

Polycopié-4624



Université de Ain Temouchent –Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Génie Civil et Travaux Publics

Polycopié pédagogique

CHERIFI Wafa Nor El Houda

Titre

Barrages

Cours destiné aux étudiants de

Master 2 spécialité VOA

Année : 2022/2023

Table des matières

Listes des figures	I
Liste des tableaux	III
Liste d'annotation et d'abréviations	IV
Introduction	1
Chapitre 1 : Généralités sur les barrages	4
Introduction	4
1. Historique des barrages	4
2. Définition	5
3. Fonctions des barrages	5
3.1. Approvisionnement en eau	5
3.2. Production hydroélectrique	6
3.3. Navigation	6
3.4. Contrôle d'inondation et soutien d'étiage	6
3.5. Contrôle du lit du cours d'eau	6
3.6. Tourisme aquatique	6
4. Critères de choix du type de barrage	6
4.1. Étapes administratives	7
4.2. Etude préliminaires	8
4.2.1. La collecte de données	8
4.2.2. Le choix du site	8
4.2.3. Études topographiques.....	9
4.2.4. Études géologiques et géotechniques	12
4.2.5. Études hydrologiques	13
4.2.6. Aspects économiques.....	15
4.2.7. Aspect environnement	15
5. Les différents types de barrages	16
5.1. Le barrage poids	16
5.2. Le barrage-voûte	17
5.3. Le barrage à contreforts	18
5.4. La digue	19
6. l'évacuateur de crue.....	20
Conclusion.....	21

Chapitre 2 : Barrage poids.....	24
Introduction	24
1. Définition :	24
2. Types de profils :.....	25
3. Calcul du volume d'un barrage poids :	26
4. Stabilité d'un barrage poids.....	26
4.1. Stabilité au glissement.....	27
4.1.1. Amélioration de la sécurité au glissement.....	28
4.2. Stabilité au renversement :	29
4.2.1. Amélioration de la sécurité au renversement	30
4.3. Sécurité au soulèvement	31
4.4. Stabilité au poinçonnement :	31
5. Sécurité en cas de séisme	32
5.1. Vérification de la stabilité au glissement	32
5.2. Vérification de la stabilité au renversement.....	33
6. Barrage en BCR	34
6.1. Définition.....	34
6.2. Caractéristiques du BCR	35
6.3. Les avantages et inconvénients	36
6.3.1. Les avantages	36
6.3.2. Les inconvénients	36
6.4. Les critères d'implantations	37
6.5. Choix du profil du barrage poids BCR	37
7. Applications	38
Conclusion.....	42
Chapitre 3 : Barrage à contrefort.....	45
Introduction	45
1. Définition	45
2. Les types de barrage contreforts.....	46
3. Particularités géologiques	48
4. Exemples de barrages contreforts à travers le monde	49
5. La stabilité des barrages contreforts	50
6. Les avantages et inconvénients	51
6.1. Avantages	51
6.2. Inconvénients	51

7. Barrage évidé.....	52
Conclusion.....	52
Chapitre 4 : Barrage en voûte.....	55
Introduction	55
1. Définition	55
2. Différents types barrages en voûtes.....	57
3. Dimensionnement.....	58
3.1. Condition topographique	60
3.2. Rigidité de la fondation	60
3.3. Résistance mécanique de la fondation	60
3.4. Tenue des dièdres de fondation	60
4. Volume d'une voûte.....	61
5. Les sollicitations et charges à la stabilité d'un barrage en voûte	61
6. Les avantages et inconvénients	62
6.1. Avantages	62
6.2. Inconvénients	62
7. Barrage à voûtes multiples	63
7.1. Forme du barrage.....	64
7.2. Avantages et inconvénients.....	65
7.2.1. Avantages	65
7.2.2. Inconvénients	66
8. Application	67
Conclusion.....	68
Chapitre 5 : Barrage en terre	70
Introduction	70
1. Définition	70
2. Types de barrage en terre	70
2.1. Barrage en terre homogène	71
2.2. Barrage en terre à noyau central.....	71
2.3. Barrage à masque amont	72
2.4. Barrage en enrochement zoné	73
3. Choix du type de barrage en terre	74
3.1. Barrage en remblai	74
3.2. Barrage en enrochement :.....	74
4. Dimensionnement.....	74

4.1. Hauteur du barrage (Ht)	75
4.2. Le niveau des plus hautes eaux (PHE).....	75
4.3. Volume mort CVM :	75
4.4. La revanche (R)	76
4.5. Pentés des talus.....	77
4.6. La crête.....	77
4.6.1. Côte de la crête du barrage (CCB).....	77
4.6.2. La largeur en crête.....	78
4.6.3. La longueur en crête du barrage (Lt)	78
5. Les avantages et inconvénients	78
6. Etude des infiltrations.....	80
7. Le débit de fuite.....	81
8. La méthode de Pavlovsky	82
9. Dispositif de drainage.....	83
9.1. Drain vertical	83
9.2. Drain prismatique.....	84
9.3. Drain horizontal.....	85
10. Application	85
Conclusion.....	89
Référence bibliographiques.....	91

Listes des figures

Chapitre 1 :

Figure 1. 1 Critères topographiques pour le choix du site [2]	11
Figure 1. 2 Coupe type d'un barrage poids [3]	17
Figure 1. 3 Coupe type d'un barrage-voûte [3].....	18
Figure 1. 4 Coupe type d'un barrage à contreforts [3].....	19
Figure 1. 5 Coupe type d'une digue [4]	20

Chapitre 2 :

Figure 2. 1 types de profils barrage poids	25
Figure 2. 2 coupe transversale d'un barrage poids.....	26
Figure 2. 3 schéma des actions agissantes sur un barrage poids	27
Figure 2. 4 étapes construction barrage en BCR. Barrage d'Enciso (Espagne – Rioja) Source : Francisco Ortega	35
Figure 2. 5 profils du barrage poids type BCR.....	38

Chapitre 3 :

Figure 3. 1 Barrage à contreforts.....	45
Figure 3. 2 Schéma d'un barrage contrefort en voûte [6]	46
Figure 3. 3 Dispositions générales d'un barrage à contreforts [6]	46
Figure 3. 4 Barrage à contrefort a) à dalle courbée ; b) à dalle plane ; c) à voûte multiple [2]	48
Figure 3. 5 Schéma simplifié d'un barrage à contreforts [7]	49
Figure 3. 6 Photo du barrage de Roselend, France [7]	50
Figure 3. 7 Dispositions générale d'un barrage évidé	52

Chapitre 4 :

Figure 4. 1 Mode de travail des arcs d'une voûte	56
Figure 4. 2 différents types de barrages en voûte [8]	56
Figure 4. 3 Barrage à voute épaisse-Monteynard, France (H =153m).....	57
Figure 4. 4 Esquisse d'une voûte	58
Figure 4. 5 les épaisseurs des barrages en voûtes [2].....	59
Figure 4. 6 les types de vallées pour barrage en voûte [2]	60
Figure 4. 7 carte du barrage Mellègue à voûtes multiples.....	64
Figure 4. 8 Barrage à voutes multiples de Grandval -France, H =153m.....	64
Figure 4. 9 Forme et angle d'ouverture des voûtes [8]	65

Chapitre 5 :

Figure 5. 1 Barrage en terre homogène [9]	71
Figure 5. 2 Barrage en terre à noyau central [9].....	72
Figure 5. 3 Barrage à masque amont [9]	73

Figure 5. 4 Barrage en enrochement zoné.....	73
Figure 5. 5 schéma des différents hauteurs d'un barrage en terre.....	74
Figure 5. 6 Renard dans les remblais initiés par une érosion régressive [9].....	80
Figure 5. 7 Renard dans la fondation amorcée par une érosion régressive [9].....	80
Figure 5. 8 L'écoulement dans un sol.....	81
Figure 5. 9 schéma de partage en zone selon Pavlovsky.....	83
Figure 5. 10 drain vertical.....	84
Figure 5. 11 drain prismatique.....	84
Figure 5. 12 drain horizontal.....	85
Figure 5. 13 Barrage en terre homogène reposant sur un substratum imperméable.....	86
Figure 5. 14 Barrage en terre homogène avec drain horizontal reposant sur un substratum imperméable.....	87
Figure 5. 15 Schéma du barrage sans drain et sans charge avale.....	87

Liste des tableaux

Chapitre 1 :

Tableau 1. 1 Renseignements requis pour les études géologiques et géotechniques 12

Tableau 1. 2 Travaux de reconnaissances pour les études géologiques et géotechniques 13

Chapitre 4 :

Tableau 4. 1 Epaisseurs d'un barrage en voûte en différents vallées 59

Chapitre 5 :

Tableau 5. 1 Valeurs des pentes des talus en fonction de la hauteur et le type de la digue 77

Tableau 5. 2 Les débits de résurgences en fonction de l'angle α 82

Liste d'annotation et d'abréviations

- a : distance entre deux lignes de courants,
A : Transport solide spécifique en $T/Km^2.An$
b : distances entre deux lignes équipotentielles
B : surface de contact entre le barrage et sa fondation
BCR : le béton compacté au rouleau
BCV : le béton conventionnel vibré
c : la cohésion
CC: Côte crête du barrage
CC – CR : Sécurité + tassements
CFL : Côte fond du lit
PHE : Côte des plus hautes eaux
CPHE - CRN : Charge sur le déversoir
CR : Côte revanche
CR – CPHE : Revanche
CRN : Côte retenue normale
CRN - CVM : Volume utile de la retenue
CVM : côte du volume mort
CVM – CFL : Volume mort
D : action dynamique dues au séismes
 d_B : densité du béton
e : épaisseur
E : poussée de l'eau
emc : épaisseur minimum en crête
f : coefficient de frottement
F: Fetch en Km.
 $F_{glissement}$: le coefficient de sécurité au glissement
 $F_{renversement}$: le coefficient de sécurité au renversement
 F_s : le coefficient de sécurité au soulèvement

F_T : poussée des terres (sédiments accumulés au fond du lac)
 h : Epaisseur du drain
 H : hauteur du barrage (m)
 h_v : La hauteur des vagues en m
 i : angle de dilatance barrage / rocher sur la surface de glissement
 K : Perméabilité du matériau du drain
 L : Longueur du drain
 L_b : largeur du site au niveau de la base (m).
 L_c : largeur du site simplifiée au niveau de la crête (m)
 M_R : moment renversant (due à des poussées et des sous-pressions)
 M_s : moment stabilisant (due au poids et à la poussée aval)
 P : la force verticale due au poids du barrage
 p : pression d'eau à son niveau
 q : capacité de décharge par mètre de largeur du drain
 QH_{TOT} = charge sismique horizontal de substitution (masse du barrage et masse de l'eau oscillant avec le barrage)
 q_i : le débit traversant un canal « i »
 QV_{TOT} = charge sismique verticale de substitution
 r : rayon amont de cet arc
 R : la revanche exprimé en mètre (m)
 R_E : le rendement économique
 r_{eau} : masse volumique de l'eau
 R_T : le rendement topographique
 s : Surface du bassin versant en Km^2
 S : les sous-pressions
 S_E : la surface écran de la digue donnée par la section transversale de l'Oued.
 T : actions à cause de températures
 v : Vitesse de propagation des vagues m/s
 V : Vitesse du vent en (Km/h)
 V_D : le volume de la digue.
 VM : Volume mort pendant une durée d'exploitation N en années
 V_p : volume du barrage poids (m^3)
 V_R : le volume de la retenue calculé à l'aide des courbes HSV

Vu : volume utile de la voute

W: Epaisseur du drain

ΣG : forces verticales

ΣH = somme des forces statiques horizontales,

ΣQ : forces horizontales

ΣV = somme des forces statiques verticales

φ : angle de frottement béton / rocher sur la surface de glissement,

σ_m : contrainte normale effective moyenne à la surface de contact,

τ_m : contrainte de cisaillement moyenne à la surface de contact.

σ : contrainte moyenne dans un arc

ρ : masse volumique de la vase comprise en général entre 1.4 et 1.6 T/m³

Δq : Le débit traversant un quadrilatère est donné par

Δh : la perte de charge élémentaire

nh : nombre d'intervalles entre les lignes équipotentiels

nc : nombre de tubes d'écoulement (de canaux)

Introduction

Les barrages, par leur capacité à stocker, réguler et distribuer l'eau, sont des éléments clés dans divers secteurs tels que l'approvisionnement en eau, l'agriculture, l'industrie et la production d'énergie électrique. L'objectif de cette unité d'enseignement est de donner aux étudiants en formation Master 2, spécialité Voies et Ouvrages d'Art « VOA », les connaissances de base sur la conception de différents types de barrages. Les étudiants apprendront à comprendre les concepts fondamentaux de la conception des barrages, y compris la sélection des matériaux, les contraintes de sécurité et la gestion des risques. Les étudiants devraient également être en mesure de comprendre les différentes méthodes de construction des barrages et les aspects environnementaux et sociaux liés à leur construction.

Les étudiants doivent avoir une connaissance de base en mathématiques et en physique, ainsi qu'une compréhension générale des principes du génie civil, en MDS, Géotechnique routière. Une connaissance de base en hydrologie et en hydraulique est également recommandée.

Le polycopié comprendra des chapitres couvrant les différents types de barrages :

- Chapitre 1 : Généralités sur les barrages.
- Chapitre 2 : Barrages Poids
- Chapitre 3 : Barrage en contreforts
- Chapitre 4 : Barrage en voûte
- Chapitre 5 : Barrage en terre

Le mode d'évaluation : Contrôle Continu : 40% ; Examen : 60%

Chapitre 1 :

Généralités sur les barrages

Chapitre 1 : Généralités sur les barrages

Introduction

Un barrage est un ouvrage d'ingénierie conçu pour retenir l'eau d'une rivière et former un lac artificiel. Ils peuvent être construits en différentes matières telles que la terre, le béton ou la pierre. Les barrages sont utilisés pour diverses raisons, comme la production d'électricité, l'irrigation agricole, l'approvisionnement en eau potable et la régulation des crues.

Les crues sont des phénomènes naturels qui peuvent causer des inondations et des dégâts matériels importants. Les barrages peuvent aider à prévenir les inondations en retenant l'eau lors des fortes pluies. Les ouvrages de prises et de vidange sont des éléments importants des barrages. Les ouvrages de prises permettent de collecter l'eau de la rivière pour la stocker dans le lac artificiel formé par le barrage. Les ouvrages de vidange permettent quant à eux de relâcher l'eau stockée dans le lac lorsque cela est nécessaire, soit pour prévenir les inondations lors des crues, soit pour fournir de l'eau pour l'irrigation ou la production d'électricité.

En raison de la géologie et de la topographie du site, la construction de barrages en terre est plus courante dans certains pays comme l'Algérie. Les barrages en terre sont généralement construits dans les régions où la topographie est vallonnée ou montagneuse. Les conditions géologiques, notamment la nature du sol et la présence de roches solides, sont également importantes pour la construction de barrages en terre. Les ingénieurs doivent également prendre en compte les facteurs hydrologiques tels que la quantité d'eau qui peut être stockée dans le lac formé par le barrage et la quantité d'eau qui peut être évacuée lors des crues.

1. Historique des barrages

Les barrages ont une histoire millénaire. Les premiers ouvrages pour retenir l'eau remontent à la préhistoire, notamment en Égypte, où des barrages servaient à stocker de l'eau potable, à irriguer les cultures, ainsi qu'à élever du poisson dans des viviers et des piscicultures. Le plus ancien barrage connu en Égypte, d'une longueur de 115 mètres, a été construit dans la vallée de Garawi vers 3000 av. J.-C.

Au Moyen Âge, les barrages ont été largement utilisés en Europe pour alimenter les moulins à eau. Ces moulins ont été utilisés pour moudre du blé, écraser des olives et même pour l'industrie textile.

Au cours des siècles suivants, les barrages ont évolué pour devenir des ouvrages de plus en plus sophistiqués et de plus en plus grands. Les barrages modernes sont utilisés pour produire de l'électricité, pour stocker l'eau potable, pour irriguer les terres agricoles, pour protéger contre les crues et pour le contrôle des écoulements.

Le plus grand barrage au monde, le barrage des Trois-Gorges en Chine, a été achevé en 2012. Il mesure 2,3 kilomètres de long et a une hauteur de 185 mètres. Sa production annuelle d'électricité atteint 84 700 GWh/an.

2. Définition

Selon Larousse, un barrage est un ouvrage d'art érigé sur un cours d'eau pour réguler son écoulement et stocker de l'eau à des fins diverses telles que l'irrigation, l'eau potable, l'énergie hydroélectrique et la protection contre les inondations. Il peut créer soit une retenue à niveau constant, soit une retenue à niveau variable, comme c'est le cas pour les barrages d'accumulation ou d'emmagasinage. Les retenues à niveau variable sont utilisées pour régulariser le régime des rivières, réduire les débits des crues et renforcer les débits d'étiage.

Les barrages peuvent être classés en deux catégories principales en fonction de l'usage et des matériaux utilisés : les barrages rigides et les barrages souples. Pour les grands barrages, il est essentiel de déterminer les risques qu'ils présentent pour les personnes et les biens. Cela nécessite un classement par l'autorité gouvernementale, en se basant sur des paramètres tels que le type de barrage, sa localisation, ses dimensions, sa capacité de retenue, son âge, son état et les conséquences potentielles en cas de rupture [1].

3. Fonctions des barrages

Les barrages peuvent avoir plusieurs fonctions en fonction des besoins et des demandes. Voici quelques détails sur les différentes fonctions des barrages :

3.1. Approvisionnement en eau

Les barrages peuvent être utilisés pour stocker de l'eau et la rendre disponible pour la consommation humaine, l'agriculture, l'industrie, ou pour d'autres usages. Les retenues créées par les barrages permettent également de réguler la distribution de l'eau, en la fournissant de manière constante et régulière.

3.2. Production hydroélectrique

Les barrages peuvent être utilisés pour produire de l'électricité à partir de l'énergie hydraulique. Les turbines installées dans les centrales hydroélectriques sont alimentées par l'eau stockée dans les retenues créées par les barrages, ce qui permet de produire une énergie propre et renouvelable.

3.3. Navigation

Les barrages peuvent être utilisés pour permettre la navigation sur les cours d'eau en créant des voies navigables. Les écluses sont souvent utilisées pour permettre aux bateaux de passer le barrage et de continuer leur chemin.

3.4. Contrôle d'inondation et soutien d'étiage

Les barrages peuvent être utilisés pour contrôler le débit des cours d'eau en période de crue et en période de sécheresse. En période de crue, les barrages peuvent stocker l'eau en amont et la libérer progressivement pour éviter les inondations. En période de sécheresse, les barrages peuvent libérer l'eau stockée pour soutenir le débit des cours d'eau en aval.

3.5. Contrôle du lit du cours d'eau

Les barrages peuvent être utilisés pour contrôler le lit des cours d'eau en évitant l'érosion et la dégradation des berges. Les barrages peuvent également permettre de réguler les sédiments en les stockant dans la retenue et en les relâchant selon les besoins.

3.6. Tourisme aquatique

Les barrages peuvent être utilisés pour le tourisme, en offrant des activités telles que la baignade, la pêche, les sports nautiques et les croisières. Les retenues créées par les barrages peuvent également offrir des paysages pittoresques et des sites touristiques.

4. Critères de choix du type de barrage

Avant la construction d'un barrage, il est essentiel de mener une étude préliminaire détaillée du site et de son environnement pour déterminer le type de barrage le plus adapté. Cette étude doit notamment prendre en compte les caractéristiques géographiques du bassin versant, telles que la topographie, la géologie et les caractéristiques hydrologiques, telles que les débits et les

régimes des cours d'eau. Il est également important de considérer les sédiments qui se déplacent dans le cours d'eau et leur potentiel impact sur le barrage.

La climatologie et la tectonique sont également des facteurs importants à prendre en compte lors de l'étude de faisabilité d'un barrage. Les précipitations et les événements climatiques extrêmes tels que les tempêtes, les typhons et les cyclones peuvent affecter la sécurité et la stabilité d'un barrage. Les mouvements de la croûte terrestre liés à la tectonique des plaques peuvent également affecter la sécurité et la stabilité d'un barrage.

Enfin, l'environnement naturel et social doit être pris en compte lors de la planification de la construction d'un barrage. Les impacts environnementaux tels que la perte d'habitats naturels, la fragmentation des écosystèmes, la modification des régimes d'écoulement et les impacts sociaux tels que la relocalisation des populations doivent être évalués et minimisés autant que possible.

4.1. Étapes administratives

Les étapes administratives pour la construction d'un barrage impliquent plusieurs processus qui doivent être respectés afin d'assurer une mise en œuvre efficace et conforme aux règles et réglementations en vigueur. La première étape consiste à identifier les contraintes, les problèmes et les perspectives liés au projet, en élaborant une fiche technique et un cahier des charges qui seront soumis à l'approbation des instances compétentes.

Une fois la fiche technique et le cahier des charges approuvés, l'appel d'offres peut être lancé sous différentes formes, selon les réglementations en vigueur. Les offres seront ensuite analysées et jugées, et un avis d'attribution provisoire sera publié. La rédaction des documents contractuels suivra, avant l'approbation finale et l'engagement de toutes les parties impliquées dans le projet.

Ces étapes administratives sont cruciales pour la réussite du projet, car elles permettent de garantir la transparence et l'équité dans la sélection des entreprises et des prestataires, ainsi que la conformité aux exigences en matière de sécurité et d'environnement.

4.2. Etude préliminaires

Les études préliminaires d'un projet de barrage concernent les opérations de recherche et de choix du site du futur barrage en cernant tous les problèmes relatifs aux conditions topographiques, géologiques, géotechniques et hydrologiques.

- Collecte de données
- Recherche et choix du site
- Connaissance des conditions topographiques
- Connaissance des conditions géologiques
- Connaissance des conditions géotechniques
- Connaissance des conditions hydrologiques

4.2.1. La collecte de données

C'est une étape importante pour les études préliminaires d'un projet de barrage. Elle comprend la collecte de données géographiques, géologiques, géotechniques, hydrologiques et environnementales. Les données géographiques comprennent des informations sur le relief, la végétation, la faune, la flore et l'utilisation des terres. Les données géologiques concernent la structure géologique du site et les propriétés des roches et des sols. Les données géotechniques comprennent les caractéristiques mécaniques des sols et des roches, les conditions de stabilité, la perméabilité et la porosité.

Les données hydrologiques sont essentielles pour la conception d'un barrage, car elles permettent de déterminer la quantité d'eau qui peut être stockée et la façon dont elle sera utilisée. Les données hydrologiques comprennent des informations sur les précipitations, l'évaporation, l'infiltration, l'écoulement des rivières et des cours d'eau, les crues et les étiages. Les données environnementales comprennent des informations sur les impacts potentiels du projet sur l'environnement, tels que l'impact sur la faune, la flore et les habitats naturels.

4.2.2. Le choix du site

Après avoir fixé les objectifs de la réalisation d'un barrage dans une zone donnée, on commence l'étude de faisabilité par la recherche d'un site apte à satisfaire ces objectifs fixés au préalable. Cette recherche est effectuée sur des documents existants (carte d'état-major, photos aériennes ; cartes géologiques etc...).

En général, à ce stade d'étude on choisit plusieurs sites. Le choix définitif doit tenir compte de plusieurs facteurs dont, l'utilisation de l'eau, mais surtout on doit rechercher le site qui donne

le m³ d'eau mobilisé le plus économique possible et il est conseillé de vérifier sommairement l'inégalité suivante :

$$\frac{\text{volume d'eau stockée}}{\text{volume du matériaux de barrage}} \geq 5 \quad \text{pour les petits barrages}$$

$$\frac{\text{volume d'eau stockée}}{\text{volume du matériaux de barrage}} \geq 10 \quad \text{pour les grands barrages}$$

Le choix définitif du site, se fait après la visite du (ou des) site afin de se fixer sur les points suivants :

- Accès au site.
- Couvert végétal du bassin versant.
- Morphologie du cours d'eau et de son bassin versant.
- Zone de retenue d'eau.

Le choix du site du barrage consiste à fixer l'axe du barrage au niveau du resserrement de la retenue. Le concepteur a souvent le choix entre 2 ou 3 axes le long du resserrement. Deux critères sont pris en compte : le **critère géologique** et puis le **critère topographique**.

Une fois le choix du site définitif, il est nécessaire de réaliser une étude géotechnique pour mieux connaître le sous-sol et évaluer la stabilité du futur barrage. Cette étude permettra également de déterminer la nature des matériaux à utiliser pour la construction du barrage.

4.2.3. Études topographiques

a) Topographie du bassin versant

La topographie du bassin versant est un élément clé dans la recherche du site d'un barrage, car elle permet de cerner la morphologie du bassin versant et de faire des études hydrologiques approfondies. Les cartes topographiques sont utilisées pour cela, ainsi que des photographies aériennes, des cartes aux échelles appropriées et des études hydrologiques précises.

La topographie permet de définir les éléments caractéristiques du bassin, tels que la surface du bassin versant, son périmètre, sa forme, sa pente, sa couverture végétale, son réseau hydrographique, etc. Ces éléments sont indispensables pour réaliser des études hydrologiques qui permettront de déterminer le volume d'eau à stocker dans le barrage.

La précision des cartes topographiques est un élément important pour définir le relief du bassin versant. Un relief complexe peut rendre la réalisation d'un barrage plus difficile et plus coûteuse. Il est donc essentiel de disposer de cartes topographiques précises pour définir avec précision les caractéristiques du bassin versant et faciliter la recherche du site le plus approprié pour la construction du barrage.

b) Topographies de la vallée du cours d'eau

La topographie de la vallée est un élément crucial dans la sécurité des biens et des personnes, tant en amont qu'en aval du barrage. En effet, la topographie permet de déterminer les zones qui seront submergées après la mise en eau du barrage, ainsi que les zones qui pourraient être impactées en cas de rupture de celui-ci.

En aval du barrage, il est important de prendre en compte l'étendue de la carte pour étudier la propagation des ondes de la crue et leur incidence sur la sécurité. Il convient également de définir les sections de contrôle et leurs dimensions, c'est-à-dire les endroits où des mesures de contrôle et de régulation de l'eau pourront être prises en cas de besoin.

Enfin, la pente de l'oued est également un élément important à prendre en compte, car elle peut influencer la vitesse d'écoulement de l'eau en aval du barrage et donc la propagation des ondes de la crue.

c) Topographie du site du barrage et de sa retenue

Le rendement topographique est un critère important dans le choix du site d'un barrage. Il permet de déterminer le rapport entre le volume de la retenue et la surface écran de la digue, qui est donnée par la section transversale de l'Oued. Ce rendement est calculé à l'aide des courbes HSV (hauteur surface volume) qui permettent d'estimer la capacité de la retenue en fonction de la cote du plan d'eau. Il est calculé de la façon suivante :

$$R_T = \frac{V_R}{S_E}$$

Avec :

V_R : le volume de la retenue calculé à l'aide des courbes HSV

S_E : la surface écran de la digue donnée par la section transversale de l'Oued.

Le rendement économique est un autre critère pris en compte dans le choix du site. Il permet de déterminer le rapport entre le volume de la retenue et le volume de la digue. Ce rendement

permet d'évaluer le coût de la construction de la digue et de la retenue en fonction de leur capacité respective.

$$R_E = \frac{V_R}{V_D}$$

Avec :

V_R : le volume de la retenue

V_D : le volume de la digue.

Ces deux rendements sont utilisés pour faire une comparaison topographique entre les différents sites proposés pour le barrage. Il est important de trouver un site qui offre un bon équilibre entre ces deux rendements, c'est-à-dire un site qui offre une capacité de stockage de l'eau suffisante tout en minimisant le coût de construction de la digue et de la retenue.

En fin de compte, le choix du site doit tenir compte de nombreux facteurs, tels que l'utilisation de l'eau, l'accès au site, le couvert végétal du bassin versant, la morphologie du cours d'eau et de son bassin versant, la zone de retenue d'eau, ainsi que les critères topographiques tels que le rendement topographique et économique. Tous ces facteurs doivent être pris en compte pour trouver le site idéal qui répond aux objectifs du barrage tout en minimisant les coûts et en assurant la sécurité des biens et des individus en aval et en amont du barrage.

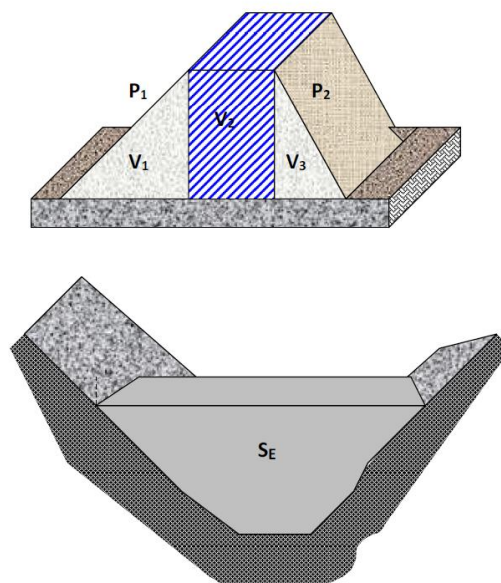


Figure 1. 1 Critères topographiques pour le choix du site [2] .

4.2.4. Études géologiques et géotechniques

Les études géologiques et géotechniques d'un barrage sont effectuées dans le but de vérifier les points suivants (voir tableau 1.1) :

- La stabilité et l'étanchéité des fondations de l'ouvrage, de ses ouvrages annexes, de la cuvette ainsi que ses fondations.
- La recherche des matériaux de construction, leurs identifications et la vérification de leurs qualités.

Tableau 1. 1 Renseignements requis pour les études géologiques et géotechniques

Fondations	Matériaux de constructions
<ul style="list-style-type: none"> - Tassements sol - Déformations roche - Perméabilité - Sécurité à la rupture - Altération 	<ul style="list-style-type: none"> - Granulométrie - Teneur en eau naturelle - Comportement au compactage - Perméabilité - Tassements / consolidations - Stabilité - Durabilité

Le critère géologique se base sur la qualité des fondations en termes de résistance, rigidité, fracturation et pendage. Pour pouvoir comparer géologiquement entre les axes proposés, une étude géologique et géotechnique détaillée de chaque axe est requise par des travaux de reconnaissances (voir tableau 1.2).

Tableau 1. 2 Travaux de reconnaissances pour les études géologiques et géotechniques

Géologique	<ul style="list-style-type: none"> - Observation à la surface - Géophysique Couverture terrain meuble Stratigraphie Failles - Forages Profils géologique Fracturation Couverture par roche altéré - Tranchées et puits Profil géologique Failles, fissures...etc. - Galleries Profil géologique Failles, fissures...etc.
Géotechniques	<ul style="list-style-type: none"> - Forage roches Carottage RQD (Rock Quality Designation), taux de pièces >10 cm, indice de fissuration Dilatometer (E) Essais Lugeon (Perméabilité) Résistance à la compression/ traction/ cisaillement (échantillon en laboratoire) Contraintes initiales - Galleries (massif rocheux) Essais au verin plat (E, σ_0) Essai à la plaque E Essai au cisaillement τ

4.2.5. Études hydrologiques

Les études hydrologiques pour la construction d'un barrage sont indispensables pour garantir une gestion optimale des ressources en eau et assurer la sécurité des populations vivant en aval. Les études hydrologiques sont divisées en deux parties principales :

a) Principe :

Les études hydrologiques visent à déterminer les conditions hydrométriques du bassin versant et du site du barrage. Cela comprend notamment l'interaction entre le bassin et le site du barrage, le dimensionnement des tranches du réservoir, ainsi que les ouvrages annexes. Les études hydrologiques permettent également de déterminer les caractéristiques de régularisation nécessaires pour garantir une gestion optimale des ressources en eau.

b) Contenu sommaire :

Les études hydrologiques comprennent les éléments suivants :

- Étude des séries hydrologiques, telles que les précipitations, les apports et les crues. Cette étude permet de déterminer les caractéristiques du régime hydrologique du bassin versant et de prévoir les conditions de remplissage du réservoir.
- Étude du laminage de la crue. Cette étude permet de déterminer la régularisation de la crue et la capacité de stockage du réservoir.
- Étude de régularisation. Cette étude permet de déterminer les caractéristiques de régularisation nécessaires pour garantir une gestion optimale des ressources en eau.
- Étude de l'évaporation au droit du site. Cette étude permet de déterminer les pertes en eau due à l'évaporation à la surface du réservoir.
- Caractéristiques du bassin versant. Cette étude permet de déterminer les caractéristiques du bassin versant, telles que la topographie, la géologie, la végétation, le sol, le climat, etc.
- Calcul de remplissage et du volume de la retenue. Cette étude permet de déterminer la capacité de stockage du réservoir et les conditions de remplissage en fonction du régime hydrologique.
- Définition et étude des transports solides. Cette étude permet de déterminer les quantités de sédiments transportées par le cours d'eau et les conditions de leur accumulation dans le réservoir.
- Définition des conditions d'exploitation de la retenue en fonction des besoins. Cette étude permet de déterminer les conditions optimales d'utilisation de la retenue pour répondre aux besoins en eau potable, irrigation, production d'énergie, etc.

4.2.6. Aspects économiques

Les aspects économiques liés à la construction et à l'exploitation des barrages sont d'une importance cruciale. Malheureusement, les décisions relatives à la construction de barrages sont souvent motivées par des considérations économiques à court terme, en particulier pour les barrages hydro-électriques. Les données de base pour les calculs économiques peuvent être incertaines, ce qui peut entraîner des erreurs dans les projections financières. De plus, les coûts environnementaux, sociaux et de santé sont souvent ignorés ou sous-estimés lors de la prise de décisions.

En outre, il y a souvent un manque de concertation entre les différents acteurs impliqués dans la décision de construire un barrage. Il est essentiel de tenir compte des avis et des préoccupations des communautés locales, des groupes de défense de l'environnement et des autres parties prenantes dans le processus décisionnel.

Enfin, les impacts sur le régime des cours d'eau et les écosystèmes associés sont souvent sous-estimés, voire ignorés. Les barrages peuvent causer des dommages environnementaux considérables en modifiant les débits d'eau, en perturbant les habitats et les espèces aquatiques et en affectant la qualité de l'eau. Ces impacts peuvent être catastrophiques pour les écosystèmes et pour les communautés qui en dépendent. Il est donc essentiel d'inclure une analyse complète et rigoureuse des impacts environnementaux et sociaux dans la prise de décisions concernant la construction et l'exploitation des barrages.

4.2.7. Aspect environnement

Les barrages peuvent avoir de nombreux impacts sur l'environnement, notamment sur les régimes fluviaux et les écosystèmes associés. Les études d'impact environnemental qui précèdent la construction d'un barrage ont tendance à sous-estimer ces impacts. Par exemple, la sédimentation dans les réservoirs peut causer une accumulation de sédiments qui modifie le régime fluvial en aval du barrage, entraînant des problèmes d'érosion et de perte de biodiversité. La modification de la morphologie des cours d'eau peut également avoir un impact sur la faune et la flore.

Les retenues peuvent également entraîner une eutrophisation des eaux, qui peut favoriser la croissance de plantes aquatiques et réduire la qualité de l'eau. Les pertes par évaporation à haute

altitude peuvent également avoir un impact sur la disponibilité en eau dans les zones environnantes.

Il est important que les études environnementales évaluent correctement tous les impacts potentiels du barrage sur l'environnement, afin que les décideurs disposent de toutes les informations nécessaires pour prendre des décisions éclairées sur la construction et l'exploitation du barrage.

5. Les différents types de barrages

La géologie et la topographie du site sont des facteurs clés dans le choix du type de barrage à construire. Par exemple, les barrages en béton sont souvent utilisés pour les sites présentant des roches solides et résistantes, tandis que les barrages en maçonnerie sont plus adaptés pour les sites présentant des sols instables. Les digues en terre sont souvent utilisées pour les vallées larges et peu profondes où les coûts de construction des barrages en béton seraient prohibitifs, tandis que les digues en enrochement sont utilisées pour les sites où les sols ne sont pas suffisamment résistants pour supporter une digue en terre.

5.1. Le barrage poids

Les barrages-poids sont des barrages massifs qui sont principalement constitués de béton ou de pierre. Leur forme générale est triangulaire dans une coupe verticale, ce qui leur permet de résister à la poussée de l'eau. Leur poids propre suffit souvent à maintenir la stabilité du barrage et à le maintenir en place.

Cependant, la pression de l'eau contre le barrage peut causer des glissements de terrain dans les couches de sol sous-jacentes. Pour éviter cela, les barrages-poids sont généralement conçus avec une base plus large que leur sommet, ce qui leur donne une forme de trapèze. Le poids du barrage est distribué sur une plus grande surface, ce qui réduit la pression au sol et maintient la stabilité du barrage.

En fonction de la topographie et de la géologie du site, les barrages-poids peuvent être construits sur des fondations rocheuses ou sur des couches de sol plus profondes. Dans tous les cas, il est important de choisir un site avec des caractéristiques géologiques appropriées pour éviter les risques d'affaissement ou de glissement de terrain.

En général, les barrages-poids sont construits perpendiculairement à la rivière ou au cours d'eau, ce qui signifie que leur face amont est verticale et leur face aval est inclinée. Cette forme permet de résister efficacement à la pression de l'eau. Les barrages-poids peuvent également être construits avec une partie voûtée pour augmenter leur stabilité, ce qui leur permet de résister à une plus grande pression de l'eau.

En résumé, les barrages-poids sont des barrages massifs et solides qui sont principalement construits en béton ou en pierre. Ils sont conçus pour résister à la pression de l'eau en utilisant leur propre poids. Ils sont généralement construits avec une base plus large que leur sommet pour maintenir leur stabilité, et peuvent être construits avec une partie voûtée pour augmenter leur résistance.

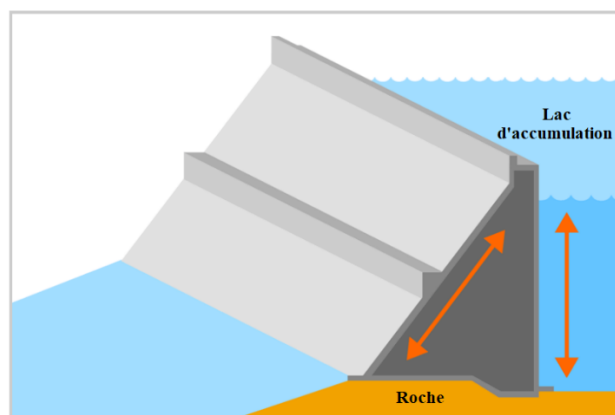


Figure 1. 2 Coupe type d'un barrage poids [3]

5.2. Le barrage-voûte

Le barrage-voûte est généralement construit en béton et sa forme courbe permet de mieux résister à la pression de l'eau qu'un barrage-poids. Cette forme en voûte permet de réduire la quantité de matériaux nécessaires à la construction, car la charge est principalement transmise aux flancs de la vallée, ce qui réduit la contrainte sur le barrage lui-même.

Le barrage-voûte est souvent utilisé dans des vallées étroites où il n'y a pas suffisamment d'espace pour construire un barrage-poids. Il peut être soutenu par des contreforts, qui sont des murs en béton construits perpendiculairement à la voûte pour renforcer sa stabilité. Le barrage-voûte peut également être combiné avec d'autres types de barrages pour créer des systèmes de retenue plus complexes.

La construction d'un barrage-voûte nécessite une étude géologique minutieuse pour s'assurer que les parois rocheuses sur lesquelles il s'appuie sont stables et capables de supporter le poids du barrage et de la retenue. La construction d'un barrage-voûte est généralement plus coûteuse que celle d'un barrage-poids en raison de la complexité de sa forme et de la nécessité de renforcer la stabilité avec des contreforts ou d'autres moyens.

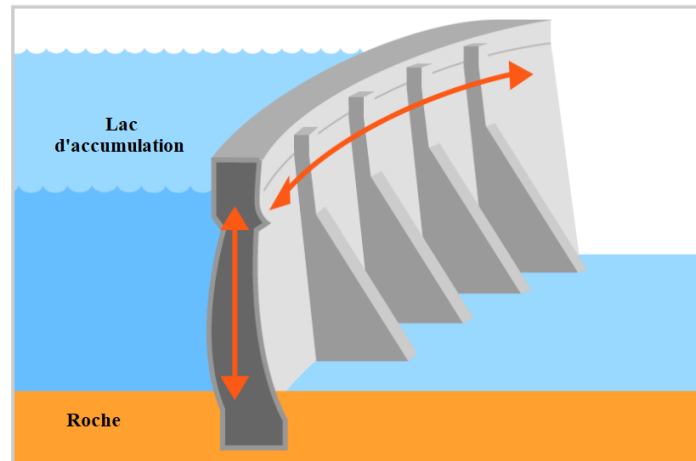


Figure 1. 3 Coupe type d'un barrage-voûte [3]

5.3. Le barrage à contreforts

Le barrage à contreforts est un type de barrage en béton qui utilise des contreforts pour réduire les contraintes sur le mur principal. Les contreforts sont des piliers ou des murs perpendiculaires au mur principal et espacés régulièrement. La pression de l'eau est transférée du mur principal aux contreforts, qui à leur tour transfèrent les charges aux fondations du barrage.

Il existe plusieurs variantes du barrage à contreforts en fonction de la forme des contreforts et de leur disposition. Les contreforts à têtes arrondies sont les plus courants et sont généralement placés du côté amont du barrage. Les contreforts peuvent également être disposés en forme de voûte, ce qui permet de réduire la hauteur du mur principal et de répartir les charges sur une plus grande surface.

Le barrage à contreforts est souvent utilisé pour les barrages de moyenne et grande hauteur dans lesquels la pression de l'eau est importante. Ce type de barrage est également efficace dans les régions où le sol est instable car il répartit la charge sur une plus grande surface. Cependant, il nécessite une grande quantité de béton et une grande précision de construction pour assurer la stabilité et la sécurité de l'ouvrage.

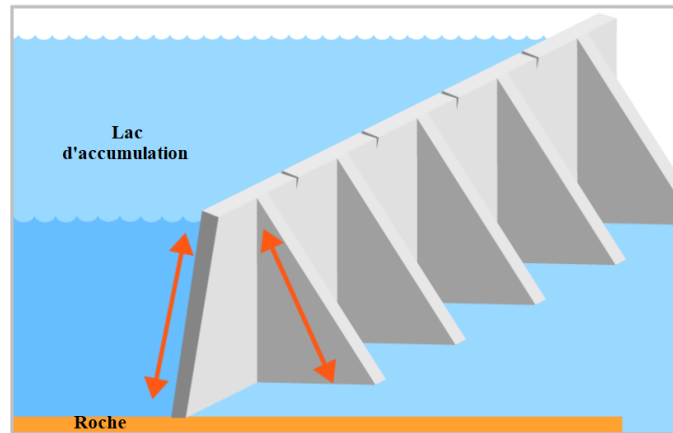


Figure 1. 4 Coupe type d'un barrage à contreforts [3]

5.4. La digue

La digue est généralement construite en terre ou en enrochement et est beaucoup plus large que les barrages en béton ou en maçonnerie. Elle est utilisée pour retenir l'eau et former une retenue. La digue peut également être renforcée par un revêtement étanche en béton ou en asphalte sur sa face amont pour empêcher l'eau de s'infiltrer.

La construction d'une digue nécessite la mise en place d'un noyau étanche, qui peut être constitué de différents matériaux, tels que de l'argile ou de la bentonite, pour empêcher l'eau de s'infiltrer à travers la digue. Les remblais en terre ou en enrochement sont placés de chaque côté du noyau étanche pour renforcer la structure.

Les digues peuvent être utilisées pour diverses fins, notamment pour protéger les terres contre les inondations, pour former des réservoirs d'eau, pour la création de canaux de navigation, pour la production d'énergie hydroélectrique, ou encore pour des activités récréatives telles que la baignade ou la navigation de plaisance.

En fin de compte, le choix du type de barrage dépend d'une variété de facteurs, notamment la géologie et la topographie du site, le coût de la construction, la disponibilité de matériaux locaux et la fonctionnalité du barrage.

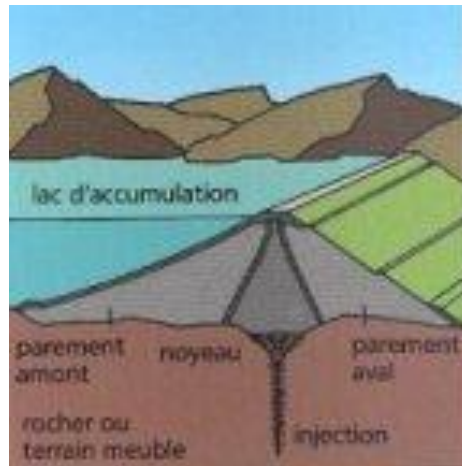


Figure 1. 5 Coupe type d'une digue [4]

6. L'évacuateur de crue

La gestion de l'évacuation des crues peut avoir des conséquences sur le choix du type de barrage, selon les conditions hydrologiques et topographiques du site concerné. Tout constituant d'un évacuateur de crue doit résister aux poussées hydrostatiques, aux charges hydrodynamiques, à la poussée de terres et éventuellement aux variations de la température ou même au gel. Il est toujours nécessaire de prévoir un revêtement (enrochement, maçonnerie, le béton de ciment et le béton bitumeux).

En effet, un barrage en terre peut plus difficilement intégrer un évacuateur de crue, notamment dans le cas des ouvrages les plus grands. Dans un tel cas, les concepteurs pourront être amenés à préférer un barrage en béton. En outre, un barrage en terre s'avère plus sensible à la submersion en cours de travaux qu'un barrage en béton.

L'évacuation des crues comporte en effet deux aspects :

Pendant la construction du barrage :

Au cours du chantier, celui-ci va être protégé contre une crue d'une fréquence donnée, au minimum dix ans - souvent plus en fonction de sa durée. Le risque sera calculé de telle façon que les conséquences économiques soient supportables et qu'il ne puisse se produire de pertes humaines.

Certains ouvrages de dérivation construits alors, notamment des tunnels, seront réutilisés ultérieurement dans le fonctionnement du barrage lui-même, par exemple comme vidange de fond définitive ou comme évacuateur de crues.

Une fois le barrage achevé :

Une fois le barrage en service, il existe plusieurs solutions pour évacuer les crues. Mais la hauteur croissante des ouvrages et l'énergie à dissiper lors de celles-ci amènent généralement les concepteurs à opter pour la réponse suivante : un seuil, commandé ou non par des vannes, suivi par un coursier en saut à ski pour dissiper l'énergie, avec, éventuellement, à son extrémité un bassin de dissipation.

L'évacuateur de crue peut être considéré comme la partie la plus importante d'un barrage. Il peut absorber des débits plus importants de 10 à 30% par rapport au débit de la crue de projet sans dégâts graves, comme il peut maintenir le niveau de l'eau à la cote désirée en temps normal.

Conclusion

Les barrages sont des ouvrages hydrauliques qui permettent de stocker de l'eau dans une retenue, créant ainsi une dépression artificielle dans une vallée. Les barrages ont plusieurs fonctions, telles que la production d'énergie hydroélectrique, l'irrigation, la régulation des cours d'eau pour la navigation, la protection contre les crues, le contrôle de l'érosion et la régulation du régime des eaux.

Il existe différents types de barrages, chacun adapté à des situations et des environnements particuliers. Les barrages en béton sont les plus courants et sont utilisés dans des zones à forte contrainte, car ils sont capables de résister à des pressions d'eau élevées. Les barrages en poids sont construits en béton ou en pierre et utilisent uniquement leur poids pour résister à la poussée de l'eau. Les barrages en contrefort, également construits en béton, s'appuient sur des contreforts pour répartir la pression de l'eau sur une surface plus large.

Les barrages-voûtes, également en béton, ont une forme arquée qui permet de reporter la poussée de l'eau sur les flancs de la vallée. Ils sont souvent utilisés dans des vallées étroites. Les barrages en remblai sont construits en terre ou en enrochement, avec un noyau étanche pour empêcher la fuite d'eau. Les digues sont également des types de barrages en remblai, avec une section verticale beaucoup plus large que les barrages en béton.

Les barrages peuvent avoir des impacts environnementaux et sociaux importants, tels que la perturbation des écosystèmes, la dégradation des habitats naturels, la perte de terres cultivables et de moyens de subsistance pour les populations locales, la relocalisation forcée des

populations et la modification du régime des cours d'eau. Il est donc important de mener des études d'impact environnemental et social approfondies avant de construire un barrage et de prendre en compte les conséquences à long terme pour les communautés et les écosystèmes locaux.

Chapitre 2 :

Barrages poids

Chapitre 2 : Barrage poids

Introduction

Les barrages poids sont des barrages construits en utilisant des matériaux lourds, tels que la pierre, le béton ou le métal, pour former une structure solide et résistante qui peut retenir l'eau d'un lac ou d'un fleuve. Leur conception est relativement simple, et ils sont largement utilisés dans le monde entier pour la production d'énergie hydroélectrique, la régulation des cours d'eau et la gestion des crues.

Jusqu'au XIXe siècle, la plupart des barrages poids étaient construits en utilisant des pierres taillées assemblées avec du mortier, mais avec l'essor de la révolution industrielle, la construction des barrages poids est passée au béton armé. Cependant, la construction de barrages poids en béton était souvent coûteuse et nécessitait beaucoup de temps et de main-d'œuvre, ce qui a entraîné une certaine désaffection pour ce type de barrage.

Au début du XXe siècle, de nouveaux matériaux et techniques de construction ont été développés, notamment le béton compacté au rouleau (BCR), qui a permis la construction de barrages poids plus efficaces et moins coûteux. Cette technique consiste à utiliser des rouleaux compresseurs pour tasser le béton frais, ce qui crée une structure plus dense et plus résistante.

En raison de leur résistance et de leur durabilité, les barrages poids sont souvent utilisés pour intégrer d'autres structures, telles que des usines hydroélectriques, des écluses ou des évacuateurs de crues, ce qui les rend encore plus attrayants pour les projets de développement hydroélectrique ou de régulation des cours d'eau.

1. Définition :

Le barrage poids tire son nom du fait qu'il utilise la masse de son matériau pour résister à la pression de l'eau. La stabilité de ce type de barrage est donc assurée par sa propre masse. Les barrages poids sont généralement construits dans des vallées larges et sur des fondations rocheuses, ce qui garantit leur stabilité et leur durabilité.

Ces barrages sont particulièrement adaptés aux sites où la hauteur de la chute d'eau est relativement faible. Ils peuvent également être utilisés pour des projets de régulation des cours d'eau, de production d'énergie hydroélectrique et pour la gestion des crues.

En résumé, les barrages poids sont une solution efficace et durable pour la gestion de l'eau dans les vallées larges et les cours d'eau à faible dénivelé, grâce à leur stabilité assurée par la masse de leur matériau.

2. Types de profils :

Les trois différents types de profils de barrage poids sont (voir figure 2.1) :

- Le profil en talus, qui a un parement amont vertical et un parement aval incliné. Ce type de barrage est le plus couramment utilisé pour les ouvrages de faible hauteur.
- Le profil en angle, qui a un parement amont et un parement aval inclinés, avec un angle saillant au sommet du barrage. Ce type de barrage est souvent utilisé pour les ouvrages de hauteur moyenne.
- Le profil en pyramide tronquée, qui a des parements amont et aval inclinés, avec une section transversale en forme de pyramide tronquée. Ce type de barrage est souvent utilisé pour les ouvrages de grande hauteur.

Résistant par son seul poids, il ne faut pas sous la poussée de l'eau :

- qu'il glisse,
- qu'il culbute.

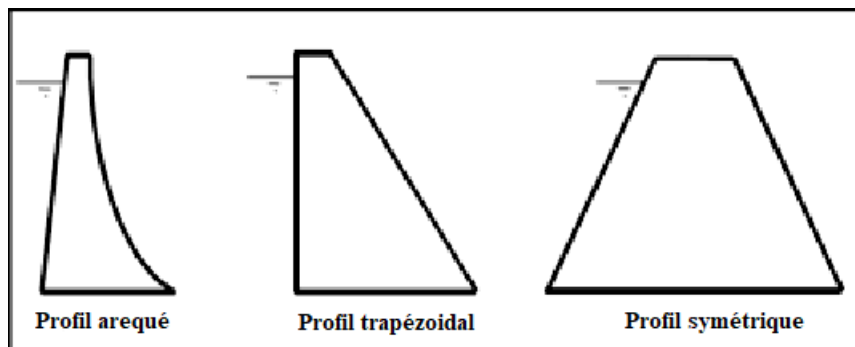


Figure 2. 1 types de profils barrage poids

Le parement amont est vertical ou légèrement incliné (moins de 5%). Le parement aval est incliné avec un fruit de 75 à 80% (voir figure 2.2). Cette géométrie lui permet de résister par son propre poids au renversement et au glissement sous l'action des forces extérieures. Ils offrent cependant l'avantage de pouvoir incorporer l'ouvrage d'évacuation de crues.

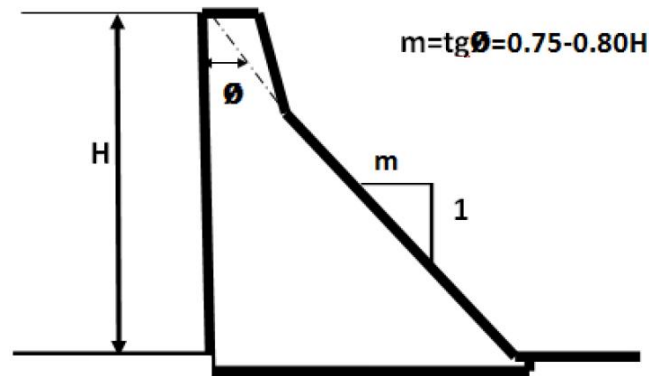


Figure 2. 2 coupe transversale d'un barrage poids

3. Calcul du volume d'un barrage poids :

Généralement on utilise une approximation donnée par :

$$V_p = 0.14 \times H^2 \times (L_c + 2 \times L_b)$$

Avec :

V_p : volume du barrage poids (m^3) ;

H : hauteur du barrage (m) ;

L_c : largeur du site simplifiée au niveau de la crête (m) ;

L_b : largeur du site au niveau de la base (m).

4. Stabilité d'un barrage poids

La méthode d'étude classique pour évaluer la stabilité d'un barrage poids implique une analyse de l'équilibre global du barrage ou d'une partie de celui-ci sous l'effet des différentes forces qui agissent sur lui, l'action du poids, de la poussée hydrostatique, des sous-pressions et éventuellement d'autres actions secondaires (par exemple poussée des sédiments, action du vent ou séisme) (voir figure 2.3). On peut classer ses action en :

- **Actions permanentes** : sont celles qui existent dès la construction du barrage et qui se poursuivent tout au long de sa vie, telles que : **Poids propre, Poussées des sédiments.**
- **Actions variables** : comme les poussées de l'eau et des matières en suspension, ainsi que les poussées des glaces, varient en fonction des fluctuations du niveau de la retenue.
- **Actions accidentelles** : Ces actions sont relatives aux **excitations sismiques.**

Les critères de dimensionnement du barrage poids portent sur la répartition des contraintes normales et sur l'inclinaison de la résultante pour limiter les tractions au pied amont et les contraintes de compression. Cette méthode de calcul met en évidence l'importance des sous-

pressions dans l'équilibre des barrages poids et donc l'importance du drainage pour maintenir la stabilité de l'ouvrage.

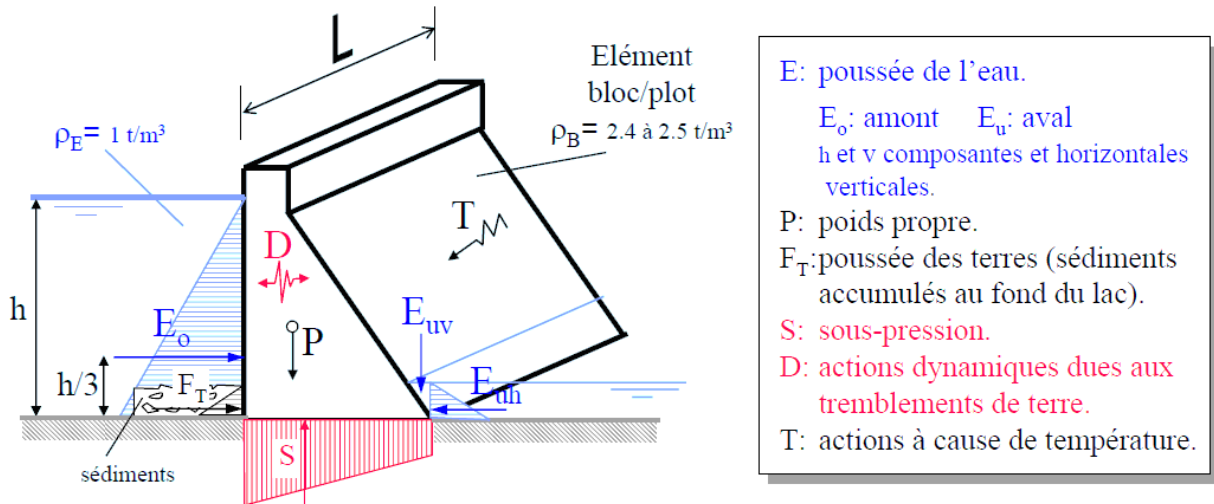


Figure 2. 3 schéma des actions agissantes sur un barrage poids

4.1. Stabilité au glissement

Sous l'effet de la poussée de l'eau, le barrage tend à glisser sur sa base. (C'est le poids de l'ouvrage et son ancrage qui empêchent le glissement par la création de frottement sur le plan de contact barrage-fondation. Si on désigne par :

- P la force verticale due au poids du barrage
- S les sous-pressions
- f : coefficient de frottement
- ΣQ : forces horizontales
- ΣG : forces verticales
- B : surface de contact entre le barrage et sa fondation
- c : la cohésion

$$\sum G = P - S$$

Si on tient compte également de la cohésion des fondations, le coefficient de sécurité au glissement est :

$$F_{glissement} = \frac{c \times B + \sum G \times f}{\sum Q}$$

Le calcul de la stabilité au glissement est également un aspect important de la conception d'un barrage poids. Le coefficient de sécurité doit être supérieur ou égal à 1,5 pour les combinaisons fréquentes et à 1,3 pour les combinaisons accidentelles (séisme).

Le coefficient de frottement utilisé dans le calcul dépend de la nature des sols de fondation, mais en général, on utilise une valeur de 0,75 pour le frottement béton sur béton et béton sur rocher de qualité. Si la fondation est constituée de roche plus tendre, on peut être amené à adopter une valeur inférieure, de l'ordre de 0,6.

Le coefficient de frottement dépend de la nature de la fondation. En effet, il est important de prendre en compte la rugosité de la surface de contact entre le barrage et la fondation, ainsi que la nature des matériaux en présence :

- $f = 0,7$ fondation rocheuse
- $f = 0,3 - 0,6$ fondation sableuse
- $f = 0,2 - 0,25$ fondation argileuse

4.1.1. Amélioration de la sécurité au glissement

Pour améliorer la sécurité au glissement d'un barrage poids, il est possible de mettre en place plusieurs mesures :

a) Augmenter les forces verticales :

- Réduire l'angle de parement aval : En diminuant l'angle de la pente du barrage du côté de l'eau, on peut augmenter la surface de contact entre le barrage et la fondation, ce qui augmente la force de frottement et réduit les forces horizontales.
- Incliner le parement amont : En inclinant le parement amont vers l'eau, on peut augmenter les forces verticales qui s'opposent au glissement.
- Réduire les sous-pressions : Les sous-pressions qui se forment sous la base du barrage peuvent réduire la force de frottement. Pour réduire les sous-pressions, on peut mettre en place un système de drainage ou des dispositifs de fondation tels que des drains horizontaux.

b) Réduire les forces poussantes (horizontales) :

- Incliner la fondation vers l'amont : En inclinant la fondation vers l'amont, on peut augmenter la surface de contact entre le barrage et la fondation, ce qui augmente la force de frottement et réduit les forces horizontales.

c) Augmenter la valeur de l'angle de frottement :

- Traitement des arrêts de bétonnage (béton) : Il est important de réaliser une bonne finition lors de la construction du barrage en béton afin de garantir une bonne adhérence entre les différentes couches de béton.
- Redans coffrés (béton) : Des redans peuvent être réalisés sur le béton pour augmenter la surface de contact et améliorer la force de frottement.
- Injections (rocher) : Dans le cas d'une fondation rocheuse, il est possible de réaliser des injections pour remplir les fissures et améliorer la cohésion du rocher.

4.2. Stabilité au renversement :

Sous l'effet de la poussée de l'eau, l'ouvrage tend à basculer vers l'avant (mouvement de rotation autour du pied aval). C'est le poids de l'ouvrage qui s'oppose à cet effet de renversement. On considère qu'il faut que le moment stabilisateur de l'ouvrage soit au moins deux fois supérieur au moment de renversement.

Le barrage est soumis à :

- La force de poussée de l'eau qui entraîne un mouvement de rotation autour du pied aval,
- Son propre poids qui tend à le stabiliser en s'opposant à cette rotation, diminuant l'effet de frottement.
- Les sous pressions,
- La force de poussée de la vase déposée au fond.

Comme tout mouvement de rotation, le renversement de l'ouvrage est déterminé par le moment des forces, c'est-à-dire le produit des forces par leur bras de levier :

$$F_{renversement} = \frac{\sum M_{stabilisant}}{\sum M_{renversant}}$$

Avec :

M_S : moment stabilisant (due au poids et à la poussée aval)

$$M_S = P \times \frac{2}{3} \times b$$

M_R : moment renversant (due à des poussées et des sous-pressions)

$$M_R = E \times \frac{h}{3} + S \times \frac{2}{3} \times b$$

b : la largeur du barrage.

$$E = \frac{1}{2} \times \gamma_w \times z^2 \times L$$

$$S = \frac{1}{2} \times K \times \gamma_w \times b \times z \times L$$

$$P = \frac{1}{2} \times \gamma_b \times b \times z \times L$$

4.2.1. Amélioration de la sécurité au renversement

Pour améliorer la stabilité au renversement d'un barrage, plusieurs actions peuvent être entreprises, telles que :

a) Augmenter le moment stabilisant :

- Augmenter le poids du barrage en augmentant sa hauteur ou sa densité.
- Ajuster la forme du barrage pour augmenter le bras de levier du poids.
- Ajouter du béton supplémentaire pour augmenter le poids.
- Ajouter des contreforts ou des voiles à l'arrière du barrage pour augmenter le moment de stabilité.

b) Réduire le moment renversant :

- Diminuer la poussée de l'eau en réduisant la hauteur de la retenue ou en augmentant la capacité de décharge de l'ouvrage.
- Améliorer la qualité du sol sur lequel repose le barrage.
- Ajouter des fondations profondes pour augmenter la résistance du sol.
- Réduire les sous-pressions en modifiant la géométrie de la fondation ou en injectant du ciment dans le sol.
- Utiliser des matériaux avec des coefficients de frottement plus élevés pour améliorer la résistance au glissement.

Il est important de noter que toute modification de la géométrie ou de la conception du barrage doit être soigneusement analysée pour éviter d'entraîner des effets indésirables, tels que l'augmentation de la tension sur les matériaux de construction, la réduction de la capacité de stockage ou l'augmentation de la sismicité dans la région environnante.

4.3. Sécurité au soulèvement

Le facteur de sécurité au soulèvement est un paramètre important pour la sécurité et la stabilité des barrages. Il doit être vérifié pour s'assurer que la structure est capable de résister aux forces dues à la sous-pression et ne se soulèvera pas de sa base.

Le poids de la structure, des équipements et de l'eau agissant sur la structure sont des paramètres clés pour calculer le facteur de sécurité. La sous-pression agissant sous la base de la structure doit également être considérée, car elle peut augmenter considérablement lorsque l'eau est retenue derrière le barrage.

Il est important de noter que le soulèvement peut être causé par d'autres facteurs tels que des changements dans la composition des sols ou des mouvements tectoniques. La surveillance régulière de la structure est donc essentielle pour détecter toute anomalie et prendre les mesures nécessaires pour garantir la sécurité à long terme du barrage. Un facteur de sécurité doit être requis qui est donné par la relation [5] :

$$F_s = \frac{P + E}{S}$$

Avec :

P : poids de structure et des équipements qui lui sont attachés

E : poids de l'eau agissant sur la structure

S : sous-pression agissant sous la base de la structure

4.4. Stabilité au poinçonnement :

La stabilité au poinçonnement est un aspect important à considérer lors de la conception de barrages sur sol meuble. Le poinçonnement est le phénomène par lequel la semelle d'une structure exerce une pression ponctuelle sur le sol de fondation, qui peut entraîner un affaissement de la structure. Pour prévenir ce risque, les semelles et les fondations doivent être dimensionnées pour que l'ouvrage ne s'enfonce pas sous son propre poids et sous les charges de l'eau ou autres surcharges.

La vérification de la stabilité au poinçonnement est réalisée en comparant la résultante des charges appliquées au barrage (notamment le poids propre de la structure, la charge de l'eau, les charges parasismiques, etc.) à la portance du sol de support des fondations. La portance du sol peut être déterminée à partir de différents critères, tels que la résistance ultime en cisaillement, la déformation limite ou encore la contrainte admissible. La méthode de calcul dépend du type de sol et de la nature de la charge appliquée.

Des méthodes de renforcement peuvent être envisagées si la stabilité au poinçonnement est mise en cause. Parmi ces méthodes, on peut citer l'ajout de couches de matériaux de renforcement (comme des géotextiles), l'injection de matériaux stabilisants ou encore la réalisation de pieux de fondation.

5. Sécurité en cas de séisme

La sécurité en cas de séisme est une préoccupation importante dans la conception des barrages. Les secousses sismiques peuvent engendrer des mouvements de terrain et des déformations qui peuvent entraîner des dommages sur les barrages et leurs fondations. Les vérifications de la stabilité sismique des barrages doivent prendre en compte plusieurs facteurs tels que :

- L'intensité du séisme dans la zone où se trouve le barrage.
- Les caractéristiques dynamiques du barrage et de ses fondations.
- Les mouvements sismiques du sol à la base du barrage et les réponses dynamiques de la structure.
- Les effets de la liquéfaction du sol, qui peut réduire la résistance du sol et entraîner une instabilité des fondations.

Pour vérifier la stabilité sismique d'un barrage, il est courant d'utiliser des modèles de corps rigides pour représenter la géométrie de l'ouvrage et de ses fondations. Les analyses dynamiques sont ensuite effectuées pour évaluer les effets du séisme sur la structure et pour déterminer les contraintes et les déformations induites par les mouvements sismiques. Les facteurs de sécurité sont également déterminés pour s'assurer que le barrage reste stable et n'est pas endommagé pendant ou après le séisme.

5.1. Vérification de la stabilité au glissement

La vérification se fait en comparant la résistance maximale entre le barrage et les fondations avec le cisaillement total à la surface de glissement. Cette résistance maximale dépend de l'angle de frottement et de dilatance entre le béton et le rocher, ainsi que de la cohésion entre les deux matériaux. Si le barrage est encastré dans le sol de fondation, l'excavation doit également être prise en compte.

Pour la vérification de la sécurité au glissement, la résistance maximale entre le barrage et les fondations doit être supérieure au cisaillement total selon l'équation suivant :

$$c + \sigma_m \times \tan(\varphi + i) \geq \tau_m$$

Avec :

φ : angle de frottement béton / rocher sur la surface de glissement,

i : angle de dilataance barrage / rocher sur la surface de glissement,

c : cohésion béton / rocher sur la surface de contact et éventuellement de l'excavation de fondation,

σ_m : contrainte normale effective moyenne à la surface de contact,

τ_m : contrainte de cisaillement moyenne à la surface de contact.

Un facteur de sécurité au glissement est ensuite calculé en utilisant les forces statiques verticales et horizontales, ainsi que la charge sismique verticale et horizontale de substitution. Ce facteur de sécurité doit être égal ou supérieur à 1,1 pour garantir la stabilité du barrage. Le facteur de sécurité au glissement peut aussi être évalué par la relation :

$$F_G = \frac{c \times b + \sum QV_{TOT} \times \tan(\varphi + i)}{\sum H + QH_{TOT}}$$

Avec :

ΣV = somme des forces statiques verticales,

QV_{TOT} = charge sismique verticale de substitution,

ΣH = somme des forces statiques horizontales,

QH_{TOT} = charge sismique horizontal de substitution (masse du barrage et masse de l'eau oscillant avec le barrage),

b = surface de base.

5.2. Vérification de la stabilité au renversement

La vérification de la stabilité au renversement vise à s'assurer que le barrage ne bascule pas lors d'un séisme. Pour cela, on combine les charges statiques initiales (poids propre, charge d'eau, etc.) avec les sollicitations sismiques pour déterminer les contraintes à la surface de contact entre le barrage et les fondations. Ces contraintes ne doivent pas dépasser les valeurs extrêmes de la résistance.

On calcule également la position de la résultante, qui est la somme des moments par rapport au centre de gravité de la section sur la somme des forces verticales, y compris la sous-pression. Si cette force est située dans le tiers central, la section est exempte de contrainte de traction. Un autre indicateur de la stabilité au renversement est le rapport entre la somme des moments stabilisants par rapport à l'aval et la somme des moments renversants. Ce rapport doit être supérieur à 1.1.

$$F_s = \frac{\sum M_s}{\sum M_R} \geq 1.1$$

En cas de dépassement de la contrainte dynamique de traction admissible au pied amont, il est nécessaire de vérifier que l'ouverture du joint de fondation à l'amont ne conduit pas à des contraintes de compression supérieures à la résistance à la compression au pied aval. La résistance à la traction dynamique est également vérifiée à l'aide de formules empiriques, qui ne doivent pas dépasser 2 MPa (4 MPa consiste une limite supérieure) [5].

La stabilité au renversement est un aspect crucial de la conception et de la sécurité des barrages, car une défaillance peut entraîner des conséquences catastrophiques. Les ingénieurs doivent donc s'assurer que les barrages sont conçus pour résister à toutes les sollicitations possibles, y compris les séismes.

6. Barrage en BCR

6.1. Définition

Le Béton Compacté au Rouleau (BCR) est une technologie moderne utilisée dans la construction des barrages poids. Il est composé de ciment, de granulats, d'eau et d'adjuvants, et a une faible teneur en eau et/ou une teneur en pâte réduite, ce qui lui donne un état sec et permet de le consolider à l'aide d'un rouleau vibrateur. Cette technique de compactage à l'aide de rouleaux vibrants et d'épanduses permet de produire un matériau ayant un affaissement nul et des propriétés équivalentes à celles des bétons conventionnels vibrés pour des dosages en liants inférieurs.

Cependant, pour que le BCR soit étanche dans la masse, il est important que sa composition ne soit pas très différente de celle d'un béton conventionnel vibré (BCV). Les éléments fins naturels ou d'appoint sont généralement ajoutés pour compenser le sous-dosage en liant. Il est également important de prendre en compte la qualité des granulats utilisés, car elle influe sur la qualité finale du BCR.

L'utilisation du BCR présente plusieurs avantages par rapport au béton conventionnel vibré, notamment une réduction significative de la quantité d'eau nécessaire pour le mélange, une amélioration de la qualité et de l'homogénéité du matériau, une meilleure résistance à la fissuration, une durabilité accrue, une réduction des coûts de maintenance et une diminution de l'impact environnemental.

6.2. Caractéristiques du BCR

En plus de ce qui a été mentionné dans la définition, voici quelques autres caractéristiques du Béton Compacté au Rouleau (BCR) dans le contexte de la construction de barrages :

- Haute densité : le BCR est un béton très dense, avec une densité apparente d'environ 2,3 tonnes/m³, ce qui est supérieur à celle d'un béton conventionnel vibré (BCV).
- Résistance élevée : malgré son faible dosage en ciment, le BCR peut avoir une résistance mécanique élevée grâce à sa compaction énergétique. Sa résistance peut être supérieure à celle d'un BCV ayant un dosage en ciment similaire.
- Faible perméabilité : le BCR peut être très peu perméable grâce à sa densité et à sa faible teneur en eau, ce qui en fait un matériau idéal pour les ouvrages d'étanchéité tels que les barrages.
- Bonne résistance aux intempéries : en raison de sa densité et de sa faible teneur en eau, le BCR est moins sujet au gel et à la fissuration que le BCV. Il peut également résister à l'érosion causée par les vagues et les courants d'eau.
- Rapidité d'exécution : le compactage énergétique du BCR permet d'obtenir rapidement une surface plane et régulière. Il peut également être mis en place en couches épaisses de 30 cm, ce qui permet une mise en oeuvre plus rapide par rapport à un BCV.

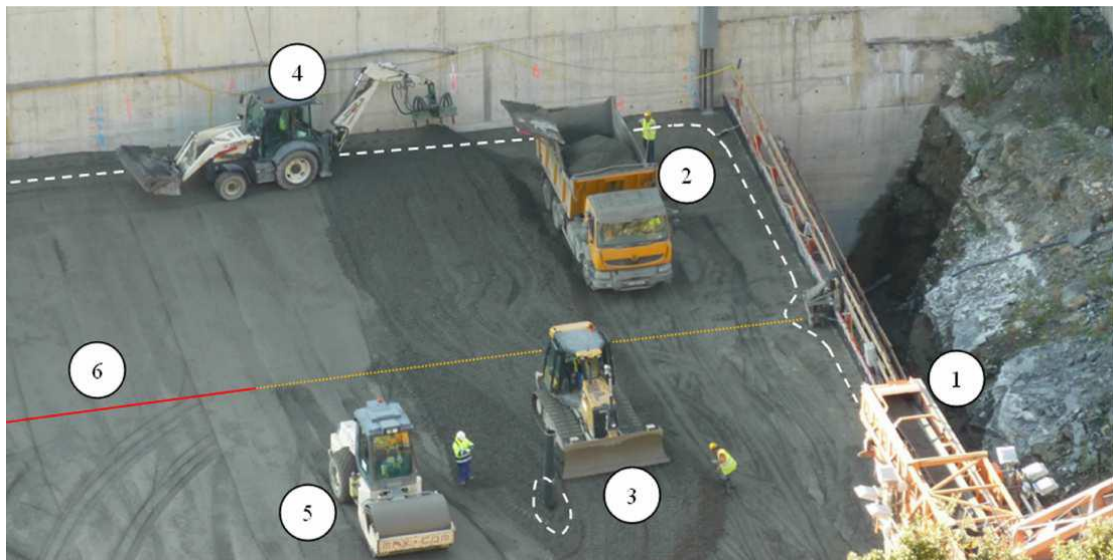


Figure 2. 4 étapes construction barrage en BCR. Barrage d'Enciso (Espagne – Rioja)
Source : Francisco Ortega

6.3. Les avantages et inconvénients

6.3.1. Les avantages

Les avantages du BCR dans la construction des barrages sont multiples :

- Coût économique : Le BCR requiert un faible dosage en liant (100 à 150 kg/m³), ce qui le rend plus économique que le béton conventionnel. De plus, le coût de la main d'œuvre, de l'électricité, des installations de chantier, etc. est réduit.
- Facilité de mise en place : Le BCR peut être mis en place par remblayage, en grande quantité et sur de larges espaces, ce qui facilite la construction des barrages.
- Réduction des coffrages : Les parements sont les seules parties du barrage nécessitant des coffrages. Cela réduit le temps et le coût de la construction.
- Faible chaleur d'hydratation : Le faible dosage en ciment du BCR entraîne une faible chaleur d'hydratation, ce qui évite la nécessité d'un refroidissement ou d'une injection de joints.
- Réduction de la probabilité d'occurrence des crues : En raison de la facilité de construction, le temps nécessaire pour terminer le barrage est réduit, ce qui réduit la probabilité d'occurrence des crues pendant les travaux.

6.3.2. Les inconvénients

Cependant, il y a aussi quelques inconvénients associés à l'utilisation du BCR dans la construction de barrages :

- Qualité des parements : La qualité des parements peut être affectée en raison du compactage du BCR.
- Difficulté d'entraîner de l'air : Il peut être difficile d'entraîner de l'air dans le BCR, ce qui peut entraîner des problèmes d'étanchéité.
- Coût de transport : Les matières cimentaires doivent être transportées sur de longues distances dans certaines régions, ce qui peut augmenter le coût de la construction.

Il est important de noter que ces inconvénients ne sont pas nécessairement des obstacles majeurs à l'utilisation du BCR et peuvent être surmontés par des méthodes de construction appropriées et une planification minutieuse. De plus, les avantages tels que l'économie de coûts, la mise en place rapide et la réduction de l'empreinte carbone sont des avantages significatifs pour les projets de construction de barrages.

6.4. Les critères d'implantations

Les critères d'implantation du barrage BCR dépend donc de plusieurs facteurs tels que la topographie de la vallée, la nature géologique des fondations et la disponibilité des matériaux de construction.

Pour la topographie : les vallées en forme de U et les vallées larges sont idéales pour la construction de barrages BCR. En effet, ces formes de vallées offrent une grande surface de fondation et permettent une meilleure répartition des charges.

Du point de vue géologique : les fondations doivent être rocheuses, de qualité, offrant une capacité portante suffisante et faible déformabilité. La surface de fondation doit être régulière et en cas de besoin, les irrégularités sont éliminées afin d'éviter des points durs pouvant être à l'origine de fissures et siège de concentrations de contraintes. En outre, il est important de trouver à proximité des zones d'emprunts capables de fournir la totalité des quantités requises en granulats.

6.5. Choix du profil du barrage poids BCR

En ce qui concerne le choix du profil du barrage poids BCR, il est important de prendre en compte plusieurs critères. Tout d'abord, la section verticale transversale du barrage BCR peut avoir une forme géométrique voisine du triangle avec un parement amont vertical ou une forme trapézoïdale avec des parements amont et aval inclinés (voir figure 2.5). Le choix de la forme dépendra de la géologie des fondations, de la nature des matériaux de construction disponibles et des contraintes de stabilité générales.

Le profil à parement amont vertical est conçu pour des fondations de bonne qualité généralement calcaires avec un parement aval d'une pente de $0,7H/1V$ à $1H/1V$. Le dosage en ciment peut varier de 90 à 120 Kg/m³. Cette géométrie est recommandée lorsque les fondations sont très rigides et qu'il est possible d'utiliser des matériaux de qualité pour le parement amont.

Le profil symétrique, quant à lui, est adapté aux fondations moins rigides ou moins homogènes. Les parements ont généralement une pente de $0,7H/1V$ et le dosage en ciment peut varier de 100 à 150 Kg/m³. Cette géométrie permet une répartition des contraintes plus uniforme sur l'ensemble de la fondation et une meilleure adaptation aux irrégularités du sous-sol.

Enfin, il est important de noter que le profil retenu doit répondre aux critères de stabilité générale habituels et que les contraintes admissibles doivent être respectées. Le choix de la largeur de couronnement doit également permettre la mise en place mécanique du BCR.

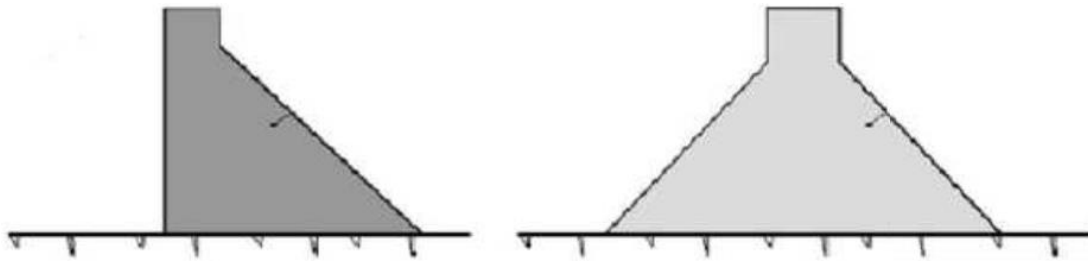


Figure 2. 5 profils du barrage poids type BCR

7. Applications

Exercice 1

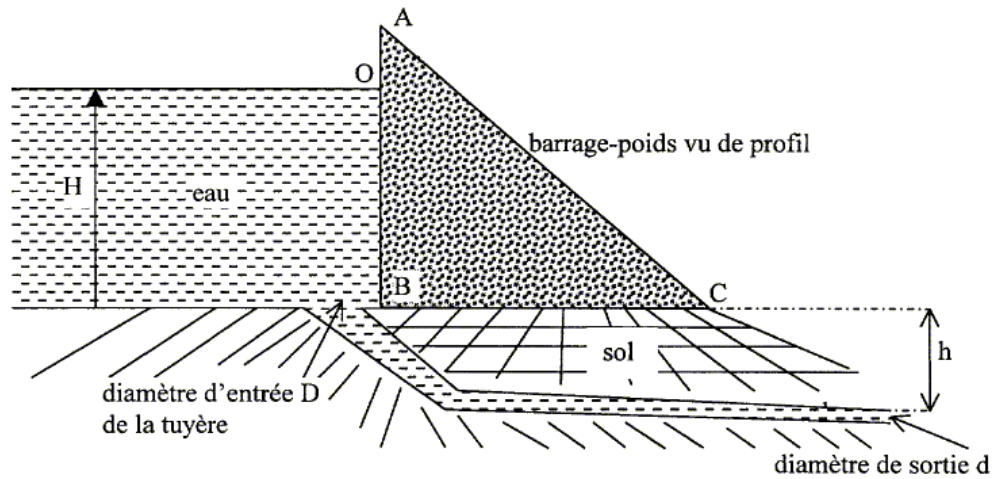
Un barrage poids a un profil assimilé à un triangle rectangle noté ABC. Il résiste à la poussée de l'eau tant que la droite d'action de la résultante des forces \mathbf{R} s'exerçant sur la paroi coupe la base BC.

$\mathbf{R} = \mathbf{F} + \mathbf{P}_B$, formule dans laquelle \mathbf{F} représente la résultante des forces pressantes exercées sur la paroi AB du barrage et \mathbf{P}_B le vecteur poids du barrage. Il a une hauteur $AB = 75$ m. Le niveau de l'eau atteint une hauteur $H = 70$ m. La largeur de sa base est $BC = 56$ m et sa longueur $L = 1000$ m.

Pour éviter des éventuels glissements de terrains sous l'action de la contrainte R , le barrage est équipé de 5 tuyères de sécurité. L'entrée de chaque tuyère est circulaire de diamètre D et la sortie circulaire de diamètre d . Le centre de la sortie est situé à une profondeur $h = 50$ m sous le niveau BC du barrage. $D = 200$ cm ; $d = 40$ cm

1. Calculer le volume V_B et la masse m_B de béton utilisé lors de la construction ?
2. Calculer la résultante des forces F pressantes sur la paroi AB.
3. Calculer l'angle β et comparer avec l'angle α au sommet du barrage.

Données : densité du béton $d_B = 2,2$; masse volumique de l'eau $\rho_{\text{eau}} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$; $g = 9,8 \text{ N kg}^{-1}$.



Solution

1. Calcul du volume V_B et la masse m_B

$V_B = \text{aire du triangle ABC} * \text{longueur du barrage} = \frac{1}{2}AB*BC*L$

$V_B = 0,5*75*56*1000 = 2,1 \cdot 10^6 \text{ m}^3.$

1 m³ de béton a une masse de 2,2 tonnes

$m_B = 2,2*2,1 \cdot 10^6 = 4,6 \cdot 10^6 \text{ t. (} 4,62 \cdot 10^6 \text{)}$

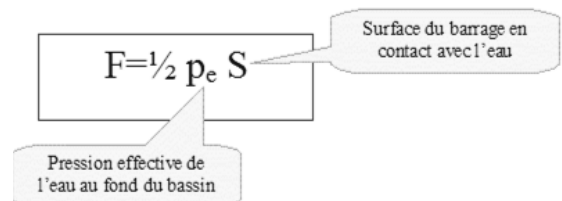
2. Résultante des forces pressantes F sur la paroi AB, tuyères fermées :

Etablir l'expression de F en fonction de ρ_{eau} ,

L , g et H :

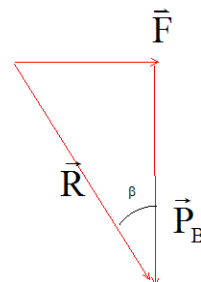
$S = L H ; p_e = \rho_{\text{eau}} g H$

$F = \frac{1}{2}\rho_{\text{eau}} g L H^2.$



Valeur de F :

$F = 500*9,8*1000*70^2 = 2,4 \cdot 10^{10} \text{ N.}$



Valeur de la résultante des contraintes R :

$$m_B = 2,2 * 2,1 \cdot 10^6 = 4,6 \cdot 10^6 \text{ t. } (4,62 \cdot 10^9 \text{ kg})$$

$$P_B = 4,62 \cdot 10^9 * 9,8 = 4,5 \cdot 10^{10} \text{ N}$$

$$R^2 = F^2 + P_B^2 = (2,4^2 + 4,5^2) \cdot 10^{20} = 26 \cdot 10^{20}. \quad \mathbf{R = 5,1 \cdot 10^{10} \text{ N.}}$$

3. Calcul de l'angle β , comparer avec l'angle α au sommet du barrage :

$$\tan \beta = F/P_B = 2,4 / 4,5 = 0,533 ; \quad \mathbf{\beta = 28^\circ}.$$

$$\tan \alpha = BC/AB = 56 / 75 = 0,747 ; \quad \mathbf{\alpha = 37^\circ}.$$

β est inférieur à α : le barrage ne cède pas.

Exercice 2

Un barrage poids de forme triangulaire, fondé sur un rocher ($f = 0.67$ et $C = 0$) possède une hauteur totale, hors fondations, de 80 m. Le fruit du parement aval est de 0.85.

La sous pression amont est de 24 m, la hauteur d'eau aval est de 2 m et sa poussée est négligée.

Un voile de drainage projeté au milieu de sa base permet de réduire la sous pression de 50%.

1. Déterminer le poids du barrage assurant sa sécurité au glissement avec un coefficient de 1.4 ? ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

Solution

1. Base du barrage

- Hauteur du barrage $H = 80 \text{ m}$

- Fruit du parement aval $f = 0.85$

$$B = f \times H = 0.85 \times 80 = 68 \text{ m}$$

2. Forces agissant sur le barrage

2.a. Force hydrostatique

$$F = 0,5 \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot e_{\text{eau}}^2$$

$$2 = 0,5 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 80^2$$

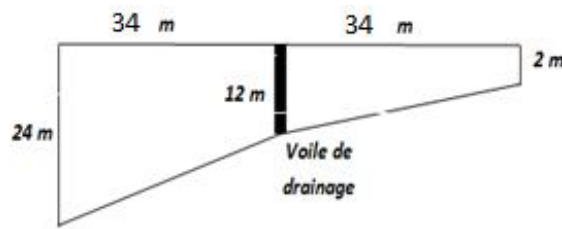
$$F = 32 \text{ 000 KN/ml}$$

2.b. Force de la sous pressions

Diagramme trapézoïdal avec base égale à la largeur en base du barrage

$$S = \rho \cdot g \cdot V = \rho \cdot g \cdot (S \cdot x)$$

$$\text{Surface de la sous pression} = [(24 + 12)/2] \cdot 34 + [(12 + 2)/2] \cdot 34 = 850 \text{ m}^2$$



$$S = 10^3 \cdot 10 \cdot 850$$

$$S = 8\,500 \text{ KN/ml}$$

3. Poids du barrage assurant la stabilité au glissement $K_c = 1.4$

$$F_{\text{glissement}} = \frac{f \sum G + C \cdot F}{\sum Q}$$

F : surface d'emprise du barrage au niveau des fondations

C : cohésion des fondations 0 kN/m²

$$\sum G = P - S$$

$$\sum Q = F_{\text{eau}}$$

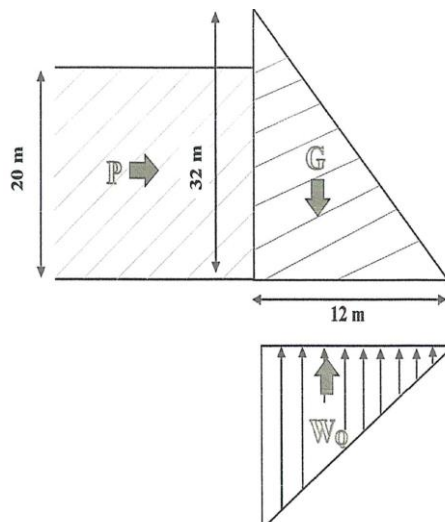
$$F_{\text{glissement}} \cdot \sum Q = f \cdot \sum G$$

D'où : $P = 75\,366 \text{ KN/ml}$

Exercice 3 :

Un barrage poids de profil triangulaire retient l'eau à une hauteur de 20 m avec les données représenté sur la figure ci-dessous ($\gamma_b = 2.4 \text{ tf/m}^2$, $\gamma_{\text{eau}} = 1 \text{ tf/m}^2$ et $f = 0.75$)

1. vérifier la stabilité du barrage au glissement et renversement.



Solution

1. stabilité du barrage au glissement

Le poids propre du barrage « G »

$$G=2.4 \times 12 \times 32/2 = 460.8 \text{ T}$$

La pression hydrostatique « P »

$$P= 1 \times 20 \times 20/2 = 200 \text{ T}$$

La sous pression $W\phi$

$$W\phi= 1 \times 20 \times 12/2 = 120 \text{ T}$$

Alors : $F_{glissement} = 0.75 \times \frac{460.5-120}{200}$

$$F_{glissement} = 1.28 < [1.3,1.5]$$

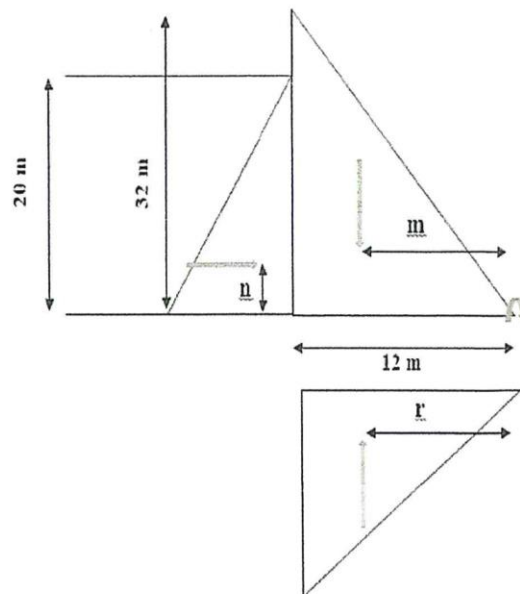
Donc : le barrage n'est pas stable contre le glissement.

2. Stabilité au renversement

	Forces (T)	Bras de levier (m)	Moment (T.m)
G	460.5	$m = 2/3 \times 12 = 8\text{m}$	3684
P	200	$n = 1/3 \times 20 = 6.66\text{m}$	1332
$W\phi$	120	$r = 2/3 \times 12 = 8 \text{ m}$	960

$$F_{renversement} = 1.61 > 1.5$$

Donc la stabilité au renversement est vérifiée.



Conclusion

En conclusion, les barrages poids BCR représentent une innovation technique majeure dans la technologie des barrages. Ils sont économiques, rapides à construire et nécessitent moins de

matériaux de construction que les barrages classiques. De plus, grâce à leur faible dosage en ciment, ils présentent moins d'exothermie et ne nécessitent ni refroidissement ni injection de joints. Cependant, il est important de prendre en compte les inconvénients liés à la qualité des parements et au coût de transport des matières cimentaires en régions éloignées. En ce qui concerne les critères d'implantation, les vallées en forme de U et les fondations rocheuses de qualité sont les plus adaptées pour la construction de barrages poids BCR. Le choix du profil du barrage doit répondre aux critères de stabilité générale habituels et les contraintes admissibles doivent être respectées. Enfin, il est important de noter que les barrages poids peuvent être construits sur des fondations en terre, mais leur hauteur doit être limitée à 20 m et leur coût de construction et de maintenance est souvent plus élevé que celui des barrages en terre ou en enrochements de hauteurs et longueurs en crête comparables.

Chapitre 3 :

Barrages à contreforts

Chapitre 3 : Barrage à contrefort

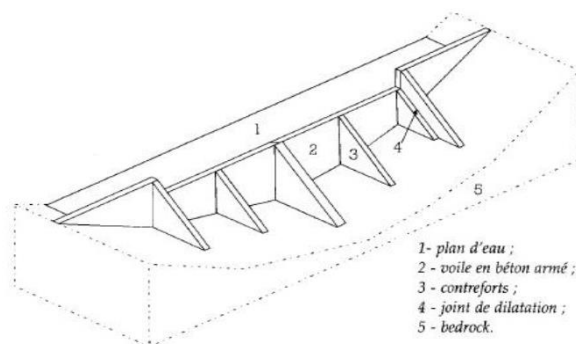
Introduction

Les barrages à contrefort sont une variante des barrages-poids, mais avec l'ajout de contreforts en béton armé qui viennent renforcer la structure. Les contreforts, placés perpendiculairement au mur du barrage, permettent de réduire la quantité de béton nécessaire pour la construction et donc les coûts. Ils servent également à répartir les charges sur les fondations en les transmettant à travers les contreforts jusqu'aux sols résistants en profondeur.

Les barrages à contrefort peuvent avoir des formes variées, mais leur principe de fonctionnement reste le même. Les voiles en béton armé du barrage transmettent la poussée hydrostatique de l'eau sur les contreforts qui la répartissent sur les fondations. Les contraintes sont ainsi réparties de manière plus uniforme, ce qui permet de construire des barrages de plus grande hauteur et avec une moindre quantité de béton.

1. Définition

Ce sont des barrages poids évidés pour économiser du béton. Ils sont composés d'un voile en béton armé (mur d'étanchéité qui supporte l'eau retenue), soutenues par des contreforts (série de renforts ou murs triangulaires verticaux plus ou moins épais appelés contreforts) perpendiculaires à l'axe du barrage, régulièrement espacés et construits pour supporter la poussée de l'eau et à la transmettre à la fondation (voir figure 3.1). Il est bien adapté aux vallées larges avec une fondation rocheuse de bonne qualité.



Barrage –voile en béton armé à contreforts *Barrage à contreforts de Balavé (Burkina Faso).*

Figure 3. 1 Barrage à contreforts

Les barrages à contreforts sont des barrages en béton constitués (voir figure 3.2, 3.3 et 3.4) :

- des murs, généralement de forme triangulaire, construits dans la vallée parallèlement à l'axe de la rivière. Ces murs sont les contreforts.
- des bouchures entre les contreforts pour maintenir l'eau de la retenue. Ces bouchures s'appuient sur les contreforts auxquelles elles transmettent la poussée de l'eau.

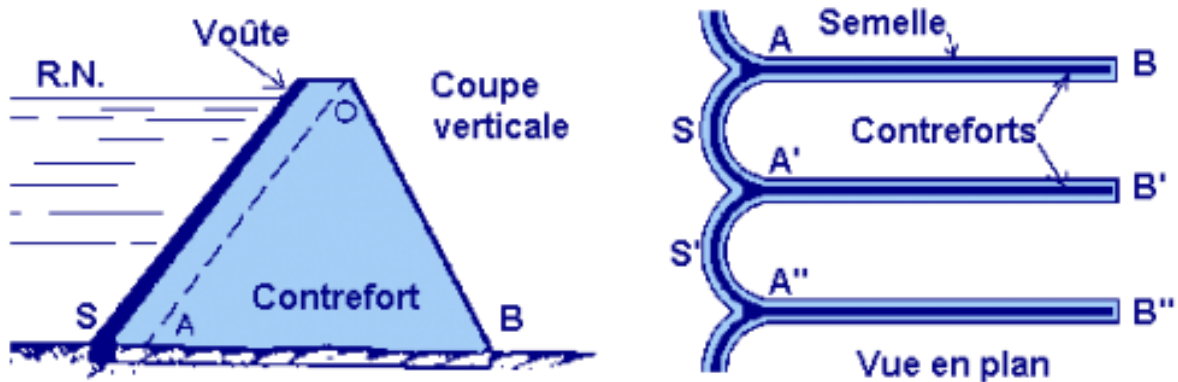


Figure 3. 2 Schéma d'un barrage contrefort en voûte [6]

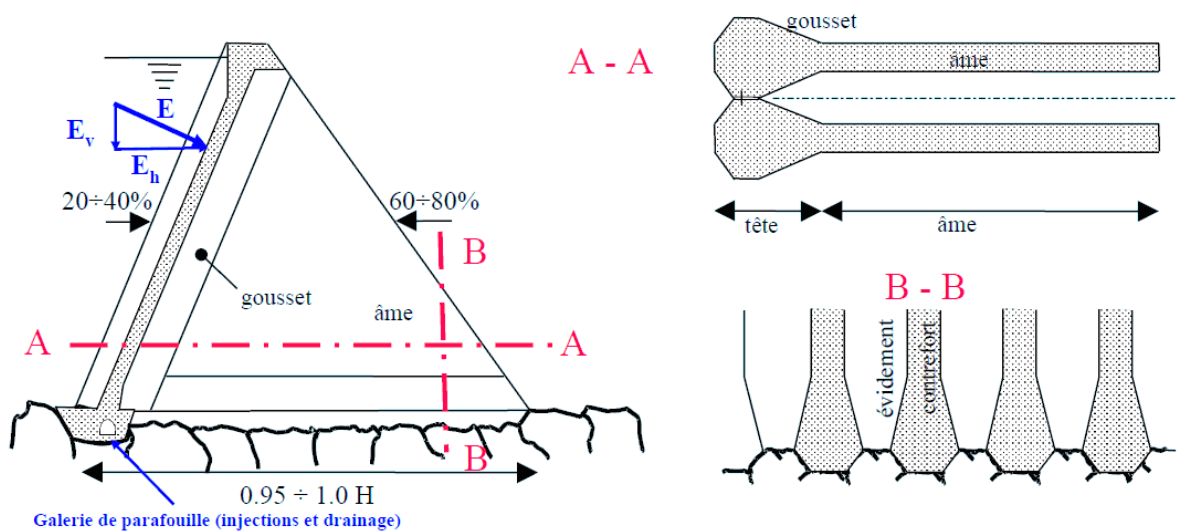


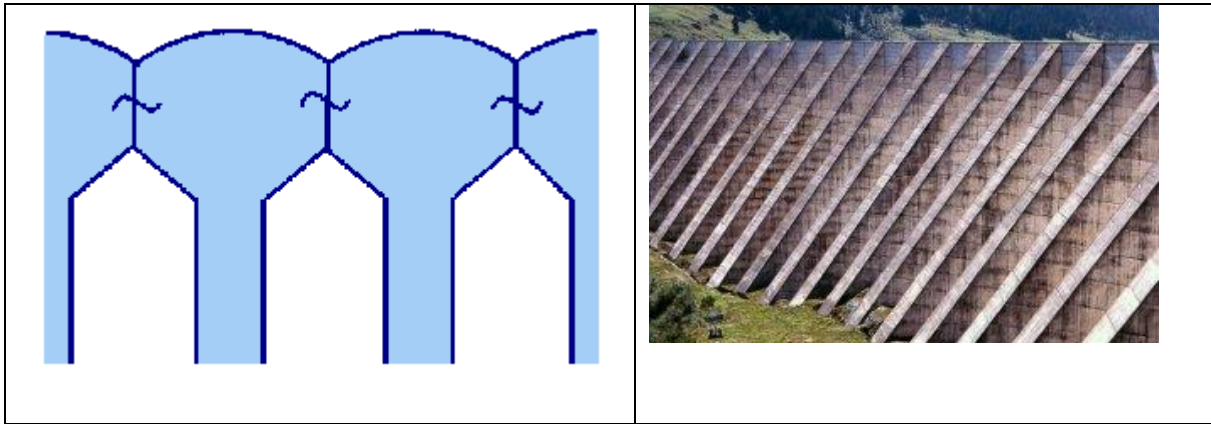
Figure 3. 3 Dispositions générales d'un barrage à contreforts [6]

2. Les types de barrage contreforts

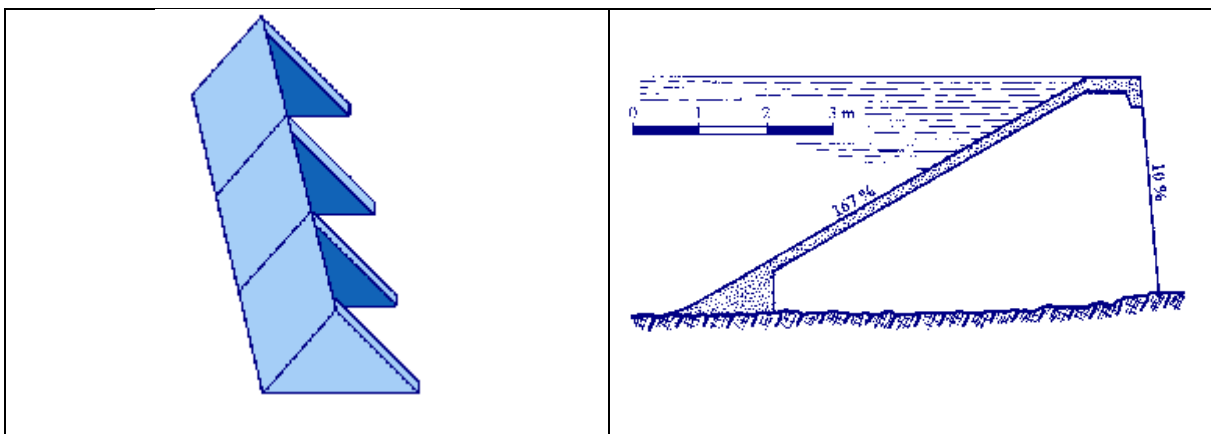
Les bouchures sont très souvent inclinées vers l'aval pour que la poussée de l'eau soit orientée vers le bas de façon à améliorer la stabilité des contreforts. Dans le sens transversal, notamment vis-à-vis des effets sismiques de rive à rive, les contreforts peuvent être munis de butons.

Les bouchures elles-mêmes peuvent être de plusieurs types :

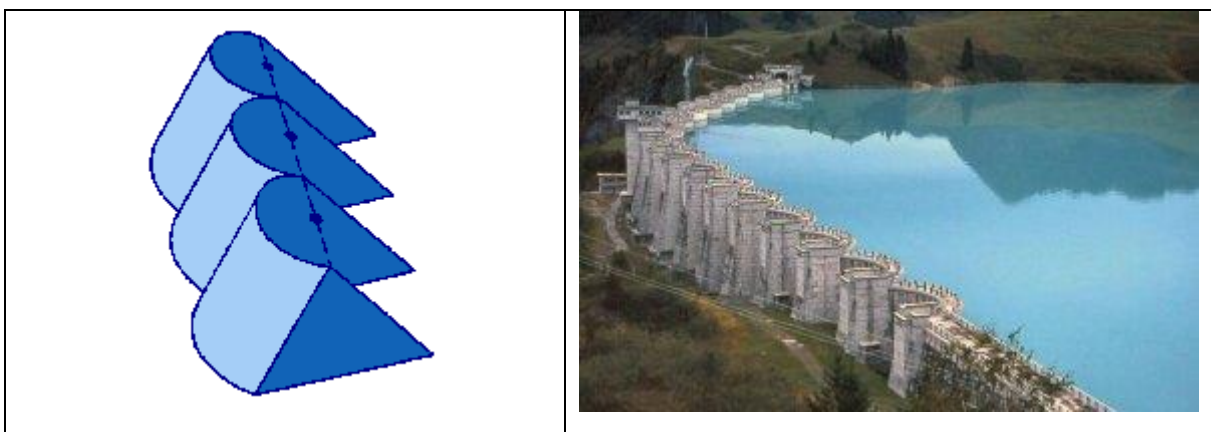
- un épaissement amont du contrefort. Une étanchéité doit donc être prévue entre chaque demi-bouchure [6].

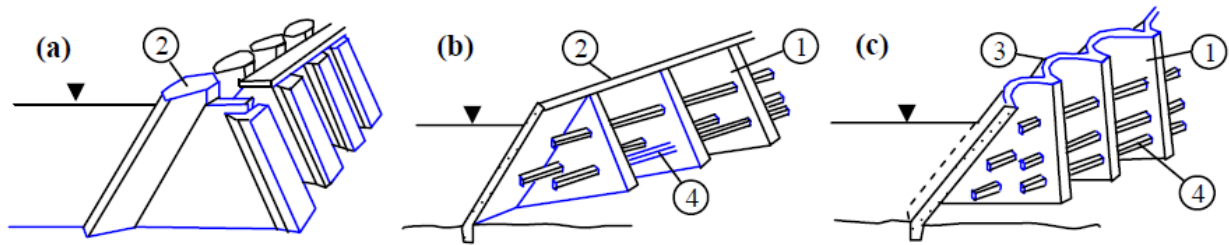


- la membrane supportant l'eau est une plaque plane en béton Armé, s'étalant le long des contreforts (plots séparés dont la section horizontale a la forme d'une poutre en I ou en T). Dans les seconds, la membrane est faite d'une série de voûtes elles aussi en béton armé [6]



- une voûte de faible dimension. Les voûtes sont en béton armé et de très faible épaisseur [6].





Légende :

1) contre fort; 2) recouvrement à dalle plane; 3) recouvrement à voûte; 4) poutre de rigidité

Figure 3. 4 Barrage à contrefort a) à dalle courbée ; b) à dalle plane ; c) à voûte multiple [2]

3. Particularités géologiques

Les barrages contreforts sont bien adaptés aux vallées larges avec une fondation rocheuse de bonne qualité. Si le rocher de fondation est recouvert d'une couche relativement épaisse d'alluvions ou de rochers altérés, les fouilles des contreforts restent individualisées. De plus, plus l'écartement est grand entre chaque contrefort moins les fouilles seront importantes et donc les concepteurs n'auront pas à prévoir le dégagement du lit de la rivière. Ces barrages peuvent aussi être construits lorsque des appuis solides sont éloignés, les autres barrages ne convenant pas.

En somme, les barrages à contreforts sont donc bâtis dans des milieux espacés mais où les barrages poids ne peuvent pas être mis en œuvre à cause des coûts trop importants liés au dégagement du cour d'eau.

Enfin, l'étanchéité du barrage à contreforts est un aspect crucial de sa conception et de sa construction. Des mesures spéciales doivent être prises pour assurer une étanchéité parfaite, notamment sous et dans les contreforts. Des rangées de drainage doivent également être prévues pour éviter les problèmes d'infiltration et de remontée d'eau (voir figure 3.5).

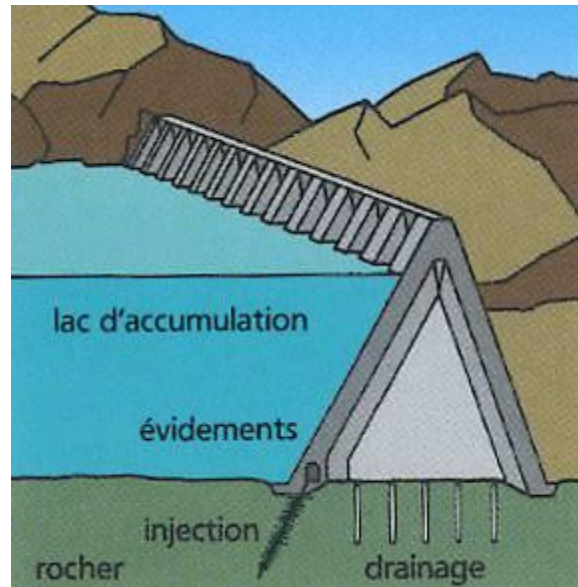


Figure 3. 5 Schéma simplifié d'un barrage à contreforts [7]

4. Exemples de barrages contreforts à travers le monde

Le Barrage de Roselend est un barrage français à contrefort qui supporte des voûtes de faibles portées. Il est situé dans le Beaufortain, en Savoie. Mesurant 800 m de long et 150 m de haut, il peut contenir jusqu'à 185 millions de m³ d'eau. Le barrage de Roselend est un exemple typique de barrage à contreforts à voûtes multiples. Les voûtes ont une épaisseur variant de 1,5 mètres à 3,5 mètres. Les contreforts, espacés d'environ 20 mètres les uns des autres, mesurent jusqu'à 25 mètres de hauteur et 10 mètres d'épaisseur. Il est réputé être le plus « esthétique » des barrages de Savoie (voir figure 3.6).



Figure 3. 6 Photo du barrage de Roselend, France [7]

5. La stabilité des barrages contreforts

La stabilité d'un barrage à contreforts dépend de plusieurs facteurs tels que la géométrie de la section transversale, la hauteur et la largeur des contreforts, la position des bouchures et la qualité du sol de fondation. La face amont du barrage à contreforts est en général incliné de près de 45° . Les forces agissant sur un barrage à contreforts sont les mêmes que celles agissant sur un barrage poids, c'est-à-dire les forces de poussée de l'eau, les forces de gravité et les forces sismiques. Cependant, les forces verticales de l'eau sont beaucoup plus importantes sur un barrage à contreforts car les bouchures ne sont pas horizontales, mais inclinées vers l'aval. Cela signifie que la poussée de l'eau est dirigée vers le bas et exerce une force importante sur les contreforts.

Pour augmenter la stabilité de l'ouvrage, la section transversale du barrage à contreforts est généralement en forme de trapèze, avec une largeur supérieure à la base. Cette forme permet de réduire la hauteur des contreforts et d'augmenter leur espacement, ce qui réduit le coût de construction et facilite les fouilles. Les contreforts sont souvent renforcés par des butons, qui sont des éléments de renforcement placés perpendiculairement à l'axe du barrage pour résister aux forces de poussée de l'eau.

6. Les avantages et inconvénients

6.1. Avantages

Les barrages à contreforts présentent plusieurs avantages, notamment :

- **Contraintes de fondation** : Les contraintes transmises par la fondation au rocher sont moyennes, car les charges sont réparties entre les contreforts.
- **Sous-pressions** : Les sous-pressions au niveau de la fondation sont faibles, car les contreforts limitent les déformations et les pressions excessives sur le sol.
- **Volume de béton** : Le volume de béton nécessaire est relativement faible par rapport à un barrage-poids de même hauteur, ce qui représente un avantage considérable en termes de coûts et d'impact environnemental.
- **Échauffement** : L'échauffement du béton est faible, car le béton est plus fin et mieux ventilé que dans un barrage-poids.
- **Risques de tassements** : Les risques de tassements sont moyens, car les charges sont bien réparties entre les contreforts et la fondation.

En résumé, les barrages à contreforts offrent une solution économique pour stocker l'eau, en particulier dans les zones où les contraintes géologiques ou topographiques ne permettent pas la construction de barrages-poids. Ils permettent également de réduire l'impact environnemental et les coûts de construction en utilisant moins de béton.

6.2. Inconvénients

- Il s'agit de structures complexes, plus sensibles aux effets thermiques et aux séismes et qui nécessitent une attention particulière pour le contact avec le rocher de fondation. La résistance à l'accélération latérale est presque non-existante.
- Les coûts de construction peuvent être plus élevés que pour d'autres types de barrages en raison de la complexité de la structure et de la nécessité d'une fouille importante pour les fondations.
- La construction d'un barrage à contreforts nécessite une planification et une conception précises en raison de la complexité de la structure et des contraintes spécifiques de chaque site.
- Les barrages à contreforts sont moins efficaces pour stocker de grandes quantités d'eau que les barrages poids en raison de leur conception, qui nécessite une largeur plus importante.

- Les contreforts et les voûtes peuvent limiter l'espace pour la maintenance et l'inspection de l'ouvrage, ce qui peut rendre les travaux de maintenance plus difficiles et coûteux.

7. Barrage évidé

Le barrage évidé est une variante du barrage à contrefort qui se distingue par la présence d'un masque aval continu qui est une structure en béton pleine qui remplace la partie inférieure du barrage à contreforts. Cette structure en béton forme un mur continu à la base du barrage et protège l'âme du barrage contre l'action du gel, réduit les effets de la température et améliore la stabilité latérale en cas de tremblement de terre.

Le barrage évidé permet de réduire la vulnérabilité de l'ouvrage en cas de crue importante. En effet, il permet de limiter les risques de rupture de la partie inférieure du barrage en évacuant une partie de l'eau à travers des vannes situées dans le masque aval.

Cependant, la construction d'un barrage évidé est plus complexe que celle d'un barrage à contrefort classique, car elle nécessite une mise en œuvre soignée du masque aval en béton, ainsi que la réalisation de joints d'étanchéité et de drains spécifiques. Le coût de construction est donc plus élevé que celui d'un barrage à contrefort classique.

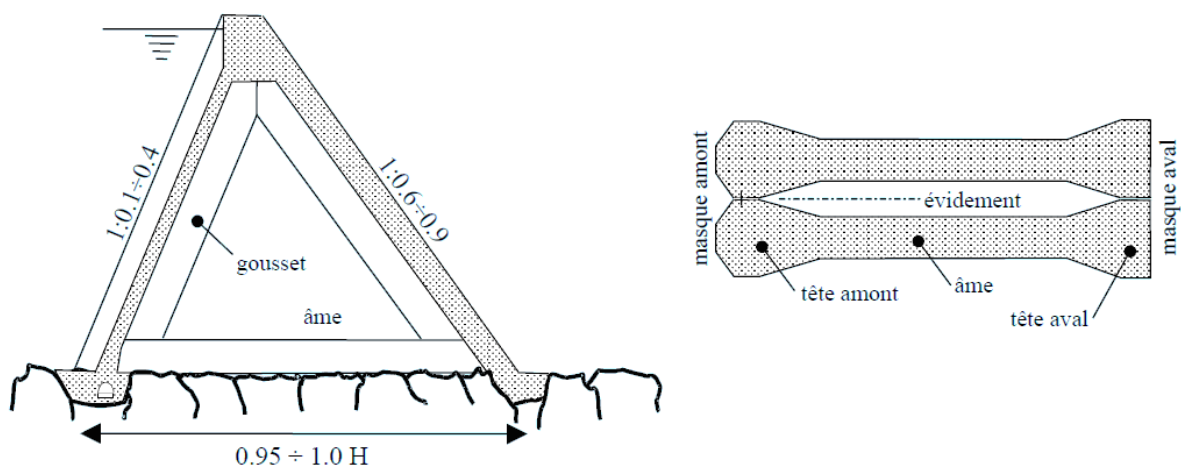


Figure 3. 7 Dispositions générale d'un barrage évidé

Conclusion

En conclusion, la construction d'un barrage à contreforts peut être plus complexe que celle d'un barrage poids. La mise en place des coffrages nécessite une grande attention et une grande précision pour éviter les erreurs, notamment dans les angles et les niveaux. De plus, les quantités

d'acier d'armature nécessaires pour renforcer les contreforts et les murs peuvent être importantes, augmentant ainsi les coûts du projet.

Le coût total d'un barrage à contreforts peut également être influencé par les coûts d'acquisition et d'aménagement du site, tels que la fouille, la préparation de la fondation, la construction d'accès et d'autres travaux connexes.

Cependant, malgré ces défis, les barrages à contreforts restent une option viable pour la construction de barrages dans des vallées larges et peu profondes, où les barrages poids ne seraient pas pratiques en raison de la quantité importante de béton nécessaire. De plus, leur conception permet de réduire les sous-pressions au niveau de la fondation et de minimiser les risques de tassement, ce qui peut être un avantage pour la sécurité et la durabilité à long terme de l'ouvrage.

Chapitre 4 :
Barrage en voûte

Chapitre 4 : Barrage en voûte

Introduction

Les barrages voûtes sont des ouvrages impressionnants qui doivent résister à des contraintes énormes. Ces barrages sont conçus pour supporter les forces de l'eau et les contraintes générées par la charge de l'eau retenue, ainsi que les charges sismiques et les changements de température. Le poids de l'eau exercera une poussée hydrostatique sur la voûte, qui doit être suffisamment solide pour supporter cette force et éviter toute déformation excessive.

Cependant, le dimensionnement des barrages voûtes est une tâche complexe qui dépend de nombreux facteurs tels que la hauteur du barrage, la profondeur de l'eau, la nature du sol, la géométrie de la voûte et les charges sismiques. Des études géotechniques approfondies sont nécessaires pour évaluer la stabilité du sol et les risques sismiques, ainsi que pour déterminer la forme et les dimensions optimales de la voûte.

En somme, la conception et la construction des barrages voûtes sont des tâches complexes et requièrent une expertise technique spécialisée pour assurer leur stabilité et leur durabilité.

1. Définition

Un barrage voûte est une structure dont la forme est dessinée de façon à transmettre les efforts de poussée de la retenue vers les rives. Dans un schéma simplifié, c'est une superposition d'arcs horizontaux chargés chacun à leur extradors par la pression p correspondant à leur profondeur (voir figure 4.1).

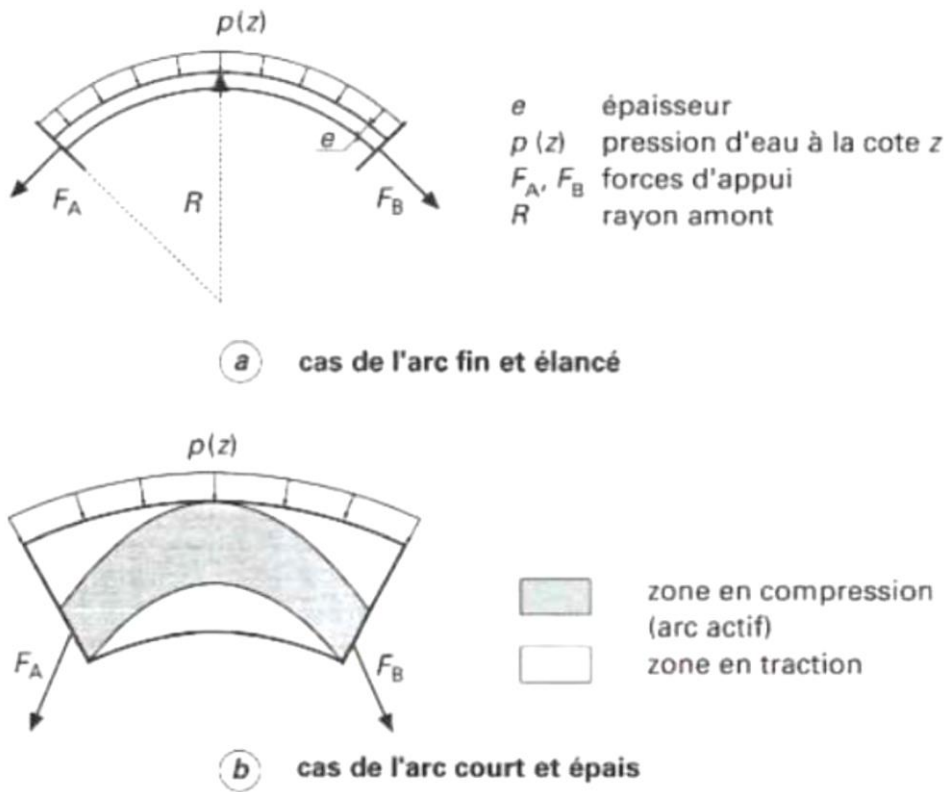


Figure 4. 1 Mode de travail des arcs d'une voûte

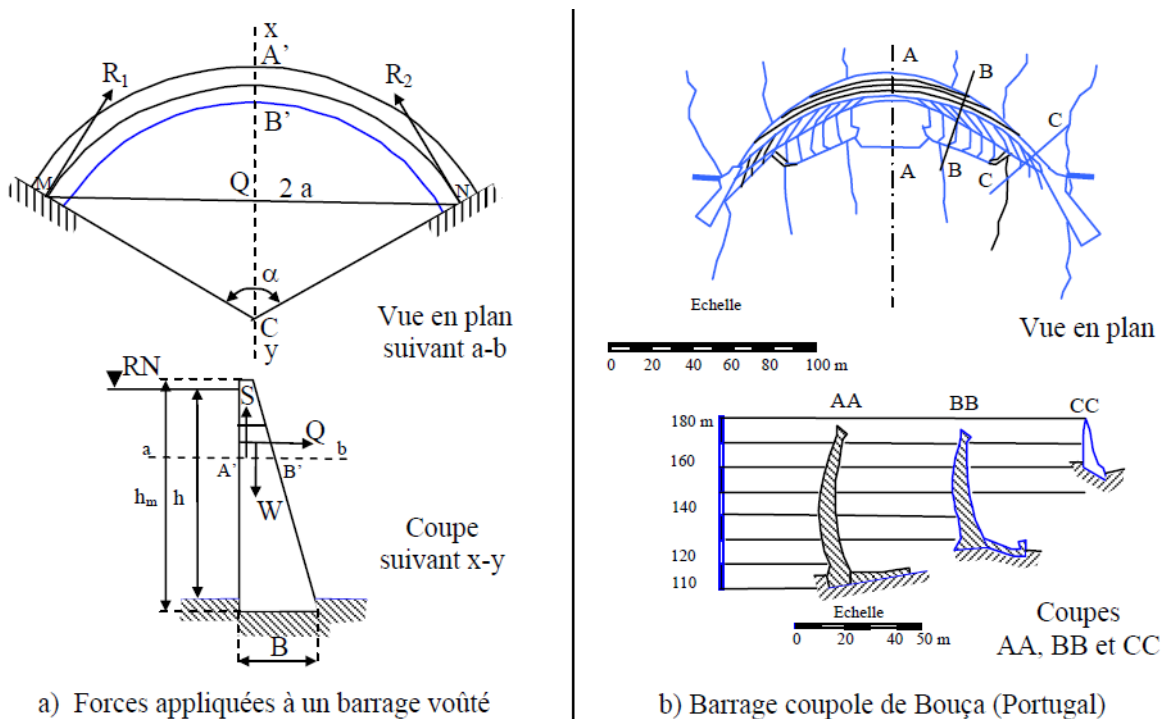


Figure 4. 2 différents types de barrages en voûte [8]

Les barrages voûtes trouvent leur place idéale dans les sites relativement étroits (ratio largeur en crête/hauteur inférieur à 4), lorsque la qualité des fondations est excellente, surtout sur les

rives. Aujourd'hui, ils sont souvent préférés à tous les autres types pour les sites de grande hauteur (plus de 150 m).



Figure 4. 3 Barrage à voûte épaisse-Monteynard, France (H =153m)

2. Différents types barrages en voûtes

Les profils en travers ont une forme générale voisine de celle d'un trapèze, avec le rapport B/h_m en générale compris entre 0.10 et 0.20 avec B et h_m sont respectivement la largeur de base et la hauteur maximale du barrage. Cependant, ce rapport est voisin de 0.75 pour un barrage poids. En allant du plus simple au plus sophistiqué, on trouvera des voûtes de formes très différentes :

- **Les cylindres** : Ce type de barrage voûte est le plus simple en termes de conception, et convient pour les petits ouvrages de moins de 20 m de hauteur. Tous les arcs sont identiques et superposés, avec un rayon et une épaisseur constants et égaux.
- **Les cylindres-cônes** : Dans ce type de barrage voûte, le rayon amont est uniforme, le parement amont est un cylindre et l'épaisseur des arcs croît linéairement de haut en bas. Les sections verticales sont donc toutes égales à un trapèze.
- **Les simples courbures** : Aussi appelées "voûtes minces", leur parement amont est un cylindre, mais l'épaisseur des arcs n'est plus constante et croît de la clé vers les appuis. Le parement aval n'est en général pas une surface réglée.
- **Les voûtes à double courbure** : Dans ce type de barrage voûte, les deux parements sont des surfaces à double concavité dirigée vers l'aval. En général, l'épaisseur croît de haut en bas et du centre vers les appuis.

- **Les voûtes multiples** : Il s'agit de voûtes simples accolées les unes aux autres, chacune ayant sa propre hauteur, sa propre clé, son propre rayon et sa propre épaisseur. Cette configuration permet d'adapter la forme de la voûte aux contraintes locales du site et de mieux répartir les contraintes sur la fondation.

Chaque type de barrage voûte a ses avantages et ses inconvénients, et le choix dépend des contraintes locales et des besoins spécifiques de chaque projet.

3. Dimensionnement

La forme générale de la voûte est souvent déterminée par des considérations esthétiques et fonctionnelles. Dans la plupart des cas, on donne aux arcs supérieurs un angle d'ouverture voisin de 110° , car cette forme est considérée comme offrant un bon compromis entre la stabilité et la capacité de stockage d'eau. L'épaisseur minimale en crête de la voûte est généralement déterminée à l'aide de la formule :

$$emc = 0.012 \times (L_c + H)$$

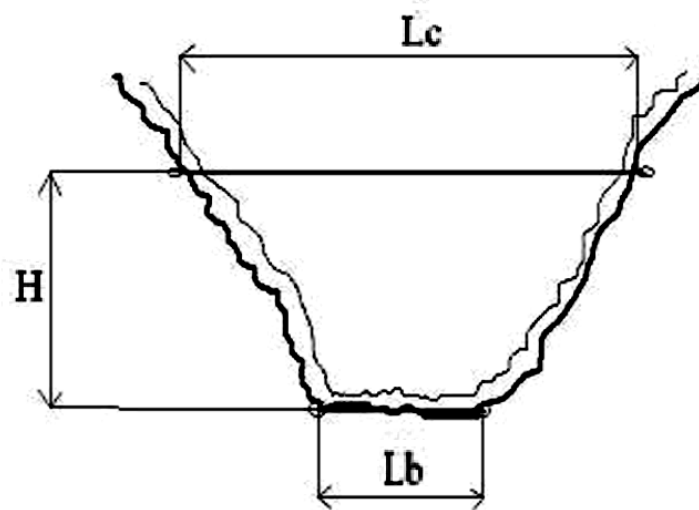


Figure 4. 4 Esquisse d'une voûte

Avec :

emc (m) : épaisseur minimale en crête

L_c (m) : largeur du site au niveau de la crête

H (m) : hauteur du barrage.

Mais souvent dans la plupart des cas si **emc** est petite, on augmente l'épaisseur au sommet du barrage pour faire passer une route.

Le premier dimensionnement, très grossier, résulte de la formule dite du tube :

$$\sigma = \frac{P \times R}{e}$$

Avec :

σ (MPa) contrainte moyenne dans un arc

p (MPa) pression d'eau a son niveau

R (m) rayon amont de cet arc

e (m) épaisseur.

On retient pour σ une valeur moyenne comprise entre 3 et 6 MPa.

Au niveau de la crête et de la base (voir figure 4.5), les pratiques suivantes sont appliquées (voir tableau 4.1) :

Tableau 4. 1 Epaisseurs d'un barrage en voûte en différents vallées [2]

Epaisseur	Vallée en U	Vallée en V
En crête	$e_c = H/15$	$e_c = H/20$
En base	$e_b = L_c/20$	$e_b = L_c/15$

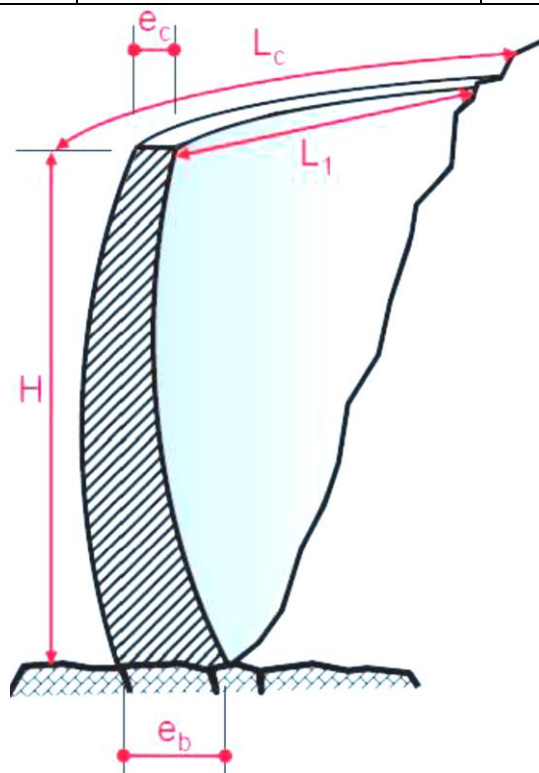


Figure 4. 5 les épaisseurs des barrages en voûtes [2]

Les formules présentées sont des outils utiles pour le prédimensionnement des petits barrages voûtes. Cependant, il est important de respecter quatre conditions fondamentales pour pouvoir concevoir un barrage voûte, qu'il soit petit ou grand :

3.1. Condition topographique

La première condition est la topographie du site. La vallée doit être relativement étroite pour que la structure fonctionne en voûte. En général, un rapport de largeur en crête sur hauteur (L_c/H) inférieur à 5 ou 6 est préférable pour des vallées en V et inférieur à 4 ou 4,5 pour des vallées en U (voir figure 4.6).

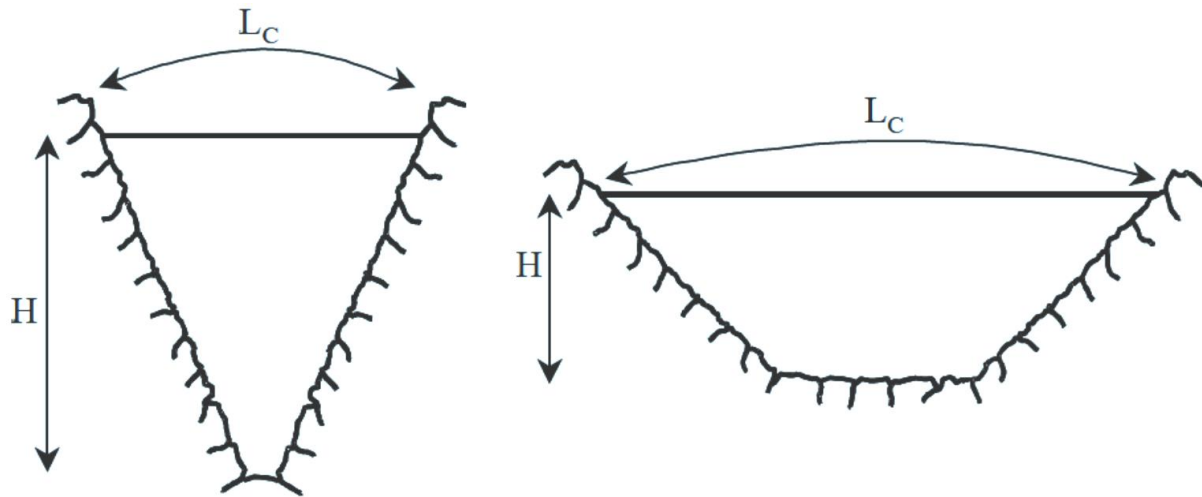


Figure 4. 6 les types de vallées pour barrage en voûte [2]

3.2. Rigidité de la fondation

La deuxième condition est la rigidité de la fondation. Pour que le barrage fonctionne correctement en voûte, la fondation doit être suffisamment rigide pour supporter les arcs. En règle générale, une voûte ne doit pas être envisagée sans études détaillées lorsque le module de déformation du rocher est inférieur à 4 ou 5 GPa.

3.3. Résistance mécanique de la fondation

Les voûtes transmettent des contraintes élevées à la fondation, en particulier aux talus de rives, qui doivent être dimensionnés pour rester dans le domaine élastique sous ces niveaux de sollicitation [2].

3.4. Tenue des dièdres de fondation

Sous l'effet des sous-pressions et de la compression apportée par la voûte, les dièdres de fondation peuvent être soumis à des contraintes importantes. Il est donc essentiel de les dimensionner correctement pour qu'ils puissent supporter ces contraintes sans se déformer ou se rompre.

4. Volume d'une voûte

Le volume utile de la voûte est exprimé en mètres cubes (m³), et est donné par la formule suivante :

$$V_u = \frac{H^2 \times (1 + \frac{H}{\sigma})(L_c^2 + 3 \times L \times B^2 + 2 \times L_c \times L \times B)}{16 \times \sigma}$$

V_u (m³) volume utile de la voute

σ (m) contrainte moyenne d'arc (exprimée en mètres d'eau)

H (m) hauteur du barrage

L_c (m) largeur en crête du site simplifié

L_b (m) largeur du site au niveau de la base.

La formule prend en compte la forme de la voûte, qui doit être progressivement affinée en fonction des résultats des calculs effectués sur les formes précédentes. Pour que la voûte soit bien proportionnée, les contraintes de compression des charges principales ne doivent pas dépasser une valeur maximale, comprise entre 8 et 10 MPa.

5. Les sollicitations et charges à la stabilité d'un barrage en voûte

Les charges et sollicitations à prendre en compte pour assurer la stabilité d'un barrage en voûte comprennent :

- Le poids propre de la voûte, qui est calculé de manière indépendante pour chaque section ;
- La pression hydrostatique de l'eau, souvent réduite à la pression appliquée sur la face amont du barrage, bien que les projets plus récents prennent en compte les pressions d'eau dans la fondation et le corps du barrage ;
- Les autres charges extérieures, telles que la poussée des sédiments, la poussée de la glace en surface de l'eau ou les forces d'inertie et de variation de la poussée dues aux séismes ;
- Les charges internes, qui incluent les effets thermiques (à l'équilibre initial et saisonniers) ainsi que les variations dimensionnelles potentielles du béton, comme le retrait et le gonflement.

Les charges mentionnées précédemment doivent être prises en compte lors de la conception d'un barrage en voûte pour garantir sa stabilité et sa sécurité.

6. Les avantages et inconvénients

6.1. Avantages

Il convient de noter que les avantages d'un barrage voûte dépendent en grande partie de sa taille et de sa situation géographique. Voici quelques avantages supplémentaires couramment associés aux barrages voûtes :

- **Résistance à la pression de l'eau** : les barrages voûtes sont conçus pour résister aux pressions de l'eau et pour prévenir les inondations. En raison de leur conception en voûte, ils peuvent résister à des pressions d'eau plus élevées que les barrages en remblai ou les barrages poids.
- **Durée de vie** : Les barrages voûtes ont une durée de vie relativement longue, pouvant aller jusqu'à plusieurs dizaines d'années, voire plus. Ils sont souvent construits pour durer des siècles.
- **Résistance aux tremblements de terre** : Les barrages voûtes sont généralement plus résistants aux tremblements de terre que les autres types de barrages en raison de leur conception en voûte. Ils sont conçus pour répartir les forces sismiques sur toute la structure du barrage plutôt que de les concentrer en un seul point.
- **Faible impact sur l'environnement** : Les barrages voûtes ont un impact environnemental relativement faible par rapport aux autres types de barrages, car ils nécessitent moins de béton et ont souvent un impact moindre sur la flore et la faune locales.
- **Faible évaporation** : En raison de leur forme et de leur capacité de stockage d'eau profonde, les barrages voûtes peuvent souvent réduire l'évaporation de l'eau stockée par rapport aux autres types de barrages.
- **Esthétique** : Enfin, les barrages voûtes peuvent être considérés comme étant plus esthétiques que les autres types de barrages en raison de leur forme en voûte, qui peut être intégrée harmonieusement dans le paysage environnant.

6.2. Inconvénients

- **Les contraintes importantes** dans le béton et le rocher sont dues aux charges exercées sur le barrage, ce qui peut conduire à des fissures et des déformations si la conception n'est pas adéquate. Il est donc important de prendre en compte les paramètres de la géologie locale pour évaluer la résistance de la fondation et minimiser les risques de tassement.

- **Les forces transmises** obliquement dans les appuis sont également un inconvénient, car elles peuvent causer des glissements d'appui et altérer la stabilité du barrage.
- **L'échauffement** du béton par la prise du ciment est également un problème, car cela peut entraîner des tensions dans la structure. Il est donc nécessaire de contrôler la température et l'humidité pendant la construction.
- **L'intégration de l'évacuateur de crues** (grands débits) dans le barrage est également difficile, car cela nécessite de percer une ouverture dans la voûte et d'installer un système de régulation de l'eau qui ne compromet pas la stabilité du barrage.
- **Le gradient des sous-pressions au niveau de la fondation** est très élevé, ce qui peut provoquer des fissures dans le rocher et des glissements d'appui. C'est pourquoi il est important de prendre en compte les caractéristiques de la fondation lors de la conception.
- **Les sous-pressions dans les fissures du rocher** peuvent également causer des glissements d'appui, ce qui peut compromettre la stabilité du barrage. Il est donc important de surveiller régulièrement la structure pour détecter tout signe de fissure ou de déformation.

Il convient de noter que la liste des inconvénients n'est pas exhaustive et que chaque projet de barrage voûte présente des défis et des limites spécifiques en fonction de son emplacement géographique, de la nature des sols et des roches, ainsi que des conditions environnementales.

En outre, certains des inconvénients mentionnés peuvent être atténués ou résolus par des techniques de construction et de conception appropriées, notamment en utilisant des matériaux plus résistants, en appliquant des méthodes de construction innovantes ou en intégrant des dispositifs spécifiques pour prévenir les tassements ou les glissements d'appuis.

7. Barrage à voûtes multiples

Un barrage à voûtes multiples comprend deux parties distinctes jouant chacune un rôle particulier :

- un masque d'étanchéité constitué d'un certain nombre de voûtes en béton ou en béton armé de faible épaisseur.
- des contreforts en béton sur lesquels s'appuient les voûtes et qui reportent sur le sol les poussées exercées par celles-ci.

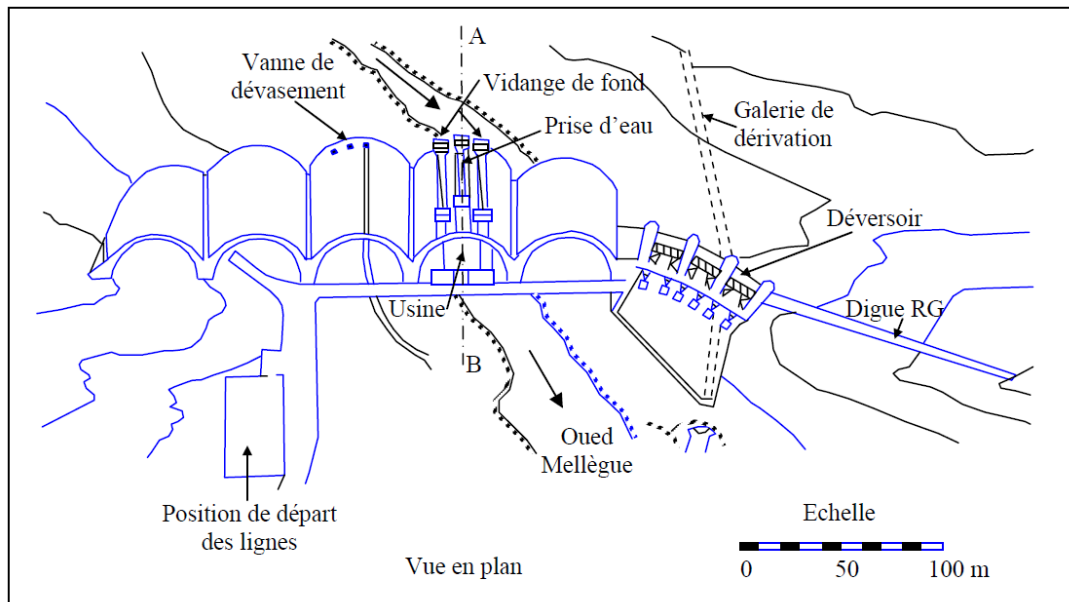


Figure 4. 7 carte du barrage Mellègue à voûtes multiples



Figure 4. 8 Barrage à voutes multiples de Grandval -France, H =153m

7.1. *Forme du barrage*

Les voûtes cylindriques sont souvent utilisées car elles sont plus simples à construire et offrent une bonne résistance aux contraintes de compression. L'inclinaison de $m = 1$ à 0,6 est généralement choisie pour assurer une distribution uniforme des charges sur les contreforts et pour minimiser les contraintes de cisaillement dans la voûte.

L'angle d'ouverture des voûtes est également important pour assurer une répartition uniforme des charges sur les contreforts et éviter les contraintes excessives dans la voûte. L'angle d'ouverture idéal est d'environ 133 degrés, mais il peut varier en fonction des caractéristiques géologiques et topographiques du site.

Les contreforts sont des murs verticaux qui soutiennent les voûtes et reportent les poussées exercées par celles-ci sur le sol. Ils sont dimensionnés pour résister aux charges de compression et de cisaillement et pour minimiser les déformations et les tassements du barrage (voir figure 4.9).

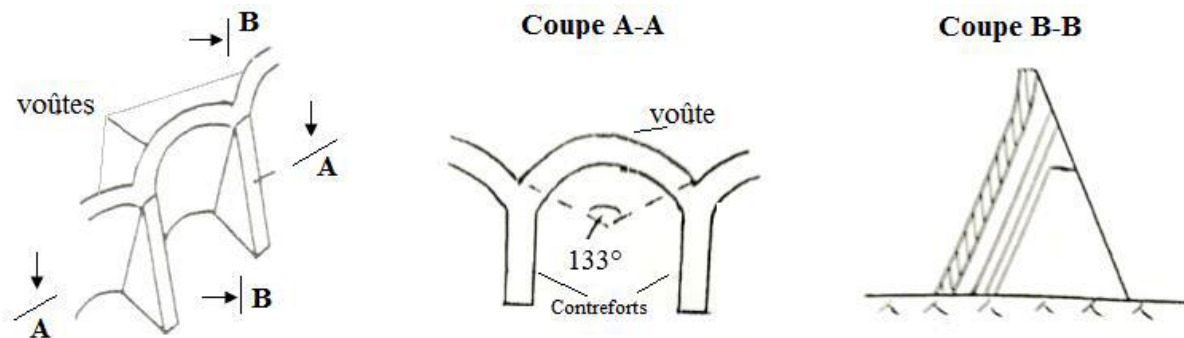


Figure 4. 9 Forme et angle d'ouverture des voûtes [8]

L'épaisseur des contreforts peut varier de haut en bas en fonction de la charge exercée par les voûtes et de la nature du sol. En général, l'épaisseur est plus grande à la base pour résister aux charges les plus importantes et diminue progressivement vers le haut.

7.2. Avantages et inconvénients

7.2.1. Avantages

- **Le volume de béton** requis pour un barrage à voûtes multiples est relativement faible par rapport aux autres types de barrages. Cela est dû au fait que les voûtes sont relativement minces et qu'elles ne nécessitent pas de soutien supplémentaire.
- **La fouille** nécessaire pour construire un barrage à voûtes multiples est également relativement petite par rapport aux autres types de barrages. Cela est dû au fait que les contreforts qui supportent les voûtes peuvent être construits à des intervalles relativement larges, ce qui signifie que moins d'excavation est nécessaire pour la construction du barrage.
- **Les sous-pressions** au niveau de la fondation sont relativement faibles pour les barrages à voûtes multiples. Cela est dû au fait que la surface de la fondation est relativement petite par rapport à d'autres types de barrages. Cela peut contribuer à réduire les risques de glissement et d'érosion au niveau de la fondation.
- Pendant la construction, **l'échauffement** du béton est relativement faible pour les barrages à voûtes multiples. Cela est dû au fait que les voûtes sont relativement minces et que les contreforts peuvent être construits à des intervalles relativement larges, ce qui

signifie que moins de béton est coulé à la fois. Cela peut contribuer à réduire les risques de fissuration et de déformation du béton pendant la construction.

7.2.2. Inconvénients

- **Les contraintes** sont importantes dans les voûtes : les voûtes en béton doivent être conçues pour résister aux charges hydrostatiques et à la poussée des terres, ainsi qu'aux charges sismiques. Les contraintes peuvent être très élevées, ce qui nécessite un béton de haute qualité et une conception très précise.
- **Grand risque de tassements** : les barrages à voûtes multiples sont très sensibles aux tassements différentiels, qui peuvent se produire en raison des variations de la composition du sol ou des variations de la charge sur le barrage. Les tassements peuvent provoquer des fissures dans les voûtes, ce qui peut compromettre la stabilité de l'ensemble de la structure.
- **Très susceptible au séisme** : bien que les barrages à voûtes multiples soient conçus pour résister aux charges sismiques, ils sont plus susceptibles aux dommages causés par les tremblements de terre que les barrages en béton à contreforts ou en terre. Les contraintes sur les voûtes peuvent provoquer des fissures ou des ruptures, et la structure peut être endommagée de manière irréversible.
- **La combinaison du barrage avec l'évacuateur de crue** est difficile : l'intégration d'un évacuateur de crue dans un barrage à voûtes multiples est plus difficile que dans d'autres types de barrages. Les évacuateurs de crue doivent être conçus pour s'adapter à la forme de la voûte, ce qui peut rendre la conception plus complexe.
- **Les sous-pressions** dans les fissures du rocher peuvent provoquer des glissements d'appuis : les barrages à voûtes multiples s'appuient sur des contreforts en béton qui transfèrent la charge du barrage au sol. Si le sol présente des fissures ou des zones de faiblesse, les sous-pressions exercées par les contreforts peuvent provoquer des glissements d'appuis, ce qui peut compromettre la stabilité de l'ensemble de la structure.
- **La structure** est très vulnérable (attentats, guerre) : les barrages à voûtes multiples sont des cibles potentielles pour les actes de terrorisme ou les attaques militaires, car ils sont des symboles de puissance et de contrôle de l'eau. Les dommages causés par des explosions ou des attaques peuvent avoir des conséquences catastrophiques sur les populations en aval.

8. Application**Exercice 1**

Déterminer le volume total du barrage voûte de 120 m de hauteur pour couvrir une vallée en forme de U de 300 m de large. La largeur de la crête est de 6 m.

Prendre $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$, l'angle de l'ouverture de l'arc est de $\phi=120^\circ$, N (contrainte)=6200 kN/m^2 .

On néglige la variation de la largeur de la vallée et de l'angle ϕ dans le sens vertical. Considérer la face amont verticale.

Solution

Le rayon de l'arc :

$$R = \frac{L}{2 \sin\left(\frac{\phi}{2}\right)}$$

$$R = \frac{300}{2 \sin\left(\frac{120}{2}\right)} = 173 \text{ m} =$$

L'épaisseur à la base :

$$t_{base} = \frac{\gamma \times h \times R}{N}$$

$$t_{base} = \frac{10 \times 120 \times 173}{6200} = 33.5 \text{ m}$$

La profondeur de l'épaisseur 6 m

$$h = \frac{b \times N}{\gamma \times R}$$

$$h = \frac{6 \times 6200}{10 \times 173} = 21.5 \text{ m}$$

la longueur de l'arc

$$L = 173 \times \frac{\pi}{180} \times 120 = 362 \text{ m}$$

Le volume total

$$V_T = b \times h + \frac{b + t_{base}}{2} \times (h_{barrage} - h) \times L$$

$$V_T = 750924 \text{ m}^3$$

Conclusion

La localisation du barrage à voûte doit prendre en compte plusieurs facteurs tels que le type de roche, la géomorphologie du terrain, le régime hydraulique de la rivière, les risques d'inondation, les risques sismiques, et les considérations environnementales et sociales.

La construction d'un barrage à voûte est également plus complexe que celle d'un barrage poids en raison de la nécessité de coffrages spécifiques pour la voûte et des méthodes de construction plus élaborées pour assurer la stabilité des voûtes.

De plus, les barrages à voûtes sont plus vulnérables aux contraintes thermiques, aux tassements différentiels et aux glissements de terrain que les barrages poids, ce qui peut nécessiter des mesures de surveillance et d'entretien plus strictes.

Cependant, malgré ces inconvénients, les barrages à voûtes peuvent offrir une meilleure résistance aux séismes, une empreinte environnementale réduite, un risque de rupture plus faible, et une meilleure intégration dans l'environnement grâce à leur design en courbe. Le choix entre un barrage à voûte et un barrage poids dépendra donc des caractéristiques du site et des objectifs du projet.

Chapitre 5 :

Barrage en terre

Chapitre 5 : Barrage en terre

Introduction

Un barrage en terre est une structure de retenue d'eau construite à partir de matériaux naturels tels que la terre, le sable et le gravier. Bien qu'ils soient plus souples et moins coûteux à construire que les barrages en béton ou en acier, ils peuvent être plus vulnérables aux fuites d'eau car ils sont moins résistants que les barrages en béton et en acier. Pour minimiser ce risque, des mesures de contrôle de la qualité sont souvent mises en place pendant la construction et la gestion du barrage.

1. Définition

Le barrage en terre est construit en couches successives de matériaux naturels tels que la terre, le sable, le gravier et la pierre. Ces couches sont compactées pour former une structure solide qui est capable de retenir l'eau. Le cœur du barrage est souvent renforcé avec des matériaux plus résistants tels que de l'argile ou de la bentonite pour augmenter la résistance et la stabilité du barrage.

Le principal avantage des barrages en terre est leur coût. Ils sont généralement moins chers à construire que les barrages en béton ou en acier, ce qui les rend accessibles à des projets de petite et moyenne taille. De plus, leur souplesse permet de mieux résister aux mouvements sismiques, ce qui les rend particulièrement adaptés aux régions sujettes aux tremblements de terre.

On distingue deux catégories de barrages en remblai :

- **Les barrages en terre** : C'est le type de barrage en terre le plus courant. Il consiste en une digue de terre compactée qui est construite en accumulant des couches successives de terre, de sable et de gravier.
- **Les barrages en enrochements** : Il est également appelé barrage en gravier, il utilise des roches de taille variable pour construire une structure solide. Les roches sont souvent disposées en couches inclinées pour augmenter la résistance de la structure.

2. Types de barrage en terre

Il existe plusieurs types de barrages en terre qui se différencient principalement par leur forme et leur méthode de construction. Voici quelques exemples :

2.1. Barrage en terre homogène

Ils sont totalement construits avec un seul matériau qui est le plus souvent argileux remplissant simultanément les deux fonctions d'écran et de masse. Ce matériau doit présenter des caractéristiques permettant de garantir une étanchéité suffisante et une stabilité du remblai.

Leur simplicité a permis de développer une technique de réalisation bien maîtrisée tout en assurant une grande sécurité, néanmoins ce type de barrage est surtout adopté pour la réalisation de retenue collinaire et de petits barrages.

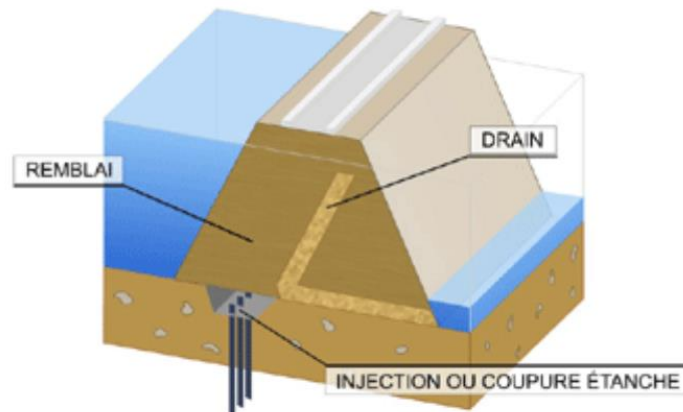


Figure 5. 1 Barrage en terre homogène [9]

2.2. Barrage en terre à noyau central

Le barrage à noyau est composé d'un noyau central, constitué d'un matériau imperméable, et de recharges, c'est-à-dire une couche supérieure qui recouvre les flancs du noyau.

La stabilité du massif sera assurée par des zones perméables appelées recharges.

Les recharges peuvent être constituées d'enrochements ou d'alluvions. Elles permettent d'assurer la stabilité du barrage, alors que le noyau central assure son étanchéité.

Il est Plus stable qu'un barrage homogène, grâce aux recharges, les barrages à noyaux permettent de construire des talus plus raides.

De plus le risque d'écoulement dans le corps du barrage est plus limité grâce à ces enrochements.

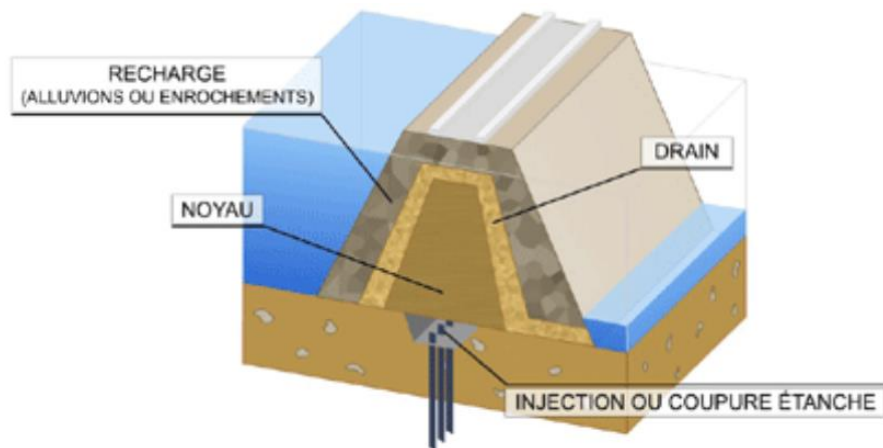


Figure 5. 2 Barrage en terre à noyau central [9]

2.3. Barrage à masque amont

Les barrages en terre à masque sont des remblais perméables avec un écran imperméable appelé masque placé sur le parement amont.

La présence de ce masque sur le parement amont présente un double avantage de pouvoir faire des réparations en cas de dégradation du masque et de permettre de faire des vidanges rapides sans risque de glissements.

Le masque lui-même peut être réalisé :

- par une **dalle de béton armé** coulé par plots successifs sur toute la surface du parement amont ;
- par une ou des **couches de béton bitumineux** mises en place par des engins similaires à ce qu'on trouve sur des chantiers routiers (adaptés par tenir sur la pente) ;
- par des **géomembranes** (typiquement des feuilles de PVC de forte épaisseur) livrées en lés et soudées les unes aux autres. Les feuilles sont posées sur une coche de transition en matériau fin (pour éviter de déchirer la membrane qui s'appuierait directement sur les enrochements) et protégées par des dalles, des pavés... Ce type de masque est très utilisé pour les petits ouvrages et notamment les retenues d'altitude pour la neige artificielle ;
- plus rarement par une **tôle métallique galvanisée**.

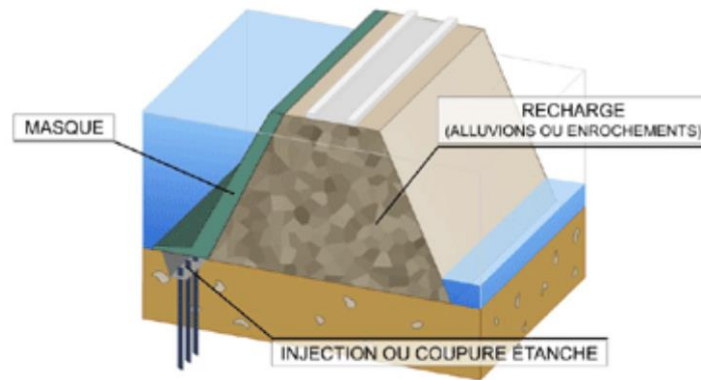


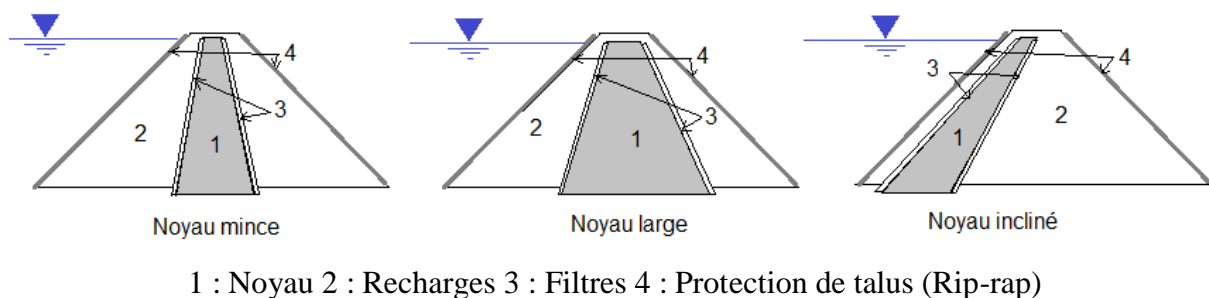
Figure 5. 3 Barrage à masque amont [9]

2.4. Barrage en enrochement zoné

Ce sont des barrages composés d'une zone centrale, appelée noyau, qui assure le rôle d'étanchéité. Placée au coeur du remblai, le noyau (vertical ou incliné) est constitué de matériaux argileux imperméables, d'épaisseur variable généralement plus large à la base à cause des pressions interstitielles plus fortes. La fonction de stabilité est apportée par les recharges (figure 5.4). Ces massifs plus perméables que le noyau sont réalisés en enrochements, ou en terre plus grossière. Pour se prémunir contre des phénomènes d'érosion interne, le noyau est entouré de couches filtrantes. Une granulométrie spécialement étudiée est utilisée entre la taille très petite des grains d'argile et les grains bien plus grossiers des recharges. Plusieurs couches de filtres successifs sont généralement nécessaires.

L'épaisseur du noyau dépend [10] :

- D'une largeur minimale en crête pour le passage des engins
- De la disponibilité des terres imperméables
- Du gradient hydraulique en contact avec la fondation Parmi les plus hauts barrages du monde, Nourek au Tadjikistan, est un barrage en remblai zoné qui atteint 304 mètres de hauteur



1 : Noyau 2 : Recharges 3 : Filtres 4 : Protection de talus (Rip-rap)

Figure 5. 4 Barrage en enrochement zoné

3. Choix du type de barrage en terre

Chacun de ces types de barrages en terre a ses avantages et ses limites, en fonction des conditions géologiques et hydrologiques du site. Le choix du type de barrage dépendra donc de nombreux facteurs, tels que la topographie du site, les caractéristiques du cours d'eau et les objectifs de la retenue d'eau.

3.1. Barrage en remblai

Ce type de barrage convient aux sites où la couche de fondation est suffisamment solide pour supporter le poids du barrage. Le sol doit également être suffisamment perméable pour permettre l'écoulement de l'eau à travers le barrage, afin de prévenir la saturation et la rupture du barrage. De plus, la topographie du site doit permettre la construction d'une digue de terre suffisamment large et haute pour former une retenue d'eau viable.

3.2. Barrage en enrochement :

Ce type de barrage est adapté aux sites où les roches de qualité sont facilement disponibles. Le sol doit être suffisamment solide pour supporter le poids du barrage, et la topographie du site doit permettre la construction d'une digue de terre suffisamment large et haute pour former une retenue d'eau viable.

4. Dimensionnement

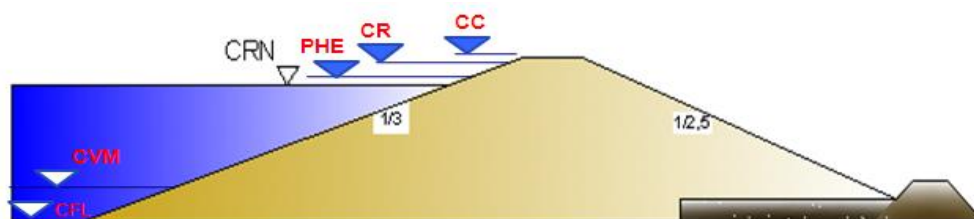


Figure 5. 5 schéma des différents hauteurs d'un barrage en terre

CFL : Côte fond du lit

CVM : côte du volume mort

CRN : Côte retenue normale

PHE : Côte des plus hautes eaux

CR : Côte revanche

CC: Côte crête du barrage

CVM – CFL : Volume mort

CRN - CVM : Volume utile de la retenue

CPHE - CRN : Charge sur le déversoir

CR – CPHE : Revanche

CC – CR : Sécurité + tassements

4.1. Hauteur du barrage (Ht)

La hauteur du barrage est égale à la hauteur normale de la retenue (NNR), majorée de la charge maximale au-dessus de seuil du déversoir de crue (h) et la revanche (R). Le niveau normal de la retenue correspond à la capacité utile à stocker. Cette capacité est déterminée en tenant compte du volume des besoins, de la surface à irriguer et de la tranche morte correspondante aux dépôts solides.

$$\text{Hauteur totale du barrage hors fondations} = \text{CC} - \text{CFL}$$

4.2. Le niveau des plus hautes eaux (PHE)

Le niveau des plus hautes eaux est égal au niveau normal de la retenue majoré de la charge sur le déversoir de crue.

$$\text{PHE} = \text{NNR} + h$$

4.3. Volume mort CVM :

Le transport solide par suspension particulièrement peut être mesuré en tant que débit solide pendant les crues. La connaissance des concentrations en g/l pendant les crues annuelles ainsi que les volumes des crues obtenues par planimétrage des hydrogrammes successifs permettent, en introduisant la masse volumique de la vase, de calculer le volume de la vase pendant une crue donnée. On peut ainsi déterminer le volume qui sera déposé au niveau de la retenue durant une période d'exploitation fixée au préalable. Ce volume, par l'utilisation des courbes caractéristiques de remplissage, permet de calculer la côte CVM. Dans le cas échéant (absence de mesure), le volume mort peut être déterminé par le modèle empirique suivant :

$$V_M = \frac{A.S.N}{\rho} (m^3)$$

VM: Volume mort pendant une durée d'exploitation N en années

A : Transport solide spécifique en T/Km².An

S : Surface du bassin versant en Km²

ρ : masse volumique de la vase comprise en général entre 1.4 et 1.6 T/m³

Les formules de SOGREAH inspirées des relations de TXERONT, donnant les apports solides spécifiques A (T/km².an) en fonctions du ruissellement de crue (mm) et de la perméabilité des bassins:

- Perméabilité élevée A = 8,5. H^{0,15}
- Perméabilité moyenne à élevé A = 75. H^{0,15}
- Perméabilité faible a moyenne A = 350. H^{0,15}
- Perméabilité faible A = 1400. H^{0,15}
- imperméabilité A = 3200. H^{0,15}

H : lame d'eau écoulée en mm

$$H = (A_0 / S.10^3)$$

A₀ : Apport moyen annuel du bassin versant

4.4. La revanche (R)

C'est la tranche comprise entre la cote des plus hautes eaux et la crête de la digue. Elle a pour fonction d'assurer une protection contre les effets des vagues.

On applique la formule de GAILLARD :

$$R = 0,75.h_v + \frac{V^2}{2.g}$$

Avec :

R : la revanche exprimé en mètre (m)

h_v : La hauteur des vagues en m.

V : Vitesse de propagation des vagues m/s

La hauteur des vagues est calculée selon les formules empirique de Molitor :

- F < 30 km : $h_v = 0.76 + 0.032 \times (v.F)^{1/2} - 0.26 \times F^{1/4}$
- F > 30 km : $h_v = 0.032 \times (v.F)^{1/2}$

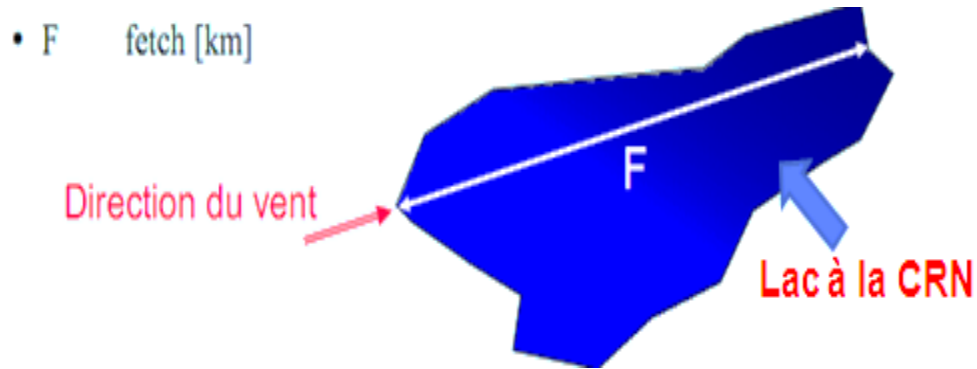
Avec :

V : Vitesse du vent en (Km/h)

F: Fetch en Km.

La vitesse de propagation des vagues peut être estimée par la formule de GAILLARD :

$$V = 1.5 + 2 h_v \text{ en m/s}$$



4.5. Pentes des talus

Tableau 5. 1 Valeurs des pentes des talus en fonction de la hauteur et le type de la digue

Hauteur du barrage	Type de barrage	pente des talus	
		amont	Aval
Inférieur à 5 m	• Homogène	1 / 2,5	1 / 2
	• à zones	1 / 2	1 / 2
5 à 10 m	• homogène à Granulométrie étendue	1 / 2	1 / 2
	• homogène à fort pourcentage d'argile	1 / 2,5	1 / 2,5
	• à zones	1 / 2	1 / 2,5
10 à 20 m	• homogène à Granulométrie étendue	1 / 2,5	1 / 2,5
	• homogène à fort pourcentage d'argile	1 / 3	1 / 2,5
> à 20 m	• à zones	1 / 2	1 / 3
	• homogène	1/3	1/3

4.6. La crête

4.6.1. Côte de la crête du barrage (CCB)

La cote de la crête du barrage est arasée à la cote correspondante au niveau des plus hautes eaux (PHE), majorée de la revanche (R).

$$CCB = PHE + R$$

4.6.2. La largeur en crête

La largeur en crête d'une digue en terre doit être suffisante pour qu'il n'y a pas de circulation d'eau importante dans la digue près de son couronnement, quand la retenue soit plein elle doit permettre également, la circulation des engins pour l'entretien de l'ouvrage.

La largeur en crête d'une digue n'est jamais inférieure à 3 mètres. Pour des ouvrages de hauteur supérieure à 9 mètres, on adopte souvent une largeur en crête égale 1/3 de la hauteur du barrage.

On peut également la calculer par les formules suivantes

- Formule de KNAPEN : $L = 1,65 \cdot \sqrt{H} [m]$
- Formule de PREELE : $L = 1,1\sqrt{H} + 1[m]$
- Formule FRANCAISE : $L = 2,6.H^{\frac{1}{3}}[m]$
- Formule classique : $L = \frac{1}{3}.H[m]$

4.6.3. La longueur en crête du barrage (L_t)

La longueur en crête du barrage est mesurée sur une carte topographique d'échelle (1/10000) du site. Elle est obtenue par la mesure directe sur le levé topographique suivant l'axe de la digue ; c'est la distance séparant les deux points d'interaction de l'axe de la digue avec la courbe de niveau ayant pour la cote (CCB).

5. Les avantages et inconvénients

Type de barrages	Avantages	Inconvénients
------------------	-----------	---------------

<p style="text-align: center;">Digue en terre/ Enrochement à noyau</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Le corps du barrage est très flexible et adaptable aux conditions du terrain. • Peu susceptible aux tassements et aux séismes. • Petite à moyenne fouille. La digue n'est pas forcément fondée sur un rocher sain. • La compression du sol est faible. • Le gradient des sous-pressions au niveau de la fondation ou du noyau est faible. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en place de grands volumes de matériaux. • Le remblai du noyau en argile est influencé par les conditions atmosphériques (climat pluie).
<p style="text-align: center;">Digue à masque amont (béton ou bitumineux)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Le corps du barrage est très flexible et adaptable aux conditions du terrain. • Les tassements limités sont tolérables. • Pas très susceptible au séisme. Au-dessous du masque, un système de drainage performant est nécessaire à cause de la fissuration. • Le volume des déblais est moyen. • Le masque doit être connecté au rocher (directement ou par une parafouille). • La compression du sol est faible. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en place de grands volumes de matériaux. • Le gradient est très élevé près de la connexion entre le masque et le rocher (plinthe).

6. Etude des infiltrations

Les problèmes d'étanchéité d'un barrage se situent en général à trois niveaux :

- L'étanchéité de la cuvette,
- L'étanchéité du corps de remblai,
- L'étanchéité de la fondation et des rives.

Les infiltrations peuvent provoquer trois types de phénomènes :

- **Fuites d'eau** souvent inévitables, mais qu'il convient de les limiter.
- **Sous-pressions** qui sont en général défavorables à la stabilité des ouvrages.
- **Phénomène de renard** menace gravement la survie de l'ouvrage (voir figure 5.6 et 5.7).

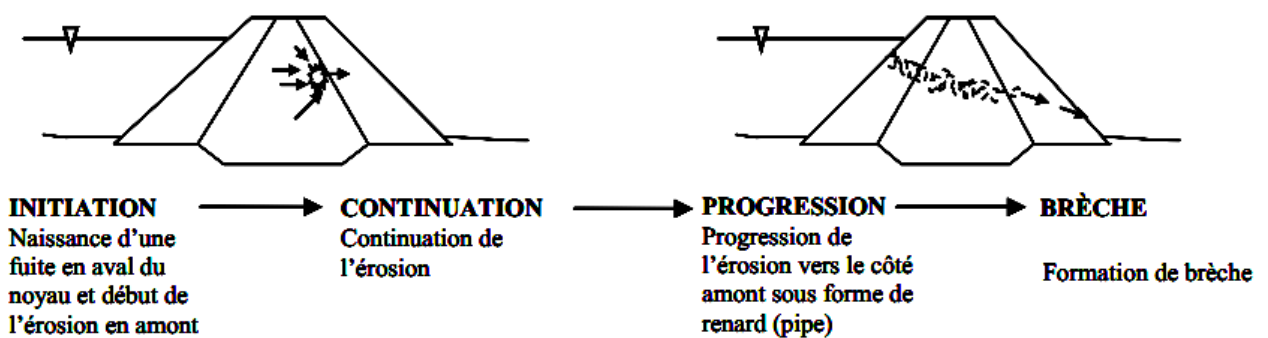


Figure 5. 6 Renard dans les remblais initiés par une érosion régressive [9]

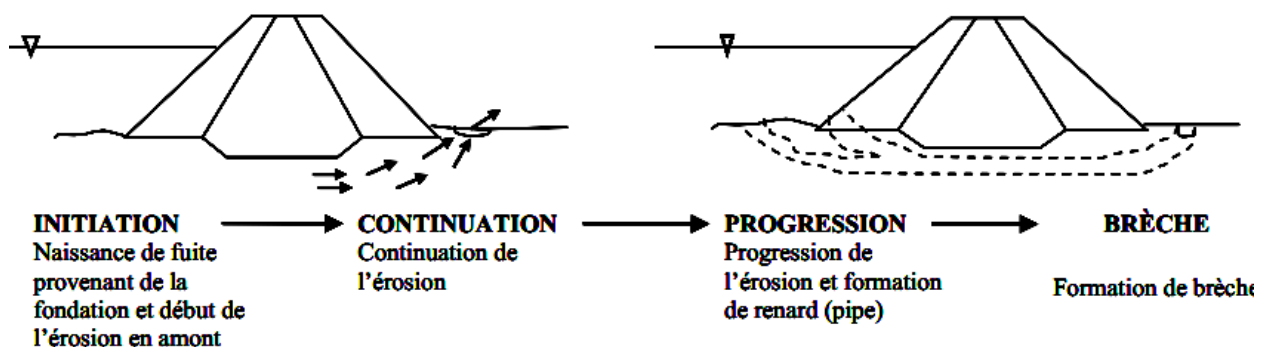


Figure 5. 7 Renard dans la fondation amorcée par une érosion régressive [9]

L'infiltration à travers le corps d'un barrage en terre cause une perte d'eau dans la retenue et un risque d'instabilité dans la digue. L'étude de ce phénomène a pour buts de :

- Déterminer la ligne de saturation,
- Le gradient hydraulique maximal
- Le débit de fuite.

7. Le débit de fuite

Le calcul du débit de fuite est basé sur la loi de Darcy, sur la figure 5.8 la ligne phréatique passe de h_1 à h_2 d'où les expressions suivantes :

$$q = k \frac{\Delta H}{\Delta L} \Delta S$$

D'où :

La perte de charge : $\Delta H = H_1 - H_2$

La longueur de l'écoulement : $\Delta L = L$

La section moyenne : $\Delta S = \frac{H_1 + H_2}{2}$

Le débit de fuite : $q = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L}$

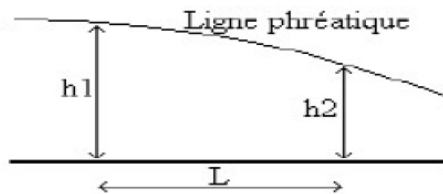


Figure 5. 8 L'écoulement dans un sol

Considérons une maille du réseau de dimension $a \times b$ par unité de largeur tel que :

a : distance entre deux lignes de courants,

b : distances entre deux lignes équipotentielles,

Le débit traversant un quadrilatère est donné par : $\Delta q = K \cdot \Delta h \cdot \frac{a}{b}$

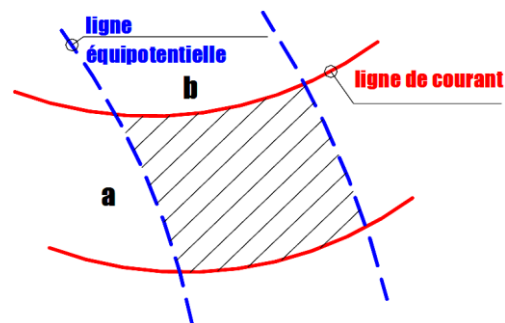
C'est le débit traversant un canal « i » alors : $q_i = \Delta q = K \cdot \Delta h \cdot \frac{a}{b}$

Δh étant la perte de charge élémentaire.

Si on appelle :

n_h : nombre d'intervalles entre les lignes équipotentielles

n_c : nombre de tubes d'écoulement (de canaux)



On aura le débit total : $q = n_c q_i = n_c K \Delta h \frac{a}{b}$

Si la perte de charges totale entre la 1ère et la dernière ligne équipotentielle est :

$$\Delta H = n_h \cdot \Delta h$$

Le débit total de fuites du coté amont vers le coté aval est donné par la relation :

$$Q = K \cdot \Delta H \cdot \frac{n_c}{n_h} \cdot \frac{a}{b}$$

En général, les réseaux d'écoulement sont tracés avec : $a=b$

Dans ce cas, le débit total est :

$$Q = K \cdot \Delta H \cdot \frac{n_c}{n_h}$$

Ce calcul a été effectué par unité de largeur. Pour une digue de largeur L, le débit de fuite total est :

$$Q = K \cdot \Delta H \cdot \frac{n_c}{n_h} \cdot L$$

La méthode de calcul exposée si dessus est générale. D'autres méthodes tenant compte de l'angle α que fait le talus aval avec l'horizontale et basées également sur la loi de Darcy sont appliquées pour le calcul du débit de résurgence (Rolley et al., 1977).

Tableau 5. 2 Les débits de résurgences en fonction de l'angle α

	$\alpha < 30^\circ$	$30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$
Le débit Q	$Q = K \cdot b \cdot \sin^2 \alpha$ Avec : $b = OD = \sqrt{h^2 + d^2} - \sqrt{d^2 - h^2 \cot^2 \alpha}$	$Q = K y_0$ y_0 est l'ordonnée du point de sortie de la surface libre.

8. La méthode de Pavlovsky

Pour une infiltration avec une charge d'eau avale, Pavlovsky divise le massif en trois zones selon la figure 5.9. Il assume un écoulement horizontal en zone I, II et III avec l'application de la loi de Darcy $dq = k \cdot i \cdot \Delta S$.

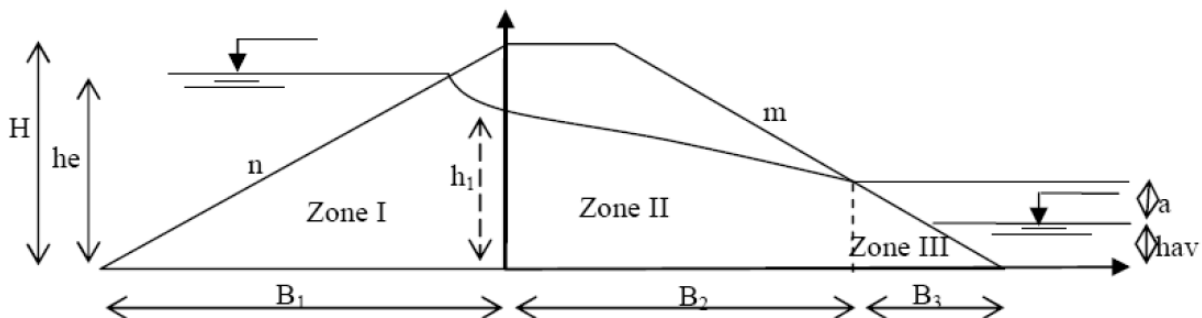


Figure 5. 9 schéma de partage en zone selon Pavlovsky

Après tout calcul les débits de fuites seront donnés par les formules suivantes :

$$\text{Zone I : } Q_1 = \frac{k(h_e - h_1)}{n} \ln\left(\frac{H}{H - h_1}\right)$$

$$\text{Zone II : } Q_2 = \frac{k}{2} \frac{(h_1^2 - (hav + a)^2)}{B_1}$$

$$\text{Zone III : } Q_3 = k \frac{a}{m} \left[1 + \ln\left(\frac{hav + a}{a}\right) \right]$$

9. Dispositif de drainage

La charge hydraulique à l'amont du barrage crée une infiltration progressive dans le massif de celui-ci et dans ses fondations. Bien que le choix du matériau de construction ait été fait de manière à limiter les débits d'infiltration, il faut éviter que les eaux infiltrées ne nuisent à la stabilité de l'ouvrage par création de renard ou par destruction du pied aval de la digue. Le dispositif drainant est destiné à éviter la saturation du talus aval. Il peut être constitué soit par un drain vertical, soit par un drain horizontal, parfois une butée prismatique à l'aval suffit.

9.1. Drain vertical

Le drain vertical au centre de la digue constitue une solution plus efficace pour intercepter les eaux d'infiltration. Un tel drain est constitué d'un rideau d'une largeur minimale de 1m en matériaux grossiers dont la granulométrie est choisie de manière à ce que les conditions de filtre soient réalisées. L'eau de percolation interceptée par le drain filtrant est évacuée soit par un réseau de tuyau-drain, soit par un drain-tapis filtrant (voir figure 5.10).

$$q = K \cdot \frac{h^2}{2L}$$

Avec :

- K : Perméabilité du matériau du drain
- h : Epaisseur du drain
- L : Longueur du drain
- q : capacité de décharge par mètre de largeur du drain

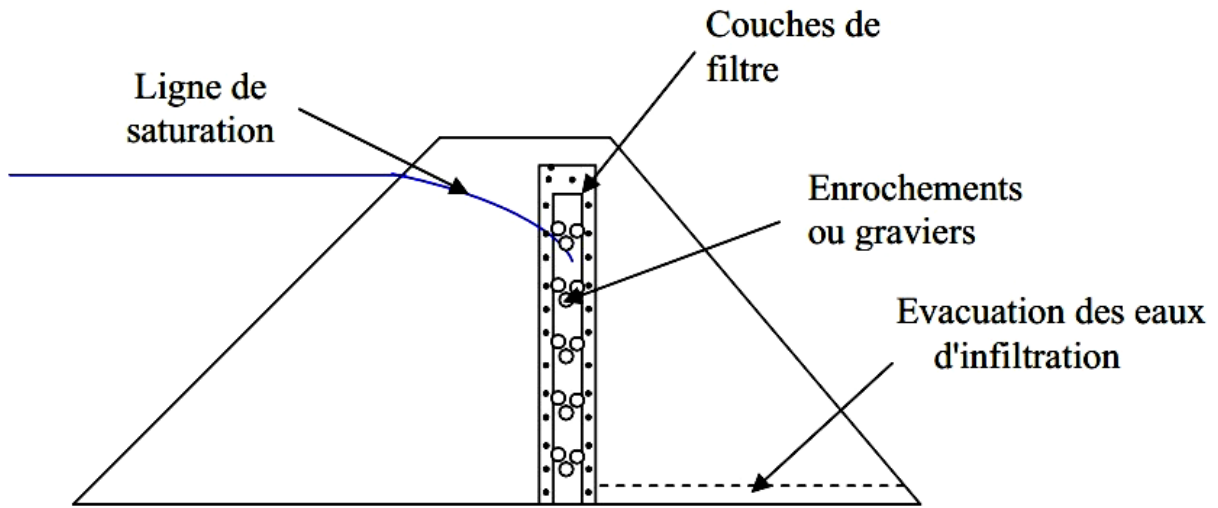


Figure 5. 10 drain vertical

9.2. Drain prismatique

Il est ancré dans l'assise du barrage que les eaux ne contournent pas. Sa hauteur au-dessus de la fondation des drains est généralement de $1/4$ à $1/6$ de la hauteur totale de la digue (voir figure 5.11).

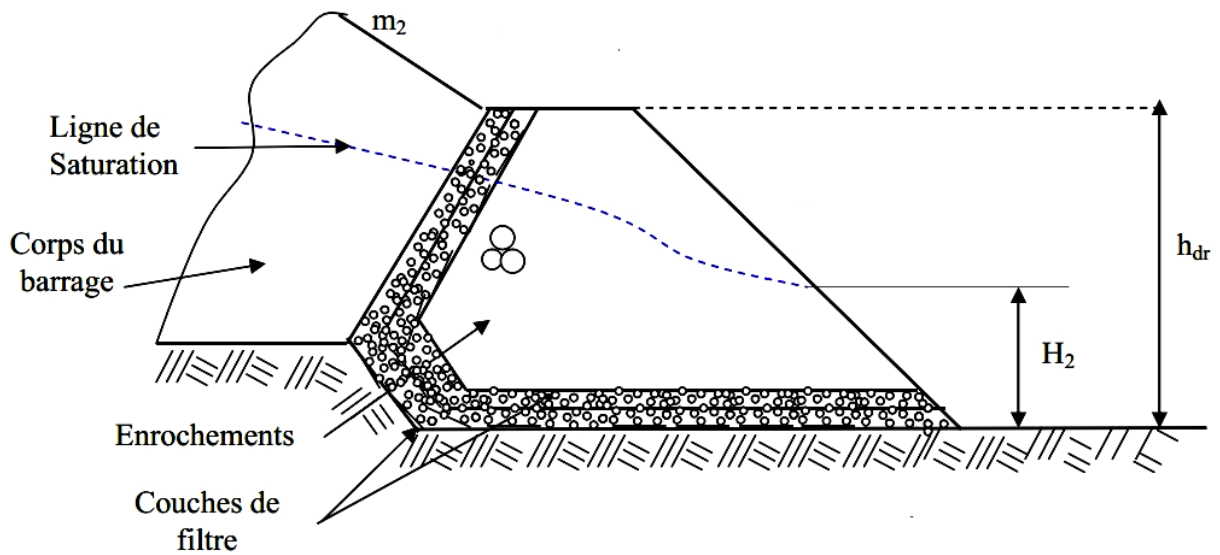


Figure 5. 11 drain prismatique

9.3. Drain horizontal

Il est formé d'un tapis de matériaux drainants d'une épaisseur constante, ce tapis s'étend en sens transversal sur une largeur, à partir du pied aval, de l'ordre de 1/4 à 1/3 de la largeur de la digue (voir figure 5.12).

D'une manière générale le dimensionnement du système de drainage est très lié à l'évaluation de la perméabilité du remblai. Si le dimensionnement du drain est suffisant pour évacuer le débit de fuite, son bon fonctionnement dépend en grande partie du fonctionnement du filtre.

$$q = K \cdot \frac{H \cdot W}{L}$$

Avec :

- K : Perméabilité du matériau du drain
- H : hauteur du drain
- L : Longueur du drain
- W : Epaisseur du drain

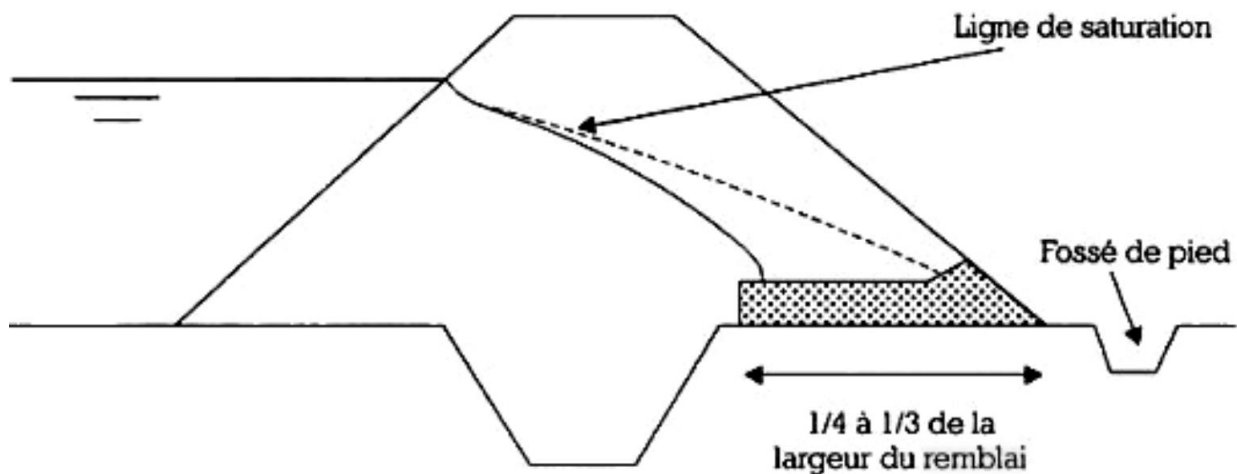


Figure 5. 12 drain horizontal

10. Application

Exercice 1

Soit un barrage en terre constitué d'un massif homogène de perméabilité isotrope k reposant sur un substratum horizontal imperméable (Figure 5.13). On notera h le niveau d'eau dans la retenue, H la hauteur du barrage, bc la largeur du barrage en crête, m_1 la pente du talus amont et m_2 la pente du le talus aval. Pour $h= 17\text{m}$, $H = 20\text{m}$, $bc = 7.5\text{m}$ et $m_1 = m_2 = 12.5\%$, déterminer le point de résurgence de la nappe phréatique à l'aval.

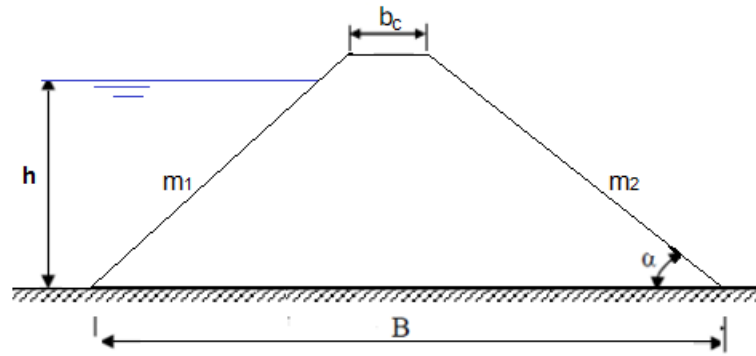


Figure 5. 13 Barrage en terre homogène reposant sur un substratum imperméable

Solution

Point de résurgence de la nappe phréatique

L'angle α que fait le talus aval avec le plan horizontal est $= \tan^{-1}(1/2.5) = 21.8^\circ$. Cet angle est inférieur à 30° par conséquent : $b = OD = \sqrt{h^2 + d^2} - \sqrt{d^2 - h^2 \cot^2 \alpha}$

Avec : $d = 2 H \cot \alpha + bc - 0.7 \cdot h \cdot \cot \alpha$

A.N: $H = 20\text{m}$; $h = 17\text{m}$; $bc = 7.5$; $\alpha = 21.8^\circ$

$d = 2 \times 20 \times \cot 21.8 + 7.5 - 0.7 \times 17 \times \cot 21.8 = 77.75 \text{ m}$

$$OD = \sqrt{17^2 + 77.75^2} - \sqrt{77.75^2 - 17^2 \cot^2 21.8} = 14.48 \text{ m}$$

Exercice 2

Soit un barrage en terre constitué d'un massif homogène de perméabilité isotrope k , reposant sur un substratum horizontal imperméable et muni d'un drain tapis (Figure 5.14). Dans le cas d'un réseau d'écoulement représenté par la figure ci-dessous, calculer le débit d'infiltration drainé par le drain horizontal.

$h = 20\text{m}$, $H = 22\text{m}$, $bc = 7.5\text{m}$ et $m_1 = m_2 = 12.5$, $K = 10^{-5} \text{ m/s}$

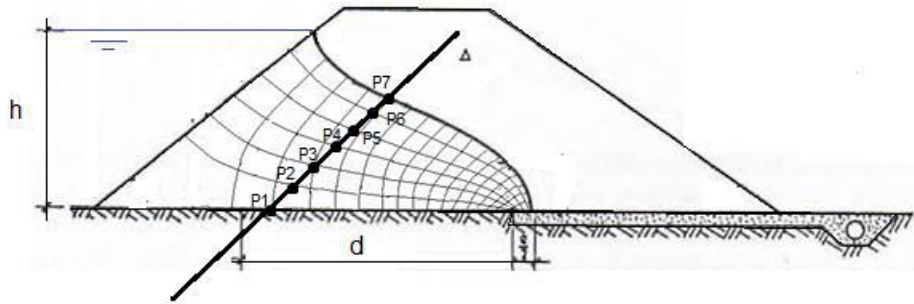


Figure 5. 14 Barrage en terre homogène avec drain horizontal reposant sur un substratum imperméable

Solution

Le débit d'infiltration drainé par le drain horizontal

D'après la figure le nombre d'intervalles des lignes de courant est $n_c=6$, le nombre d'intervalle des lignes équipotentiels est $n_h = 17$.

Le débit total par unité de largeur est : $Q = K \cdot h \cdot \frac{n_c}{n_h}$

$$Q = 10^{-5} \cdot 20 \cdot 6 / 17 = 7.10^{-5} \text{ m}^3/\text{s/ml}$$

Exercice 3 :

Soit un barrage en terre homogène représenté sur la figure 5.15. Trouver le débit de fuite selon la procédure de Pavlovsky ainsi que la valeur de a.

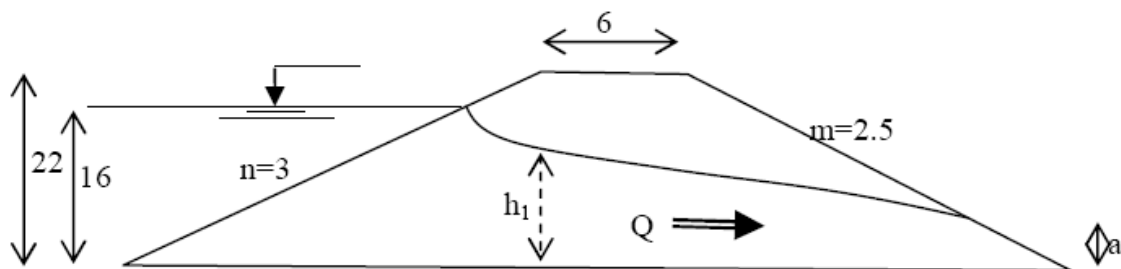


Figure 5. 15 Schéma du barrage sans drain et sans charge avale

$H=22$, $h_e=16$, $n=3$, $m=2.5$, les inconnus sont: $h_1 = ?$, $Q = ?$, $a = ?$

Solution

$$B_1 = 3 \times 22 = 66 \text{ m}$$

$$B_2 = 6 + 2.5(22-a)$$

$$\text{Zone amont : } Q_1 = \frac{k(h_e - h_1)}{n} \ln\left(\frac{H}{H - h_1}\right)$$

$$\text{Zone médiane : } Q_2 = \frac{k(h_1^2 - (h_1 v + a)^2)}{2 B_1}$$

$$\text{Zone aval : } Q_3 = k \frac{a}{m}$$

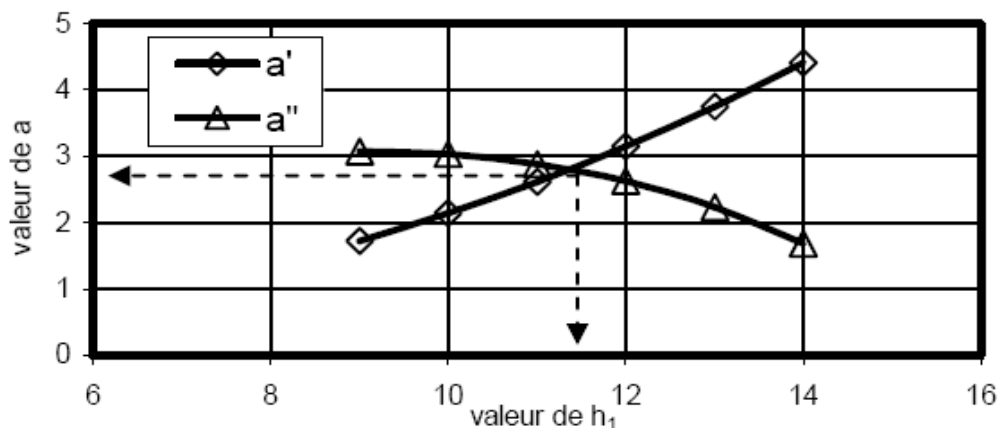
$$Q_2 = Q_3 \rightarrow a' = H + \frac{b}{m} - \sqrt{\left(H + \frac{b}{m}\right)^2 - h_1^2}$$

$$Q_1 = Q_3 \rightarrow a'' = \frac{m}{n} (h_e - h_1) \ln\left(\frac{H}{H - h_1}\right)$$

Avec la résolution de second ordre et dans le tableau : interpolation , deux points p1 et p2 de coordonnées respectives (x1 et x2). L'interpolation est donnée par : $y = p \cdot (x - x_1) + y_1$

Avec la pente p qui s'exprime comme : $p = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$

H	h ₁	h _e	a'	a''
22	14	16	4.4160	1.6860
22	13	16	3.7515	2.2345
22	12	16	3.1548	2.6282
22	11	16	2.6202	2.8881
22	10	16	2.1433	3.0307
22	9	16	1.7205	3.0689
22	11.364	16	2.8079	2.8079



Le débit de fuite :

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 = 1.123 \text{ k}$$

Conclusion

Ce cours a mis en évidence l'existence de quatre types de barrages différents qui sont les barrages poids, les barrages voûtes, les barrages à contreforts et les barrages en terres. Chacun de ces types de barrages a des caractéristiques spécifiques qui les rendent adaptés à des situations géologiques particulières.

Les barrages sont des ouvrages de génie civil conçus pour retenir l'eau et contrôler son écoulement. Ils sont utilisés pour une variété de raisons, notamment pour la production d'énergie hydroélectrique, la régulation des cours d'eau pour l'irrigation et la protection contre les inondations. Cependant, la construction de barrages peut également présenter des risques, tels que la rupture du barrage ou son soulèvement, qui peuvent avoir des conséquences désastreuses pour l'environnement et les populations vivant en aval.

En comprenant les caractéristiques de chaque type de barrage, il est possible de construire des barrages adaptés à la géologie du terrain. En effet, chaque type de barrage est construit en fonction des particularités du terrain, des contraintes environnementales et des contraintes financières associées. En comprenant l'adaptation de la forme des barrages à la géologie du terrain, il est possible de minimiser les risques de rupture ou de soulèvement des barrages.

En conclusion, chaque projet de barrage est unique en raison de la géologie du terrain et des contraintes financières associées. Il est donc essentiel de comprendre les différentes formes de barrages et les particularités de chaque type de barrage pour choisir celui qui conviendra le mieux à chaque situation géologique.

Référence bibliographiques

- [1] Peters, J.J., 2013, cours : LES BARRAGES, consulter le : 04/05/2023 site : <https://docplayer.fr/27527140-Les-barrages-jean-jacques-peters-ingenieur-conseil-professeur-a-temps-partiel-vub-ucl-kul.html>.
- [2] Rhouzlane et Aboulhassane, 2014, cours : barrage, Ecole Hassania des travaux publics, Maroc, site : <https://fr.scribd.com/document/341223380/Cours-Barrage-Rhouzlane-Aboulhassane-2014>, consulter le : 03/05/2023.
- [3] EDF, les différents formes de barrages, site : <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/les-differentes-formes-de-barrages> , consulter le : 03/05/2023.
- [4] Comité Suisse des barrages, les différents types des barrages, site :<https://www.swissdams.ch/fr/les-barrages/les-differents-types-de-barrages>, consulter le : 03/05/2023.
- [5] Scheleiss, A. et Pougatsh, H. 2020, LES BARRAGES : Du projet à la mise en œuvre, Volume 17, Traité de Génie Civil de l'école polytechnique fédérale de Lausanne, Ed. Presse Polytechniques et universitaires Romandes, pp.740.
- [6] comité français des barrages et réservoirs, 2012, technologies des barrages, site : <https://www.barrages-cfbr.eu/Barrages-a-contreforts.html>, consulté le : 20/04/2023.
- [7] Rolley, R., H. Kreitmann, J. Dunglas, A. Pierrejean and L. Rolland (1977). Technique des barrages en aménagement rural. Ministère de l'agriculture, Paris, France.
- [8] Ghodbane, M. 2017, pycopié de cours ouvrages hydrauliques, partie 1 : les barrages, Université de Mohamed BOUDIAF M'sila-Faculté de technologie, Département d'hydraulique. site : https://elearning.univ-msila.dz/moodle/pluginfile.php/544465/mod_resource/content/1/POLYCOPI%C3%89%20D%C3%A9%20COURS%20OUVRAGES%20HYDRAULIQUES%20Les%20barrages%20-%201%C3%A8re%20Partie%20-%20A-.pdf , Consulté le 01/05/2023.
- [9] Lehabab, Z. 2013. Pycopié de cours : Les barrages en remblai de terre, Faculté d'Architecture et de Génie Civil, Département d'Hydraulique, Université d'Oran.
- [10] Le Delliou, P. (2003). Les barrages : conception et maintenance. Ed. Presses Universitaires Lyon, pp.270.