d*} = 1$. Ce renforce l'exigence que $K_{d*} = 1$ et $K_\tau = 1$ pour similitude dans le transport des sédiments.

Similitude dans le transport de charriage des sédimentaire peut être déterminée à partir de la relation brun Einstein- comme $q_{bv} / \omega d_s = f(\tau_*)$, dans lequel, avec $K_\omega = \frac{1}{d_s}$ quand $K_{d*} = 1$, on obtient directement $k_{qbv} = f(K_{\tau*})$. Il est intéressant de noter que $K_{q_{bvc}} = 1$ lorsque $K_{\tau*} = 1$, qui renforce encore l'exigence de similitude dans les boucliers paramètre par $K_{\tau*} = 1$.

Aggradations de lit et la dégradation se rapporte à la relation de continuité des sédiments appliquée à une décharge de charriage écrite en forme 1D comme $\frac{\partial q_h}{\partial x} = -p_0 \left(\frac{\partial z_0}{\partial t} \right)$, où q_b est l'unité de décharge de charriage, p_0 est la porosité du matériau du lit, z_0 est la porosité de l'élévation du lit, et t_s se réfère au temps. L'échelle de temps pour le mouvement du charriage k_{ts} qui décrit la variation de l'altitude est donc obtenue $k_{ts} = \frac{p_0 r z_r x_r}{q_b r}$. Il peut être supposé que le taux de porosité $k_{p_0} = 1$. Ce rapport de temps se réfère à l'échelle de temps de sédimentation qui est utile dans l'analyse du changement locale d'élévation du lit par affouillement local, les formes de lit, et des changements dans le transport de charriage. L'échelle de temps pour les changements d'élévation de lit est différente de l'échelle de temps obtenu à partir du critère de similitude de Froude.

Dans les études de dispersion de diffusion, l'échelle de temps pour le mélange vertical peut être estimée à partir de $k_{tv} = z_r / k_{u*}$ comparativement avec le temps de mélange latéral donnée par $k_{tlr} = y_r^2 / z_r k_{u*}$. Bien entendu ces deux échelles sont équivalentes seulement si le modèle est non distordu. Également, l'échelle de longueur pour le mélange vertical est $x_{vr} = [(z_r k_v) / k_{u*}]$ est comparable à la longueur de mélange latéral donnée par $x_{tlr} = k_{vr} y_r^2 / z_r k_{u*}$. Ces échelles de longueur sont compatibles seulement pour les modèles non distordus. Les rapports d'échelle pour les modèles à lit mobile qui variés rapidement sont listés dans la colonne 5 du tableau 2. Dans la pratique, similitude à lit mobile complète est un peu restreint pour modéliser des échelles qui ne sont pas trop petite (environ $z_r < 25\text{mm}$) parce que les modèles à plus grande échelle nécessitent matériau déraisonnablement lumière.

I.4.2.3.2.2 Similitudes à fonds mobiles incomplets :

Lorsque les conditions de similitude complète ne sont pas pratiquement possible, une contrainte peut parfois être sacrifiée afin de bénéficier d'un degré de liberté supplémentaire.

Comme le modèle écarte loin de complète similitude, il ya un plus grand risque que le modèle peut donner des résultats incorrects .Il y a néanmoins un certain nombre de possibilités, en fonction de laquelle les conditions de similitude doivent être conservés dans le modèle et dans le prototype. Deux types de modèles sont considérés ici : (1) similitude non Freudien $k_{Fr} \neq 1$; et (2) similitude quasi dans le transport des sédiments $k_{d*} \neq 1$. Tout d'abord, proche de l'équilibre des flux dans lequel l'écoulement est graduellement varié peut être simulée avec différentes valeurs du nombre de Froude tant que le flux est sous-critique, I e, rivières alluvionnaires à grain fin avec faible nombre de Froude peuvent être simulés avec le même matériel du lit au plus élevé, encore sous-critique, nombre de Froude. Second, grossiers matériel de lit dans lequel le transport de charriage est prédominante peuvent être simulés avec des valeurs plus petites de d_* tant que le flux est hydrauliquement rugueuse.

Les valeurs d'échelle pour ces deux cas de la simulation du lit mobile incomplètes sont présentées dans les colonnes 7 et 8 du tableau 2.

Dans les modèles non Freudien, écoulement dans les grandes rivières alluviales progressivement-varié n'impose pas de grand changement sur le schéma spécifique d'énergie. Dans les cas où le nombre de Froude reste assez constant le long de la portée de l'étude, nous pouvons utiliser différentes valeurs du nombre de Froude pour le modèle et le prototype tant que le flux demeure sous-critique dans les deux systèmes. Dans ce cas, seuls ces trois équations gouvernantes (*) (**') (**'') sont satisfaites simultanément. Le critère de similitude de Froude serait remplacé par un degré de liberté supplémentaire, par exemple, y_r, z_r , et d_{sr} .

Lorsque la même densité de sédiment est utilisé, la similitude de dimension des diamètres de particules d_r^* implique que $k_{(G-1)} = 1/d_{sr}^3$: ainsi le sédiment doit avoir la même densité et le diamètre des particules. Les conditions de la similitude des boucliers peuvent être réécrites comme $d_{sr} = x_r^{1/2}/z_r = 1$ et l'équation de Manning-Steckler (10.2) peut être réécrite en termes de nombre de Froude comme $k_{Fr} = z_r^{-0.5+m}$. L'échelle de Froude n'est pas l'unité mais change légèrement avec échelle de modèle et les rapports d'échelle pour les modèles alluviales d'écoulement graduellement variés sont listés dans la colonne 8 du tableau 2.

Ce type de modèle permet l'utilisation du même sédiment dans le modèle et le prototype. la géométrie de section transversale non distordu peut être simulé avec $y_r = z_r$, et la similitude de forme plan de la géométrie est obtenue lorsque $x_r = y_r$.

Ce type de modèle offre la similitude de charriage et le transport de sédiments en suspension. Les inconvénients de cette approche sont que le modèle ne respecte pas la similitude de Froude et doit être limitée aux flux sous critiques prés uniformes. Ce type de modèle devrait simuler adéquatement le transport des sédiments et de résistance à l'écoulement. Cependant, les diagrammes de force et les accélérations latérales / verticales ne sont pas simulés de façon appropriée.

Modèles avec similitude quasi dans le transport des sédiments, $k_{d*} \neq 1$, peuvent être utilisés à partir du tableau 2, colonne 7, dans lequel le transport de charriage est dominant. Il est à noter que la similitude dans le transport total de sédiments est discutable quand $k_{\tau*} = 1$ et $d_{sr} \neq 1$. Effets d'échelle peuvent être trouvés dans d'autres processus de transport des sédiments tels que la charge suspendue et la prédiction de la forme du lit.

Tableau 2 : Rapports d'échelle pour les modèles hydraulique

		Lit fixe (Freud)			Lit mobile			
		échelle	exacte	Hyper distordu	Complet générale	($d_{sr} = \tau_{sr} = 1$) $m = 1/6$	$D_{sr} \neq 1$	Incomplet $Fr_r \neq 1$
Géométrique	profondeur	K_h	L_r	z_r	z_r	z_r	z_r	z_r
	largeur	k_l	L_r	y_r	y_r	y_r	y_r	y_r
	langueur	k_L	L_r	x_r	$z_r \left(\frac{1+4m}{1+m} \right)$	$z_r^{1.43}$	$z_r^{1+2m} d_{sr}^{-2m}$	$z_r^2 d_{sr}^2$
	diamètre des particules	d_{sr}	L_r	$z_r^4 x_r^{-3}$	$z_r \left(\frac{2m-1}{2+2m} \right)$	$z_r^{-0.286}$	d_{sr}	d_{sr}
	surface de la section X	k_s	L_r^2	$z_r y_r$	$y_r z_r$	$y_r z_r$	$y_r z_r$	$y_r z_r$
	volume	k_v	L_r^3	$z_r x_r y_r$	$y_r z_r \left(\frac{2+5m}{1+m} \right)$	$y_r z_r^{2.43}$	$y_r z_r^{2+2m} d_{sr}^{-2m}$	$y_r z_r^3 d_{sr}^2$
Cinématique	temps (écoulement)	k_t	$L_r^{1/2}$	$z_r^{-1/2} x_r$	$z_r \left(\frac{1+7m}{2+2m} \right)$	$z_r^{0.928}$	$z_r^{0.5+2m} d_{sr}^{-2m}$	$z_r^{2-m} d_{sr}^{3+m}$
	temps (lit)	k_{tb}	-	-	$z_r \left(\frac{2+5m}{1+m} \right)$	$z_r^{2.428}$	$z_r^{1.5+3m} d_{sr}^{-1-3m}$	$z_r^3 d_{sr}^2$
	vitesse	K_v	$L_r^{1/2}$	$z_r^{1/2}$	$z_r^{1/2}$	$z_r^{1/2}$	$z_r^{1/2}$	$z_r^m d_{sr}^{-1-m}$
	vitesse de cisaillement	K_{u*}	$L_r^{1/2}$	$z_r x_r^{-1/2}$	$z_r \left(\frac{1-2m}{2+2m} \right)$	$z_r^{0.286}$	$d_{sr}^m z_r^{0.5-m}$	d_{sr}^{-1}
	vitesse de sédimentat	k_o	-	-	$z_r \left(\frac{1-2m}{2+2m} \right)$	$z_r^{0.286}$	-	d_{sr}^{-1}

	ion							
	débit	K_Q	$L_r^{1/2}$	$Z_r^{3/2} y_r$	$y_r Z_r^{3/2}$	$y_r Z_r^{1.5}$	$y_r Z_r^{1.5}$	$y_r Z_r^{1+m} d_{sr}^{-1-m}$
	débit unitaire de charriage	k_{qb}	-	-	1	1	$Z_r^{0.5-m} d_{sr}^{1+m}$	1
Dynamique	masse	k_m	L_r^3	$Z_r X_r y_r$	$y_r Z_r \left(\frac{2+5m}{1+m} \right)$	$y_r Z_r^{2.43}$	$y_r Z_r^{2+2m} d_{sr}^{-2m}$	$y_r Z_r^3 d_{sr}^2$
	pression	K_p	L_r	Z_r	Z_r	Z_r	Z_r	Z_r
	contrainte de cisaillement	k_τ	L_r	$Z_r^2 X_r^{-1}$	$Z_r \left(\frac{1-2m}{1+m} \right)$	$Z_r^{0.57q}$	$Z_r^{1-2m} d_{sr}^{2m}$	d_{sr}^{-2}
	force	k_F	L_r^3	$Z_r X_r y_r$	$Z_r y_r \left(\frac{2+5m}{1+m} \right)$	$y_r Z_r^{2.43}$	$y_r Z_r^{2+2m} d_{sr}^{-2m}$	$y_r Z_r^3 d_{sr}^2$
Dimension	pente	k_I	1	$Z_r X_r^{-1}$	$Z_r \left(\frac{-3m}{1+m} \right)$	$Z_r^{-0.43}$	$Z_r^{-2m} d_{sr}^{2m}$	$Z_r^{-1} d_{sr}^{-2}$
	darcy-weisbach	k_f	1	$Z_r X_r^{-1}$	$Z_r \left(\frac{-3m}{1+m} \right)$	$Z_r^{-0.43}$	$Z_r^{-2m} d_{sr}^{2m}$	$Z_r^{-2m} d_{sr}^{2m}$
	Freud	k_{Fr}	1	1	1	1	1	$Z_r^{m-0.5} d_{sr}^{-1-m}$
	Reynolds	k_{Re}	$L_r^{3/2}$	$Z_r^{3/2}$	$Z_r^{3/2}$	$Z_r^{1.5}$	$Z_r^{3/2}$	$Z_r^{1+m} d_{sr}^{-1-m}$
	boucliers	k_τ	-	-	1	1	1	1
	grain Reynolds	k_{Re^*}	$L_r^{3/2}$	$Z_r^5 X_r^{-3.5}$	1	1	$Z_r^{0.5-m} d_{sr}^{1+m}$	1
	dimension de diamètre	K_{D^*}	-	-	1	1	$\frac{2+2m}{d_{sr}^3} \frac{1}{Z_r}$	1
	densité des sédiments	$K_{(G-1)}$	-	-	$Z_r \left(\frac{3-6m}{2+2m} \right)$	$Z_r^{0.857}$	$Z_r^{1-2m} d_{sr}^{2m-1}$	d_{sr}^{-3}

I.4.3 Les matériaux utilisés dans les modèles :**I.4.3.1 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 [4] :

- ✚ affinité des diagrammes contraintes-déformations avec celui du prototype.
- ✚ 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.4.3.2 Quelques matériaux utilisables :

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

I.4.3.2.1 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 (°C).
- ✚ Dilatation thermique : 17 à 22 ($10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

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 insurmontables 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 fois 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 où les forces de gravité interviennent, on peut charger le caoutchouc de baryte ou de litharge en vue d'en augmenter le poids spécifique.

1.4.3.2.2 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 celluloids
- ✚ 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 homogènes 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.

Tableau 3 : Valeurs moyennes des caractéristiques de quelques matériaux

Caractéristiques physiques	Unité S.I	Familles thermoplastiques nature				Famille des thermodurcissables natures		
		Nitrates de celluloses	Résines acétal	Résines acryliques	Polyéthylènes	polypropylènes	Résines de polyester	Résines époxy
		Noms commerciaux		Noms commerciaux		Noms commerciaux		
		Celluloid	Delrin 500	Vedril, plexiglas, altoulor, diakon, perspex, lucite	Alkathène (densité moyenne)	Bakélite, carlona	Atlac, marco, palatal	Epikote, aroldite

Masse volumique	Kg/m ³	1350-1700	1425	1180-1200	920-940	900-910	1130-1300	1200
Absorption d'eau	%	1-3	0.12	0.3	<0.015	<0.02	20-25	0.10
Rupture en traction	bar	500	705	500-740	100-200	280-370	350-800	300-900
Allongement à la rupture	%	40-45	15	2-4	90-600	200-700	2-8	4

Chapitre I :**Généralité**

Module d'élasticité	bar	13000-15000	12500	30000-35000	1600-4500	10500-12500	20000-50000	30000
Rupture en flexion	bar	600-800	990	1000-1200	0-100	12000-20000	900-1200	1000-1500
Coefficient de poisson		0.40-0.42	0.35	0.35-0.38	0.45-0.5	0.35-0.39	0.35-0.45	0.33-0.45
Coefficient de dilatation thermique linéaire	m/m ⁰ C	80-120.10 ⁻⁶	80.10 ⁻⁶	70.10 ⁻⁶	280.10 ⁻⁶	105.10 ⁻⁶	100-1500.10 ⁻⁶	45-65.10 ⁻⁶
Conductivité thermique	w/(m ⁰ C)	0.23	0.23	0.19	0.34	0.12	0.18	0.17-0.21
Chaleur spécifique	J/kg ⁰ C	1200-1600	1465	1465	2300	2100	1250-2300	1250-2100
Température de déformation sous charge (18 bar)	⁰ C	60-70	100	90	60-70	60	105	50-290
Température de ramollissement (vicat)	⁰ C	100		110	80-100	150-155	125	40-150
Possibilités de moulage		BONN E	Très bonnes	Très bonnes	Très bonnes	Très bonnes	Très bonnes	Très bonnes
Retrait au moulage	%		2	0.2-0.8	2-5	1-2	0.1-0.9	0.1-0.4
Qualités d'usinage		Très bonnes	Très bonnes	Très bonnes	Très bonnes	Très bonnes	bonnes	bonnes

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'authentiques 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.

1.4.3.2.3 Les mortiers de plâtre :

Les modèles en mortier de plâtre sont très adaptés à l'étude des structures tridimensionnelles telles que les barrages : l'intervalle des déformations élastiques de ces matériaux est sensiblement plus large que celui des bétons surtout en extension et leur rigidité beaucoup plus faible permet la réalisation de modèles d'échelle relativement réduits.

Tableau 4 : Quelques caractéristiques de plâtre

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

Sable fin	100	V=0.205
Durcisseur résamide	65	

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 ou 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 :

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

Pour des modèles dont on empêche le retrait du au séchage, ou si celui-ci est irrégulier, il peut se produit des fissures, parfois invisible, 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 réalisé 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.

I.4.3.2.4 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.4.3.2.5 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.4.4 notion sur la construction des modèles et l'exécution des essais :

I.4.4.1 Construction et équipement :

Un modèle représentant un site naturel et des ouvrages comprend trois parties principales :

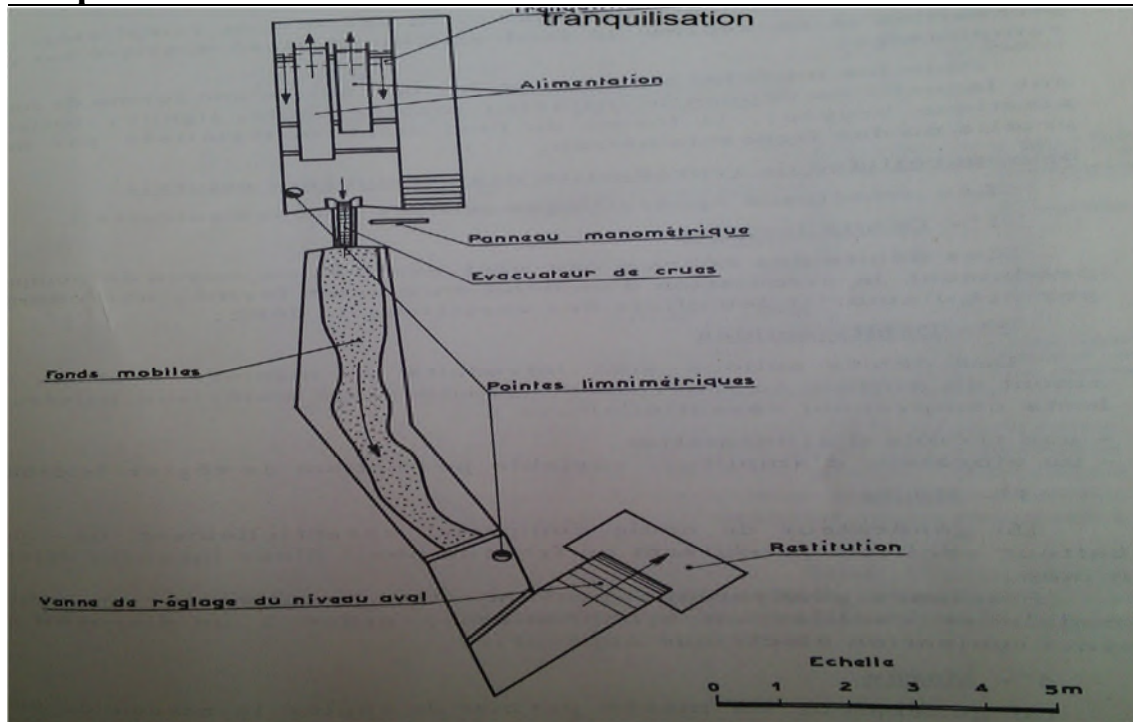


Figure 1 : Vue en plan d'un modèle de cours d'eau (évacuateur de crues du barrage de Monteynard)

1.4.4.1.1 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.

1.4.4.1.2 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 : (figure2)

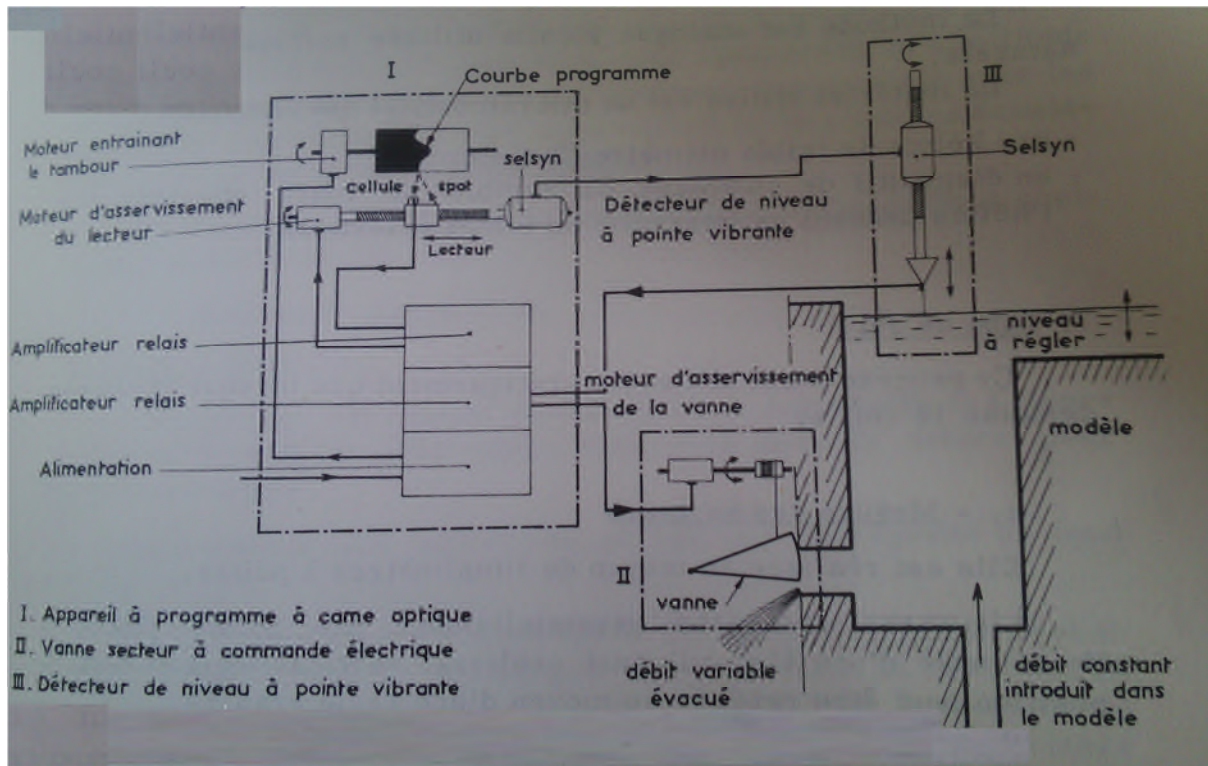


Figure 2 : Schéma de principe d'un appareil générateur de marée

- ✚ 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.4.4.1.3 Appareillage de mesure :

I.4.4.1.3.1 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.4.4.1.3.2 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.4.4.1.3.3 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.4.4.2.1 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 agissent pour cela au foie sur les écoulements et sur les conditions aux limites.

I.4.4.2.1.1 Modèles de cours d'eau : *Modèle à fond fixe :*

L'étalonnage est réalisé en cherchant à reproduire des lingues d'eau en similitude avec celle observé es 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.4.4.2.1.2 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.4.4.2.1.3 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.4.4.2.1.4 Essais d'ouvrages :

Les essais d'ouvrage consistent à réaliser successivement sur le modèle diverses implantation ou modification 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 certain cas, un contrôle qualitatif permet de guider l'expérimentateur dans ces tentatives et, de ce fait, de gagner du temps.

I.5 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 [7].

Chapitre II :

La description de la zone et l'étude de projet

Chapitre II : La description de la zone et l'étude de projet

II.1 La description de la région :

II.1.1 Situation géographique et présentation générale de la commune :

La commune de KERZAZ située dans la vallée de la Saoura, dans la partie sud-ouest de la wilaya de Bechar à 332 km de la ville de Bechar. Le territoire de la commune est d'une superficie de 10520 km² et s'étale de part et d'autre d'Oued Saoura .Il est limité :

- ☒ Au nord ; par les communes de BEN YEKHLEF, EL OUATA, TAMTERT et BENI-ABESS.
- ☒ A l'Ouest ; par la commune de TABELBALA.
- ☒ Au Nord –Est ; par la wilaya d'EL BAYADH.
- ☒ Au Sud par la commune de TIMMOUDI.

Kerzaz comme toutes les communes de la basse Saoura est marquée par :

- ☒ La vallée de Saoura.
- ☒ La zone montagneuse.
- ☒ L'erg accidentel.



Figure 3 : La vallée de kerzaz

II.1.2 Les caractéristiques physique du relief :

Elle compte un ensemble d'Oasis depuis Igli (point de rencontre d'Oued Zouzfana et Oued Guir et qui donne naissance à Oued Saoura) jusqu'à Ksabi en direction Nord-Ouest et Sud Est. L'ensemble de la vallée est encaissée entre l'Erg accidentel et la Hamada du Guir ainsi que les montagnes rocheuses.

La Saoura compte une 30 de ksour très rapprochés les uns des autres, avec une distance qui varie de 2 à 6 km entre 2 ksour comme le cas de Kerzaz Ksar et la Zaouia et Kbir.

Chapitre II :

La description de la zone et l'étude de projet

Toutes les palmeraies sont situées sur la rive gauche de la Saoura sauf celle de Timoudi et Kerzaz ACL qui sont sur la rive droite, ceci s'expliquerait par la proximité et l'Erg qui fonctionne comme un condensateur d'eau ou le sol meuble absorbe les rares précipitations et les achemines sous la terre jusqu'à un sol imperméable ,dont la pente rejoint la Saoura.

Tout le long du cours de l'Oued Saoura on trouve les mêmes caractéristiques, un fond sablonneux avec des petites verdure. C'est le seul endroit où l'agriculture est possible non seulement par la présence de l'eau mais par le microclimat créée par les palmeraies.

Notons que les crues de la vallée de la Saoura sont presque tous les ans, et la dernière qui a causé des pertes à la commune, remonte à l'année 1969, qui a démoli presque la totalité des Ksours de l'agglomération de Kerzaz chef-lieu.



Figure 4 : les reliefs de la vallée de kerzaz





II.2 Étude hydrologique :

II.2.1 Caractéristiques physique du versant :

II.2.1.1 Définition de bassin versant :

Le bassin versant se définit comme de surface topographique chainée le cours d'eau et ces affluents. Il est déterminé par la morphologie, essentiellement par les lignes de crête et de partage des eaux. Un bassin versant est zone de relief dont les zones de ruissellement d'eau s'écoulent et se rassemblent vers un exutoire unique.

II.2.1.2 Paramètre morphologique :

 Surface	$S=3.50\text{km}^2$
 Altitude maxi	$A_{\text{max}}=504 \text{ m}$
 Altitude mini	$A_{\text{min}}=478 \text{ m}$
 Longueur du thalweg principal	$L=2.9 \text{ km}$

Chapitre II : La description de la zone et l'étude de projet

Et on déduit :

Un coefficient du ruissellement C_r de 0.27

Un temps de concentration T_c de 1heure

II.2.1.3 Paramètre de forme :

La forme du bassin versant joue un rôle important sur celle de l'hydrogramme résultant d'une averse donnée à l'exutoire du bassin versant. Le temps de concentration, sera plus long dans le cas d'un bassin allongé, que dans le cas d'un bassin de forme ramassée pour cela, on donne un certain nombre de paramètres caractérisant la forme de notre bassin.

II.2.1.4 Les paramètre du relief :

Le relief aussi importance sur l'hydrologie du bassin, une plus forte pente provoquer un écoulement plus rapide on peut déduire un temps de concentration plus court. Les indices de M roche servent à déterminer la pente moyenne avec les données réelles du bassin versant.

Tableau 5 : Les différents paramètres du relief

Altitude(m)	Surface partielle S_i (m^2)	Surface cumulée (m^2)	% des surfaces cumulées (S_i/S_t)	% des surfaces cumulées
504-495	4671	4671	5.70	5.69
495-490	9925	14596	12.10	17.09
490-488	10899	24912	13.29	30.38
488-486	11418	36330	13.92	44.30
486-484	12975	49305	15.82	60.13
484-482	14013	63318	17.10	77.21
482-482	14532	77850	17.72	94.94
482-478	4152	82002	5.06	100

Altitude max : 504 m

Altitude min : 478 m

Tableau 6 : Caractéristiques géomorphologiques du bassin versant de l'oued Kerza

Paramètres	symboles	Unités	Valeur
Surface du BV	S	Km ²	3.5
Périmètre	P	M	11779
Indice de compacité			1.763
Longueur du rectangle équivalent	L	Km	5.16
Largeur du rectangle équivalent	I	Km	0.678
Altitude maximale	H _{max}	M	504
Altitude minimale	H _{min}	M	478
Altitude moyenne	H ₀	M	489.60
Dénivelé	D	M	26
Indice de gravelius	I _G	m/km ²	9.615
Densité de drainage	D _d	Km/km ²	2.48
Indice de pente de roche	I _p	%	0.78
Longueur de thalweg principale	L _p	Km	2.9

II.2.1.5 Courbes caractéristiques :

Auquel on trouve :



-  Courbes de surface du plan d'eau en fonction de la hauteur
-  Courbe de la capacité en fonction de $h=f(S)$ et $h=f(V)$

Tableau 7 : Les différentes altitudes en fonction de S_i et V_i

altitude	Surface partielle S_i (m ²)	Volume cumulé V_i (m ³)
478-479	850.98	850
479-480	2029.32	2291.13
480-481	8747.51	7679.55
481-482	12429.89	18268.25
482-483	17119.45	33043.01
483-484	20345.81	52075.64
484-485	25840.81	75468.95

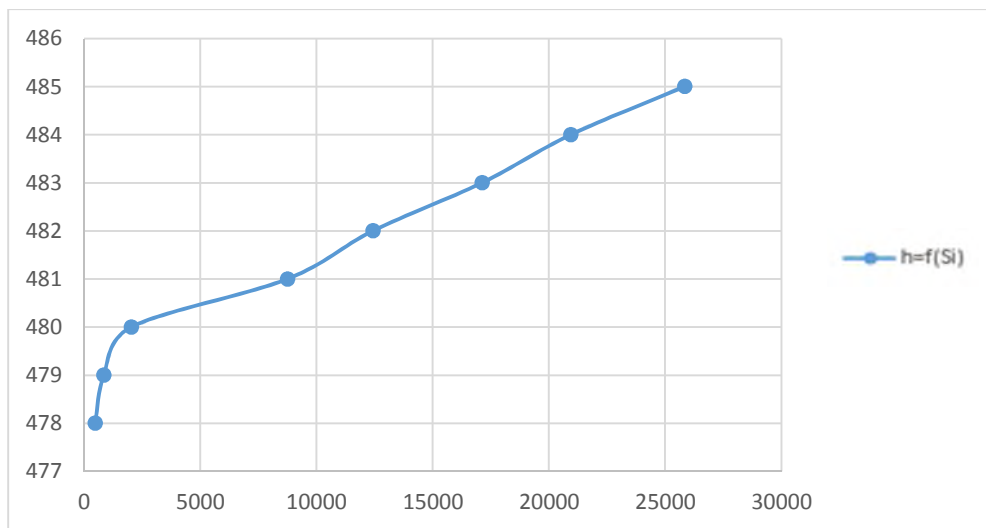


Figure 5 : Courbe caractéristique de la surface partielle

Tableau 8 : Pluies et débits caractéristiques

Période de retour (année)	P_{max} (mm)	Q_{max} (m ³ /s)
1	13.36	7.65
5	33.09	18.95
10	41.59	23.82
25	52.82	30.25
50	61.32	35.12

100	69.82	39.99
200	78.32	44.85
500	89.55	51.29
700	93.68	53.65
1000	98.05	56.16

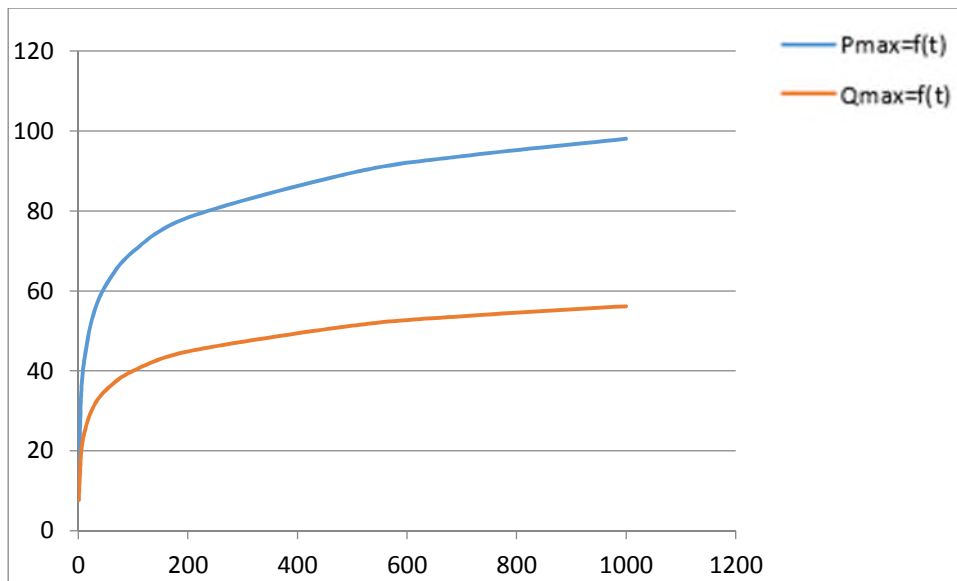


Figure 6: Courbe des pluies et débits caractéristiques

II.2.1.6 Caractéristiques climatiques :

II.2.1.6.1 Ajustement de la série des précipitations maximales en 24h :

En absence totale de mesure de débits, différentes méthodes statistiques et déterministes furent développées ; le meilleur reste celle mettant en œuvre les données pluviométrique mesurées à savoir la pluie maximale annuelle recueillie en 24 heures afin de déterminer les débits engendrés par ces précipitations. Ainsi il serait possible au projecteur de dimensionner son ouvrage en fonction de la valeur du débit qui risque d'être atteint ou dépassé pendant une période déterminée. Nous avons donc ajusté la série des précipitations maximales journalières selon la loi Gumbel et déterminé les hauteurs susceptibles d'être atteintes ou dépassé en moyenne une fois pour des temps de retour 20.50et 100 ans. Pour intervalle de confiance à 80% les calculs ont donc donne les résultats suivants :

- 📊 Pour 25 ans la précipitation serait : 39.5 mm < P(t) < 52.5 mm en 24 h
- 📊 Pour 50 ans la précipitation serait : 45.2 mm < P(t) < 60.8 mm en 24 h
- 📊 Pour 100 ans la précipitation serait : 50.8 mm < P(t) < 69.2 mm en 24 h

Chapitre II :

La description de la zone et l'étude de projet

II.2.1.6.2 Interprétation :

En moyenne une fois tous les 100 ans, nous collectons 60+ mm/-9.2 mm de pluie en 24h. On en déduit les pluies efficaces correspondantes : pour les régions du sud algérien (désert) $Pr(tc) = P_{24} * 0.5605 * T_c^{0.2}$

$$P_{25}(tc) = 25.5 * 0.5905 * (0.2)^{0.2} = 29.43 \text{ mm}$$

$$P_{50}(tc) = 60.8 * 0.5905 * (0.2)^{0.2} = 34.1 \text{ mm}$$

$$P_{100}(tc) = 69.2 * 0.5905 * (0.2)^{0.2} = 38.80 \text{ mm}$$

Tableau 9 : Températures moyennes mensuelles

	JAN	VER	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
T _{min}	6.7	7.7	10.4	18.4	23.	27.9	31	29.9	27.9	20	11.9	8.4
T _{max}	19.5	22.	25.6	30.9	34	41.4	45	42.2	40.1	32	24	20
RR	4.5	1.5	0.4	0.3	0.5	0.1	0.1	0.8	0.9	3.5	9.8	3.8

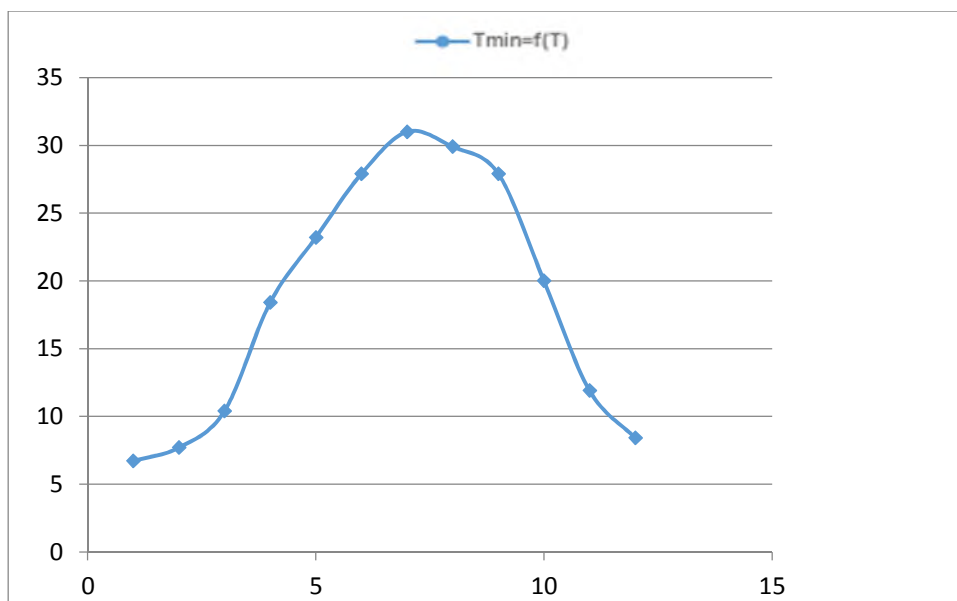


Figure 7 : Courbe caractéristique de la Températures moyennes mensuelles minimales

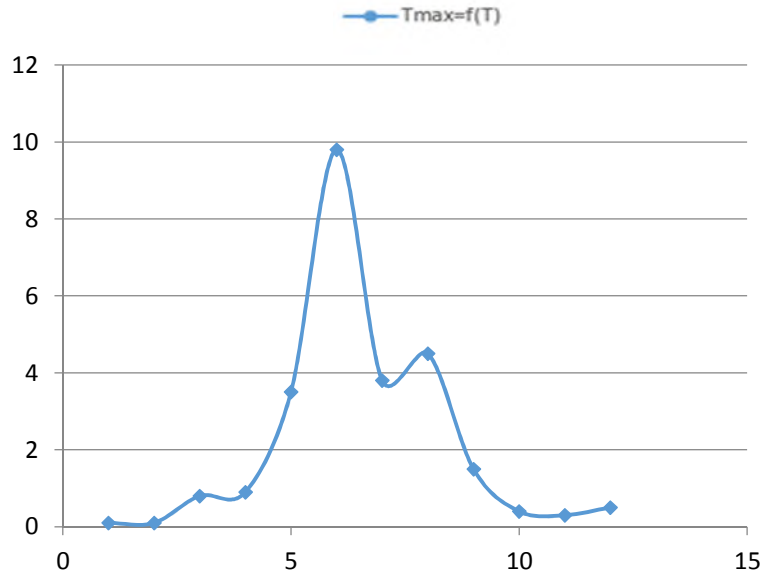


Figure 8 : Courbe caractéristique de la Température moyennes mensuelles maximale.

Tableau 10 : Précipitations maximales en 24 h

Années	Max 24h	Années	Max 24 h	Années	Max 24 h
1974	7.7	1984	13.2	1994	41
1975	24.2	1985	13.6	1995	19.6
1976	9.8	1986	33	1996	25
1977	12.7	1987	13.4	1997	4
1978	0.5	1988	19.3	1998	1
1979	15.8	1989	14.6	1999	16
1980	21.2	1990	6	2000	12.2
1981	1.4	1991	7.7	2001	10.3
1982	7.9	1992	7	2002	7.8
1983	0.3	1993	45.2	2003	6.3

II.2.1.6.3 Calcul des débits :

Les averses qui donnent un ruissellement maximum sont celle dont la durée est égale au temps de concentration du bassin. Le débit en fonction de la pluie de durée T_c serait :

$$Q = Cr * S * Pr (t_c) / t_c = 0.27 * Pr(t_c)$$

Avec :

$Pr (tc) =$ pluie efficace de durée de retour T

$Cr =$ coefficient de ruissellement $= \frac{0.29*3.5}{1} * Pr = 0.945 Pr$

$Tc =$ temps de concentration

A partir de cette relation, nous déduisons donc les débits maximums annuels qui risquent d'être atteint voir dépassés en 25,50 et 100 ans :

- ✚ Pour un temps de retour de 25 ans, ce débit serait : $Q_{25} = 0.945 * 29.43 = 27.81 \text{ m}^3/\text{s}$
- ✚ Pour un temps de retour de 50 ans, ce débit serait : $Q_{50} = 0.945 * 34.1 = 32.30 \text{ m}^3/\text{s}$
- ✚ Pour un temps de retour de 100 ans, ce débit serait $Q_{100} = 0.945 * 38.8 = 36.7 \text{ m}^3/\text{s}$

Le débit du projet est $Q = 37 \text{ m}^3/\text{s}$

II.2.1.7 Traçage de l'hydrogramme de crue :

II.2.1.7.1 Définition de l'hydrogramme :

L'hydrogramme de crue est une courbe représentant la variation des débits en fonction du temps lors d'une crue l'hydrogramme nous permet destiner, la forme, le volume, le temps de montée et le temps de décrue de la crue considérée.

- ✚ Crue $Q_m(t) = Q_{max} (t/t_m)^2 ; \quad 0 < t < t_m$
- ✚ Décrue $Q_d(t) = Q_m (t_d - t/t_d)^3 ; \quad 0 \leq t \leq t_d$

On a t_d est le temps de la décrue

On utilisé la forme de SOKOLOVSKI qui est la suivant :

$$Q_m(t) = Q_{max} \left(\frac{t}{t_m} \right)^2 ; \quad 0 < t < t_m$$

$t_m = 1.65 H = 5940 \text{ s}$

$Q_{max} = Q_{100} = 40 \text{ m}^3/\text{s} = 144 * 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q_m(t) = Q_{max} \left(\frac{t}{t_m} \right)^2 = 144 * 10^3 * \left(\frac{t}{1.65} \right)^2 = 5289.56 t^2$

Donc

$Q_m = 5289.56 t^2$

$$Q_d(t) = Q_{\max} \frac{(td-T)^3}{td^3} = 144 * 10^3 * \frac{(3.63-T)^3}{3.63^3} = 3010.53 * (3.63-t)^3$$

Donc

$$Q_d = 3010.53 * (3.63-t)^3$$

Avec : $Q_d(t)$: le débit de décrue

td : est le temps de décrue ; $0 < t < td$

t_m est le temps de monté auquel $t_m = t_c = 1h$

$T = t - t_m$ avec $t_m < t_m + td$

$$Td = \gamma t_m$$

γ : coefficient dépendant de la capacité de régularisation du bassin versant du lit de l'oued.

$\gamma = 2$ à 2.5 pour petit cours d'eau

$\gamma = 2.5$ à 9 pour moyen et grand cours d'eau

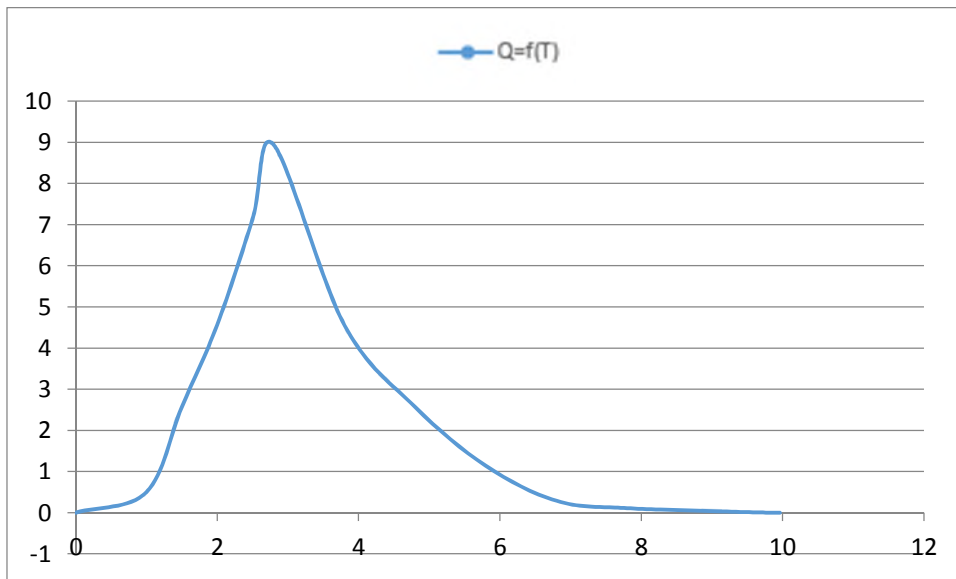


Figure 9 : Hydrogramme de crue

L'oued KERZAZ étant petit cours, alors γ égal à 2.2 donc :

$$td = 2.2 * 1 = 2.2 \text{ h}$$

Par conséquent on obtient le système d'équations suivantes :

$$Q_m(t) = 37 t^2 \quad \text{pour } 0 < t < 1 \text{ heures}$$

$$Q_d(t) = 37 * \left(\frac{1-t}{2.2} + 1\right)^3 \quad \text{pour } 1 < t < 2.2 \text{ heures}$$

Chapitre II : La description de la zone et l'étude de projet

Les résultats se résument dans les tableaux suivants :

Tableau 11 : Qm(t) en fonction du temps

Temps(h)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
Qm(t) m ³ /s	0	1.5	5.9	13.3	23.7	37

Tableau 12 : Qd(t) en fonction de temps

Temps(h)	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2	3.2
Qd(t) _{m³/s}	37	27.8	20.3	14.2	9.5	6	3.5	0

II.2.1.7.2 Détermination du volume de crue :

Le volume d'eau apporté pendant la montée (tm) et la décrue (td) et qui est appelé débit intégral, s'écrit comme suit :

$$V = \int_0^{tm} Qm(t) dt = \int_0^1 \left(\frac{t}{tm}\right)^2 dt = \int_0^1 37 t^2 dt = \int_0^1 \left(\frac{37}{3}\right) = \frac{37}{3} * 1 = 444.00 \text{ m}^3$$

$$V = 444 \text{ m}^3$$

II.2.1.7.3 Détermination du volume de décrue :

$$V_d = \int_0^1 37 * \left(\frac{1-t}{2.2} + 1\right)^3 dt = 324 * 321.07 = 324.322 \text{ m}^3$$

Au quel on aura :

Le volume des crues : $V_d = 325 \text{ m}^3$

Et pour le volume totale de la crue : $v_t = 444 + 325 = 370 \text{ m}^3$

II.2.1.7.4 Apport solide :

La durée de vie des petits barrages est fixée a 30 an en Algérie vue l'importance du quantification de volume V_{ds} (formule empirique), les prévisions d'une durée de sédimentation de 30 ans rendrait les ouvrages très chères.

Compte tenu de l'absence de données hydrométrique sur les apports solides, on a estimé le taux d'abrasion du bassin versant d'après la formule empirique de SOGREAH :

$$T_a = 350 L_e^{0.15}$$

$$T_a = \text{taux d'abrasion (T/Km}^2\text{/An)}$$

L_e =lame d'eau

$$T_a = 1440 (0.22)^{0.15} = 280 \text{ T/Km}^2/\text{an}$$

$$V_{\text{sed}} = \frac{T_a}{d_s} = 490 \text{ m}^3/\text{an}$$

Auquel on peut calculer la hauteur de ruissellement comme si :

$$L_c = \left(\frac{p}{60}\right)^{2.15} = \left(\frac{30}{60}\right)^{2.15} = 0.22 \quad h = 0.22 \text{ mm}$$

Tableau 13 : Determination de H_{sed}

Année	V_{sed} (m ³)	Cote (m)	H_{sed} (m)
10	490	479.65	1.65
20	9800	480.27	2.27
30	14700	480.87	2.84
40	19600	481.36	3.63
50	24500	481.85	3.85

Avec la courbe cote=f(volume) nous pouvons tirer les hauteurs des sédiments (H_{sed})

Et concernant les débits de crues et laminés on aura :

Tableau 14 : Les débits de crues et laminés

	Q_{50} (m ³ /s)	Q_{100} (m ³ /s)	Q_{1000} (m ³ /s)
Débits de crue	28	32	35.12
Débits laminés	35.12	40	56.16

Chapitre III :

Calculs et réalisation du modèle réduit

III.1 But de l'étude :

Le but de cette étude peut être résumé en quelque ligne :

- ✚ Fonctionnement de l'évacuateur des crues pendant la crue Q_{1000} .
- ✚ Positionner le ressaut hydraulique.
- ✚ Dimensionner la largeur et la longueur du bassin de dissipation.
- ✚ Dimensionner la hauteur du mur bajoyer.

III.2 Description de l'ouvrage :

Il s'agit d'un barrage-déversoir conçu 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.

Le barrage-déversoir, construit en béton cyclopéen, a été réalisé en adoptant un déversoir à crête standard (WES).

Le dimensionnement du déversoir a été fait en adoptant les données suivantes :

Tableau 15 : Les données de dimensionnement du déversoir

Débit	Période de retour (années)	Valeur (m^3/s)	Débit laminé (m^3/s)	Hauteur de laminage (m)	Hauteur d'eau au pied du déversoir (m)	Vitesse à l'entrée du dissipateur d'énergie (m/s)	Nombre de froude à l'entrée du dissipateur d'énergie
De projet Q_{50}	50	35,12	28,00	1,15	0,11	23,1	22,2
Exceptionnel Q_{100}	100	40,00	32,00	1,24	0,12	24,3	22,5
Rare Q_{1000}	1000	56,16	35,12	1,50	0,13	25,2	22,7

Remarque :

Après les vérifications finales « avant le début de construction du barrage » l'équipe d'expertise a remarqué que :

- ✚ Les vitesses au pied du déversoir (à l'entrée du dissipateur d'énergie) sont importantes de l'ordre de 24 m/s ;

- ✚ Les nombres de Froude sont encore très grands, de l'ordre de 22 ;
- ✚ Avec les valeurs de vitesses et du nombre de froude, le bassin de dissipation adopté, ne semble pas adéquat (pratiquement, et selon la littérature, tous les bassins de dissipation d'énergie sont dimensionnés avec des nombres de froude < 20) ;
- ✚ Les grandes valeurs de vitesse d'entrée donneront, vraisemblablement, naissance aux phénomènes de cavitation et d'érosion du déversoir et du bassin de dissipation d'énergie ;
- ✚ Comme le bassin de dissipation d'énergie n'est pas dimensionné correctement, les risques d'érosion du lit et des berges du cours d'eau aval sont très grands.

Recommandations de l'équipe d'expertise :

Comme le mur du barrage est déjà en construction (70%), il y a lieu de construire un modèle réduit pour :

- 1) Vérifier le bon fonctionnement du déversoir proposé pour Q_{50} et Q_{1000} (pas de débordement)
- 2) Dimensionner et vérifier le dissipateur d'énergie proposé :
 - ✚ La longueur du dissipateur
 - ✚ La hauteur du mur bajoyer

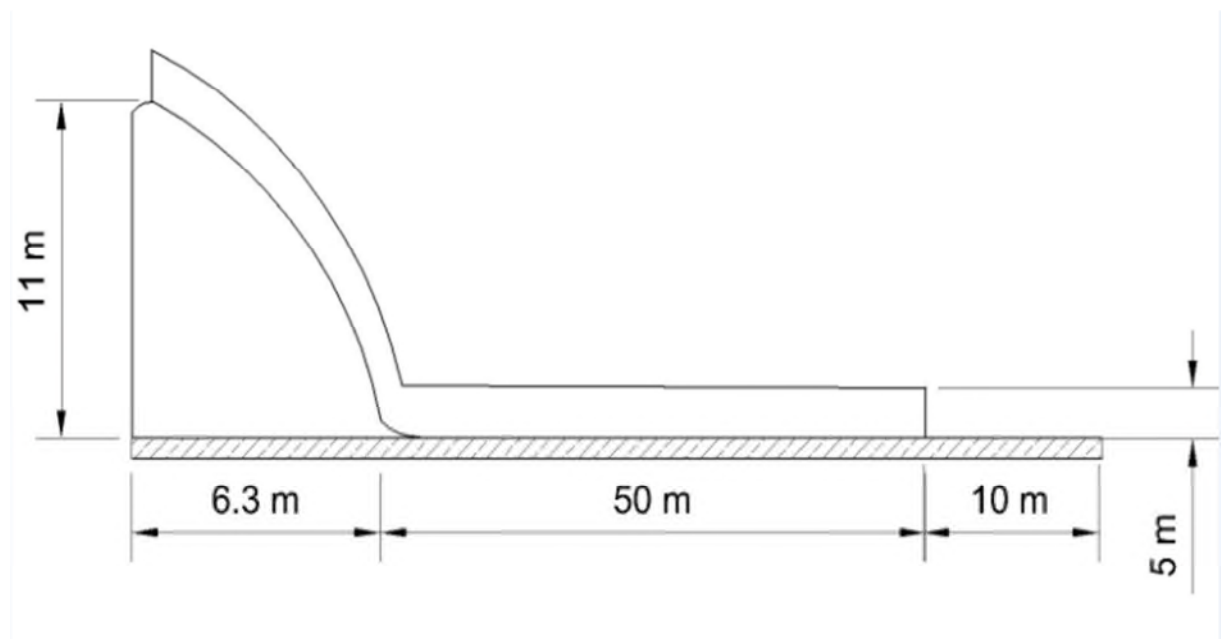


Figure 10 : Vue de face de déversoir

III.3 calculs des dimensions du modèle réduit :

En utilisant le tableau 2 nous pouvons avoir :

Tableau 16 : Rapports d'échelle pour le modèle

Paramètre	Symbole	Échelle
Longueur	k_L	$L_r = 1/158$
Largeur	k_l	$L_r = 1/158$
Hauteur	k_h	$L_r = 1/158$
Débit	k_Q	$L_r^{5/2} = 3.1868 * 10^{-6}$
Vitesse	k_v	$L_r^{1/2} = 0,079556$
Temps	k_t	$L_r^{1/2} = 0,079556$
Surface	k_s	$L_r^2 = \left(\frac{1}{158}\right)^2 = 4,00577 * 10^{-5}$
Volume	k_v	$L_r^3 = \left(\frac{1}{158}\right)^3 = 2,5353 * 10^{-7}$
Pente	k_l	1
Diamètre des particules	d_{sr}	$L_r = \frac{1}{158} = 0,006329$
rugosité	k_η	$L_r = \frac{1}{158} = 0,006329$

Tableau 17 : Valeurs des caractéristiques de modèle et de prototype

Propriétés	symbole	Prototype	Modèle
Longueur de déversoir (m)	L_x	6.03	0,038
Largeur de déversoir (m)	L_y	11	0,07
hauteur de déversoir (m)	L_z	11	0,07

hauteur déversent (m)	H_D	1.15	0,0072
		1.24	0,0078
		1.50	0,0094
Débit de laminage (m ³ /s)	Q_{lam50}	28	$8,92 \cdot 10^{-05}$
	Q_{lam100}	32	0,000102
	$Q_{lam1000}$	35.12	0,000112
Débit de crue (m ³ /s)	Q_{C50}	35.12	0,000112
	Q_{C100}	40	0,000127
	Q_{C1000}	56.16	0,000179
Hauteur de vase (m)	H_s	1.1	0,7
		1.65	1,04
		3.3	2,09
		3.85	2,44
		5.5	3,48
		8.3	5,25
		10	6,33
Temps de crue (min)	T_{crue}	217.8	17,33
Pente (‰)	I	0.5	0.5
Diamètre des rip- rap(m)	D_{sr}	0.3	0,001899

Tableau 18 : Valeurs des débits de laminage et de crue de modèle (l/min)

Q (m ³ /s)	56.16	40	35.12	32	28
Qm (l/min)	10.74	7.65	6.72	6,12	5,35

Après les calculs, l'ouvrage « réduit » aura les caractéristiques suivant :

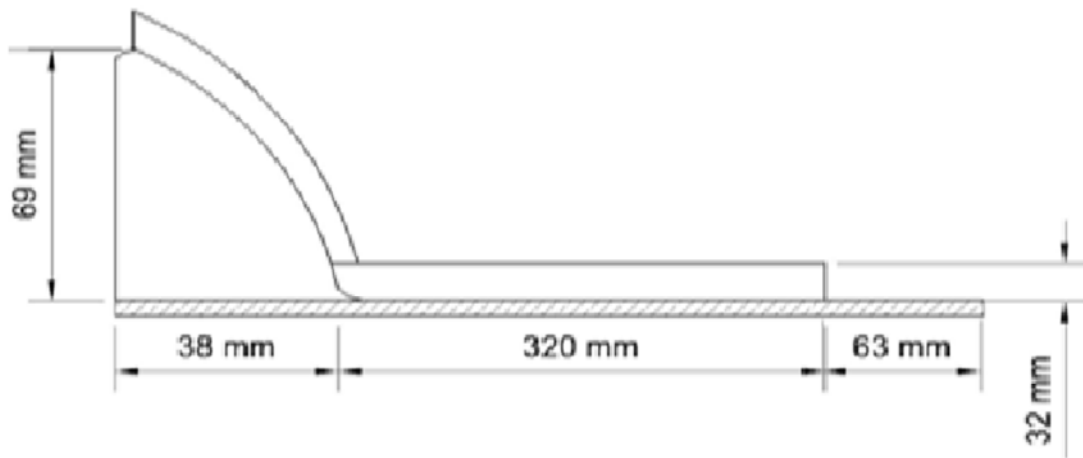


Figure 11 : Vue de face du modèle



Figure 12 : Vue par-dessus du modèle

Remarque :

Le modèle réduit sera construit en plâtre.

III.4 Travail expérimental :

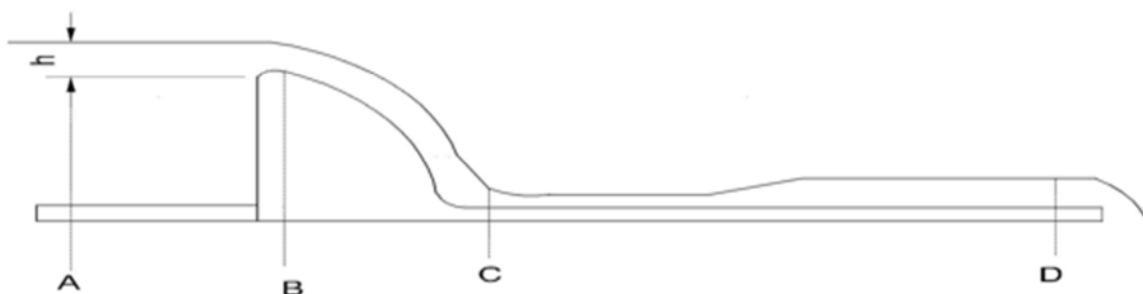


Figure 13 : Schéma des points de mesure

Par rapport au schéma ci-dessus, nous allons :

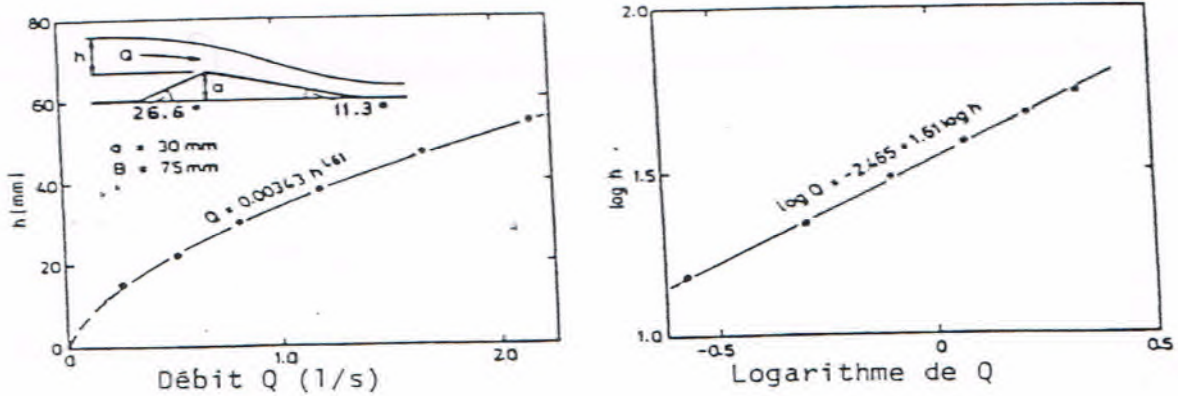
- 1- Mesurer les hauteurs d'eau aux points A, B, C, et D.
- 2- Reprendre l'allure de la surface libre de A→D.
- 3- Prendre des photographies (face et par-dessus).

Remarque :

✚ L'utilisateur de la vanne de réglage du débit du blanc, on ajuste la hauteur d'eau, par-dessus, le déversoir « CRUMP » (voir détails en bas).

Déversoir de crue :

Déversoir de CRUMP : le déversoir de Crump est une autre structure standard destinée à la mesure de la décharge. Le profil du déversoir est triangulaire, avec un amont de 26.6° et une pente aval de 11.3°, et il présente l'avantage d'être simple à définir et à construire. Il est moins susceptible de provoquer le dépôt de sédiments que n'importe qu'elle construction à face amont vertical.



a) Courbe débit/hauteur de chute

b) Tracé logarithmique

Figure 14 : Caractéristiques du débit dans les déversoirs de Crump

Tableau 19 : Calcul du coefficient de débit des déversoirs de Crump

h (mm)	Q (l/s)	$v^2/2g$ (mm)	H (mm)	C
54	2.152	5.95	59.95	0.629
47	1.654	4.18	51.18	0.614
38	1.195	2.80	40.80	0.624
30	0.804	1.63	31.63	0.617
22	0.503	0.85	22.85	0.633
15	0.268	0.32	15.32	0.620

✚ A travers la courbe caractéristique standard du réservoir, on peut avoir exactement le débit laminaire.

III.4.1 Mesures :

Tableau 20 : Tableau des hauteurs mesuré

mm	H _A	H _B	H _C	H _D	H _E	observation
Q ₅₀	22	17	10	19	16	Pas de ressaut ligne d'eau toujours descendante
Q ₁₀₀	24	20	11	20	17	Pas de ressaut ligne d'eau toujours descendante
Q ₁₀₀₀	27	24	12	21	19	Pas de ressaut ligne d'eau toujours descendante

III.4.2 Photos :

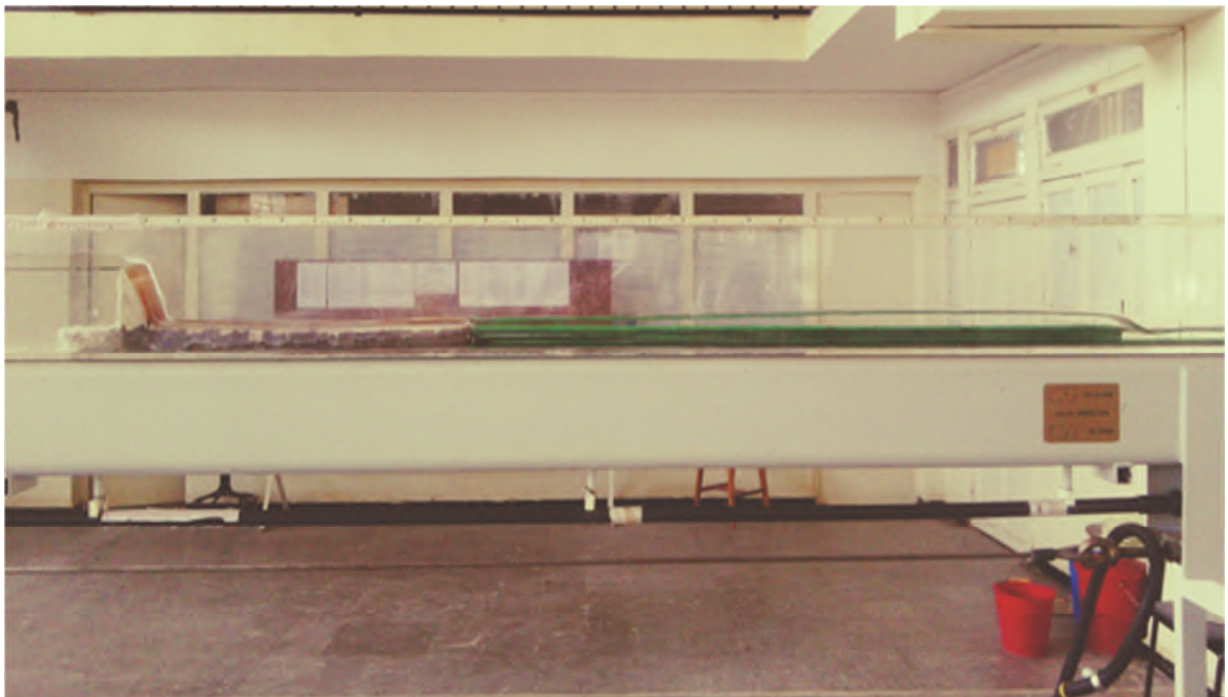
Q₅₀ :

Figure 15 : Vue de face



Figure 16 : Vue par-dessus

Q_{100} :



Figure 17 : Vue de face



Figure 18 : Vue par-dessus

Q_{1000} :



Figure 19 : Vue de face



Figure 20 : Vue par-dessus

III.4.3 Résultat :

- 1) Pour Q_{50} :
 - a- Pas de décollement (déversoir).
 - b- Pas de ressaut (A→E sur 120m/pied aval du déversoir).
- 2) Pour Q_{100} :
 - a- Pas de décollement (déversoir).
 - b- Pas de ressaut (A→E sur 120m/pied aval du déversoir).
- 3) Pour Q_{1000}
 - a- Pas de décollement (déversoir).
 - b- Pas de ressaut (A→E sur 120m/pied aval du déversoir).
- 4) Pour les 3 débits, il semble que le ressaut peut se former bien à l'aval du déversoir.

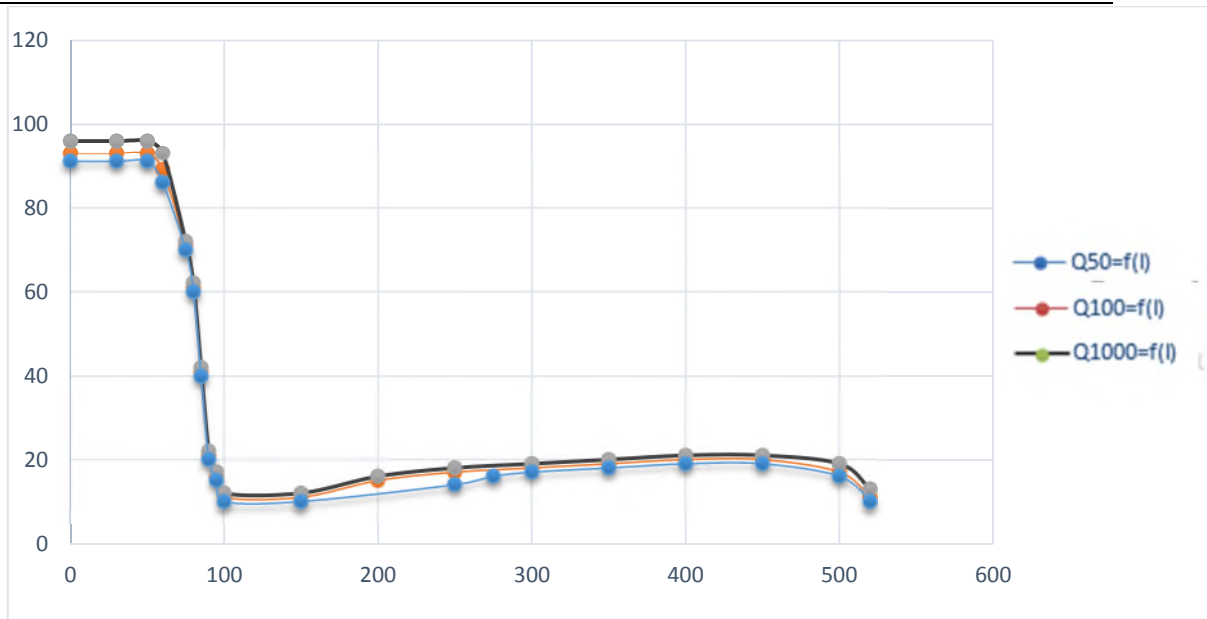


Figure 21 : La courbe des lignes d'eau pour les débits de laminage Q_{50} , Q_{100} et Q_{1000}
 [Pour avoir les hauteurs, regarder le tableau 20 puis mettre à l'échelle K]

Après ce travail, nous pouvons dire que :

- ✚ Pour le débit Q_{1000} réel ($35.12 \text{ m}^3/\text{s}$), le déversoir arrivera, sans peine, à sortir la crue
- ✚ Pour les 3 débits Q_{50} , Q_{100} , Q_{1000} il n'y a pas formation de ressaut sur 60 m après le déversoir.
- ✚ Le mur bajoyer aura pratiquement les mêmes hauteurs :
 Pour la hauteur voir les profondeurs d'eau pour Q_{1000} réelles dans le tableau 21 et ajouter 30%

Tableau 21 : Les hauteurs de Q_{1000}

Hauteur modèle (mm)	Hauteur prototype (m)	30% de hauteur prototype (m)	Hauteur de mur bajoyer (m)
27	4.3	1.3	5.6
24	3.8	1.2	5
12	1.9	0.57	2.5
19	3	1	4

D'après le tableau 21 la hauteur de mur bajoyer est 6 m

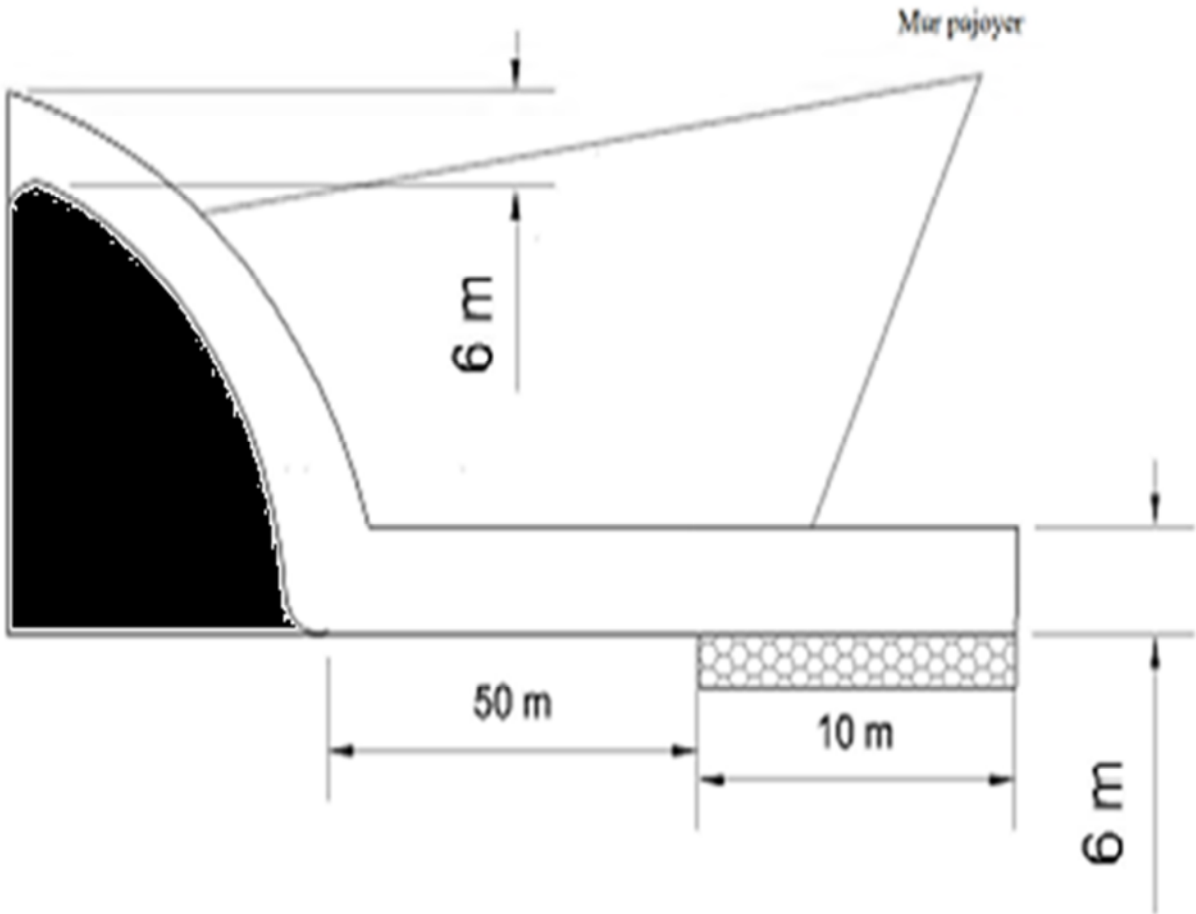


Figure 22 : Hauteur du mur bajoyer

III.5 Conclusion :

Après notre travail on a conclu que :

- ✚ Pour les 3 débits Q_{50} , Q_{100} , Q_{1000} il n'y a pas de formation de ressaut sur 60 m après le déversoir.
- ✚ Le fonctionnement de déversoir est normal car :
 - Il arrive sans peine à sortir la crue pour Q_{1000} .
 - Pas de décollement dans le déversoir.
- ✚ Pour les 3 débits Q_{50} , Q_{100} , Q_{1000} il n'y a pas de formation de ressaut sur 60 m après le déversoir.
- ✚ La hauteur du mur bajoyer est pratiquement constante de hauteur de 6 m.
- ✚ La longueur de dissipateur sera la plus possible, disons 10 m, car il n'y a pas formation de ressaut, donc pas de risque d'érosion de lit. Néanmoins, il est préférable, que le lit et berges du dissipateur d'énergie soient munis de blocs de pierres afin d'augmenter la rugosité et par conséquent accélérer la dissipation d'énergie.

Conclusion générale :

CONCLUSION GENERALE :

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.

Dans le cadre de notre projet de fin d'études : « Contribution à l'étude par modèle réduit des conditions d'écoulement de l'évacuateur de crue du barrage Kerzaz (Bechar) » ; nous sommes arrivés aux conclusions suivantes :

- Pour les 3 débits Q_{50} , Q_{100} , Q_{1000} il n'y a pas de formation de ressaut sur 60 m après le déversoir.
- Le fonctionnement de déversoir est normal car il arrive sans peine à sortir la crue pour Q_{1000} .
- La hauteur du mur bajoyer est pratiquement constante de hauteur de 6 m.
- La longueur de dissipateur sera la plus possible, disons 10 m, car il n'y a pas formation de ressaut, donc pas de risque d'érosion de lit. Néanmoins, il est préférable, que le lit et berges du dissipateur d'énergie soient munis de blocs de pierres afin d'augmenter la rugosité et par conséquent accélérer la dissipation d'énergie.

Bibliographie

- [1] **E. Rieutord**, Mécanique des fluides, INSA DE LYON, [1985].
- [2] **H.L.LANGHAAR**, Analyse dimensionnelle et théorie des maquettes, [1956].
- [3] **M. Sedille**, Turbomachines hydrauliques et thermiques, tome1, P69.
- [4] **N.M.Dehousse** et **R. Arnold**, Les modèles réduits de structure en génie civil, [1971].
- [5] **Piere Y.Julien**, river mechanics, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, P 334-345.
- [6] **R.GINOCCHIO**, Aménagement hydroélectrique, [1956].
- [7] **Yvon dorestant**, premier cour nation poste-gradue sur le drainage, l'irrigation et la gestion des ressources hydrique, [port-au-prince Haiti], [15.07-30.09.1955].

Résumé

Dans le cadre de notre étude qui consiste le dimensionnement et de la vérification du bon fonctionnement du déversoir, de la hauteur du mur bajoyer et de la longueur du dissipateur d'énergie proposés du barrage de Karzaz qui se situe a BECHAR, on a réalisé un modèle réduit dans lequel on a fait appel aux lois de similitude dont on a utilisé l'analyse dimensionnelle. On a eu les résultats suivants :

- Le bon fonctionnement de notre évacuateur de crues car :
 - Pour le débit Q_{1000} le déversoir arrivera sans peine à sortir la crue.
 - Pour les 3 débits il n'y a pas de formation de ressaut sur 60 m après le déversoir.
- La hauteur du mur bajoyer sera 6 m.
- La longueur de bassin dissipateur sera 10 m.

Mots clés : -**déversoir-mur bajoyer-dissipateur-karzaz-modèle réduit-similitude-analyse dimensionnelle.**

Summary :

In the framework of our study consisting the dimensioning and verifying the proper functioning of the spillway, the height of the bajoyer wall and the length of the proposed energy sink of dam of Kerzaz which is in BECHAR, we realized a reduced model in which appealed to the laws of similarity which was used dimensional analysis. We got the following results:

- The proper functioning of our spillway because:
 - For Q_{1000} the spillway can easily come out the flood.
 - For the 3 Flow there is no jump training on 60 meters after the spillway.
- The height of the bajoyer wall will be 6 m.
- The energy sink length will be 10 m.

Keywords:- **spillway- bajoyer wall- energy sink- Kerzaz- reduced model- similarity- dimensional analysis.**

ملخص

في إطار دراستنا المتمثلة في تحديد أبعاد والتحقق من الأداء السليم للمفيض المقترح، وارتفاع جدار بجويي المقترح وطول الحوض الممتص للطاقة المقترح لسد كرزار الموجود في بشار قمنا بإنشاء نموذج مصغر أين استعملنا قوانين التشابه والتحديد البعدي. استنتجنا النتائج التالية

-الأداء السليم للمفيض للأسباب التالية

+مفيض يستطيع بسهولة اخراج الفيضانات ل Q_{1000} .
+بالنسبة للتدفقات الثلاث لا يوجد تكون اسقاط على مسافة 60 متر بعد المفيض.

-ارتفاع جدار بجويي سيكون 6 متر.

-طول الحوض الممتص سيكون 10 متر.

كلمات البحث: -مفيض-جدار بجويي-ممتص الطاقة-كرزاز-نموذج مصغر-تشابه-التحديد البعدي.
