

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZIOUZOU

FACULTE GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention d'un diplôme master en génie civil

Option : *Géotechnique*



Réaliser par : OUANDJELI Amokrane

Dirigé par : Mr. GABI Smail

2017/2018

Remerciement

Avant tous, je remercie Dieu le tout puissant qui ma aidé et donné la volonté et le courage d'entamer et de terminer ce travail.

*Ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de **M GABI Smaïl** qui je remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur, sa disponibilité, ses conseils éclairés et les encouragements durant ma préparation de ce mémoire.*

Je remercie également tous mes professeurs.

Aussi, je me permets d'exprimer tout mon respect aux membres de jury.

Amokrane

Dédicace

Je dédie ce travail :

*Avant tout à mes chers parents qui m'ont soutenue
durant toutes ces années de formation.*

A mes frères et sœurs

A ma famille (Ouandjeli)

*Mes amis (Ali, Kader, Yahia, Sofiane, Mounir,
Abdallah, Djamel)*

A tout la promotion master 2 géotechnique 2017/2018

*Et tout personne qui ont contribué de près ou de
loin à ma formation*

Amokrane

Sommaire

Introduction générale :page01

Première partie : Présentation générale du barrage

CHAPITRE 1 : DEFINITION ET GENERALITE..... page04

1. Définition des barrages : page05
2. Différents types de barrage : page05
3. Facteurs de conception des barrages en terre..... page09

CHAPITRE 2 : PRESENTATION GENERALE DU BARRAGE : page10

1. Présentation du barrage SOUK TLATHA :page11
 - a. Site du barrage :page11
 - b. Géologie du site :page12
 - c. Hydrologie du bassin versant :page16
 - d. Géotechnique du site du barrage :page17
2. Paramètres géotechniques des matériaux utilisés pour la construction du barrage :page21

Conclusionpage23

Deuxième partie : Etude et lutte contre les infiltrations dans les digues et barrages en terre

CHAPITRE 3 : GENERALITE SUR LES ECOULEMENTS ET LES INFILTRATIONS DE L'EAU..... page25

1. Introduction :page26
2. Définition des infiltrations : page26
3. Facteur influençant sur les infiltrations :page26
4. Définition des écoulements : page26
5. Différents types d'écoulement : page26

L'écoulement de surface..... page26

L'écoulement de subsurface..... page26

6. Règles d'écoulement et mesure de perméabilité page27
 - a. Définition de la loi de darcypage27

- b. Le principe de la loi de Darcypage27
 - c. La perméabilité et mesure de perméabilité..... page28
 - Définition :page28
 - Mesure de perméabilité :page29
- Essai au laboratoire..... page29
 - Permeametre a charge constante :page29
 - Permeametre a charge variablepage31
 - Essai in-situpage31

CHAPITRE4 : LES ALEAS ET RISQUES SUR LES BARRAGES ET DIGUES EN TERRE
.....page33

- 1. Introduction.....page34
- 2. Définition de l'aléa et risque..... page34
- Aleapage34
- Risque..... page34
- 3. Alea et risque qui cause la rupture des barragespage34

CHAPITRE 5 : LES RISQUES DES INFILTRATION DANS LES BARRAGES ET LES DIGUES EN TERRE..... page39

- 1. Introduction :page40
- 2. Définition de l'érosion interne :page41
- 3. La boullancepage43

CHAPITRE6 : LUTTE CONTRE LES INFILTRATION ET ETANCHEISATION DANS LES BARRAGES..... page46

- 1. Introduction :page47
- 2. Dans le corps du barrage :page47
 - a) Noyaux aux matériaux argileux..... page47
 - b) Noyaux en béton bitumineuxpage47
 - c) Masque amontpage48
- Masque en béton de cimentpage48
- Masque en béton bitumineuxpage49

• Masque en acier	page49
• Masque en enrochement	page49
• Masque en membrane souple	page50
3. Dans les fondations du barrage :	page50
a. Clé d'étanchéité (parafouille) :	page51
b. Paroi moulée :	page51
c. Tapis d'étanchéité amont	page52
d. Traitement des fondations des barrages avec injection	page52
Types d'injection :	page53
Traitement pour l'étanchéisation du barrage de souk telatha :	page53
a. Corps du barrage :	page53
• Enrochement amont (rip-rap)	page53
• Filtres et drains :	page54
• Noyau :	page55
Caractéristiques des matériaux pour les noyaux :	page56
• Recharge amont et aval	page56
Protection de la partie amont :	page56
Protection de la partie aval :	page56
b. Fondation du barrage	page57
• Introduction :	page57
• Traitement par injection :	page57
• Objectif de l'injection :	page57
• Faisabilité de l'injection	page58
• Durabilité de traitement par injection	page58
Partie 3 : Modélisation numérique des infiltrations dans le barrage	
CHAPITRE 7 : MODELISATION NUMERIQUE	page60
Introduction :	page61
Présentation de plaxis 2D :	page61
Modèle utilisé pour la modélisation de la digue :	page62
• Comportement drainé.....	page63
• Comportement non drainé.....	page63
• Modèle de Mohr Coulomb.....	page64

- Le module d'Youngpage65
- Le coefficient de Poissonpage65
- L'angle de frottement..... page65
- La cohésionpage65
- L'angle de dilatance..... page65
- Maillage..... page66
- Conditions initiales :page66
- Résultat obtenue après calcul : page67
- a. Les pressions interstitielles pour différents niveaux de remplissage : page68
- b. éveloppement du degré de saturation pour différent niveaux de remplissage :
..... page69
- c. Interprétation des résultats : page71
- Conclusion générale :page72
- Bibliographie :page73

Liste des figures :

Première partie

Figure 1.1 : Schéma d'un barrage poids en béton

Figure 1.2 : Barrage voute

Figure 1.3: Organigramme des différents types de barrages en béton

Figure 1.4 : Schéma d'un barrage en terre homogène

Figure 1.5 : Schéma d'un barrage en terre a noyau étanche

Figure 1.6 : Barrage en enrochement

Figures 1.7: Organigramme des différents types de barrages en terre

Figure 2.1 : Situation générale du barrage et du réservoir

Figure 2.2 : Vu générale sur le site du barrage

Figure 2.3 : Carte géologique du réservoir

Figure 2.4: Carte géologique et structurale du site du barrage principal

Deuxième partie

Figure 3.1 : Principe de la loi de darcy

Figure 3.2 : Variation du coefficient de perméabilité k selon le type de sol

Figure 3.3 : Perméamètre à Charge constante

Figure 3.4 : Perméamètre à charge variable

Figure 3.5 : Schéma représentatif de l'essai Lefranc

Figure 5.1 : Phénomènes de boulangance

Figure 5.2 : développement de l'érosion interne

Figure 5.3 phénomène d'érosion interne

Figure 6.1 : Barrage a noyau au matériaux argileux

Figure 6.2 : Barrage a noyaux en béton bitumineux

Figure 6.3 : Barrage a masque amont en béton de ciment

Figure 6.4 : Barrage a masque en béton bitumineux

Figure 6.5 : Barrage a masque en enrochement

Figure 6.6 : Barrage a masque en membrane souple

Figure 6.7 : Imperméabilisation des fondations de barrage avec mur parafouille

Figure 6.8 : Traitement des fondations de barrage avec paroi moulée

Figure 6.9: Tapis d'étanchéité amont

Figure 6.10 : Injection dans les fondations de barrage

Troisième partie

Figure 8.1 : réglages généraux du projet

Figure 8.2 : Réglages généraux des dimensions

Figure 8.3 : Géométrie du barrage

Figure 8.4 : Définition de l'état de comportement du sol des différentes couches

Figure 8.5 : Différent paramètres du modèle de comportement de Mohr Coulomb

Figure 8.7 : Géométrie après maillage

Figure 8.6 : Géométrie du barrage après introduction des différentes couches

Figure 8.7 : Géométrie après maillage

Figure 8.8 : géométrie après génération des conditions initiales

Figure 8.9 (a-g) : variation des pressions interstitielles pour différents niveaux de remplissage

Figure 8.10 (a-g) : Développement du degré de saturation pour différent niveaux de remplissage

Liste de tableaux :

Tableau 2.1 : Valeurs des caractéristiques générales du bassin versant

Tableau 2.2 : Valeurs des paramètres de classification géotechniques des colluvions argileuse

Tableau 2.3: Valeurs des paramètres de compactage A.A.S.H.O. Standard

Tableau 2.4 : Valeurs des paramètres des Caractéristiques œdométriques

Tableau 2.5 : Valeurs des paramètres caractéristiques de résistance au cisaillement :

Tableau 2.6 : Valeurs des paramètres de classification géotechniques des alluvions graveleuses

Tableau 2.7 : Valeurs des paramètres de compactage A.A.S.H.O. Standard pour alluvions graveleuses

Tableau 2.8 : Valeurs des paramètres caractéristiques de résistance au cisaillement pour alluvions graveleuses

Tableau 2.9 : Valeurs des paramètres de classification géotechniques des Grès burdigaliens

Tableau 2.10 : Valeurs des paramètres de résistance des Grès burdigaliens

Tableau 2.11 : Valeurs des paramètres de classification géotechniques des petites altérées

Tableau 2.12 : Valeurs des paramètres de compactage A.A.S.H.O. Standard pour petites altérées

Tableau 2.13 : Valeurs des paramètres caractéristiques de résistance au cisaillement pour petites altérées

Tableau 2.14 : Valeurs des paramètres de classification géotechniques des poudingues pliocènes

Tableau 2.15 : Valeurs des paramètres de compactage A.A.S.H.O. Standard pour poudingues pliocènes

Tableau 2.16 : Caractéristiques géotechniques des matériaux utilisés pour la construction de la digue

Tableau 4.1 : Exemples de barrages perdus à cause de différents risques

Tableau 5.1 : Pourcentage des pertes selon le mode d'endommagement

Tableau 6.1 : Dimension des blocs de rip rap et leurs épaisseurs en fonction de la hauteur des vagues

Tableau 8.1 : Valeurs des pressions interstitielles pour différents niveaux de remplissage

Notations principales :

A : valeurs des apports

A_m : altitude moyenne

C : cohésion

C_c : indice de compression

C_g : indice de gonflement

D : densité relative

E : module de Young

H : hauteur

HM : hauteur maximale

Hm : hauteur minimale

i : gradient hydraulique

i_c : gradient hydraulique critique

I_p : indice de plasticité

K : coefficient de perméabilité

L : longueur

LT : longueur du rectangle équivalent

P : périmètre

Q : débit

S : surface

S_v : surface versante

T : temps

U : pression interstitielle

V : volume

W_n : teneur en eau naturelle

W_L : limite de liquidité

W_{opp} : teneur en eau optimum

γ_d : poids volumique sec

γ_h : poids volumique humide

γ_s : poids volumique des grains

γ_{sat} : poids volumique saturé

v : coefficient de poisson

φ : angle de frottement interne

σ_c : résistance a la compression

σ_{c10j} : résistance a la compression a 10 jours d'immersion

φ : angle de dilatance

ΔH : différence de charge

ΔL : différence de longue

Introduction générale :

L'eau, ressource indispensable à la vie, existe en très grandes quantités sur la terre et représente 3/4 du globe terrestre. Bien alors que, l'eau douce destinée à l'utilisation quotidienne (eau potable ; irrigation ...), représente un pourcentage très faible. Cette eau douce se trouve généralement dans les nappes, en profondeur, et à l'état solide, gelée dans les pôles, et en surface dans les lacs et les cours d'eau.

Parmi les moyens utilisés pour l'exploitation de ces eaux, les barrages sont les plus utilisés.

L'existence des barrages remonte à 2900 ans av J.C. Dans le monde actuellement, il existe plus de 36000 barrages, leur construction a évolué à travers le temps et avec le développement du génie civil, la capacité de retenue des barrages a augmenté et cela revient à la croissance démographique de la population à travers le monde.

En Algérie, il existe 75 barrages en service et d'autres en construction ; ce qui fait une réserve de 12 milliards de m³ d'eau à travers le territoire national.

Ces infrastructures (barrages et digues en terre) rencontrent plusieurs problèmes, envasement, problèmes de stabilité, érosion interne ... Ces problèmes sont causés généralement par les infiltrations et les fuites dans le corps du barrage et aussi dans les fondations.

Tenant compte de ces deux phénomènes préjudiciables infiltrations et fuite, notamment pour les fondations des barrages, ces derniers nécessitent des techniques pour les éliminer. Les techniques de traitement des fondations des barrages disponibles aujourd'hui sont nombreuses, et font partie des techniques d'amélioration des sols. Les plus usuelles sont les parois étanches, l'injection et le drainage.

L'apport de ces nouvelles technologies est capital pour améliorer les caractéristiques hydrauliques et mécaniques des fondations.

Ce présent travail s'intéresse au barrage de Souk Tleta qui est en phase de construction sur l'Oued Bougdoura dans la wilaya de Tizi-Ouzou

Introduction

- Première partie :

Présentation générale du barrage

- Deuxième partie :

Etude et lutte contre les infiltrations dans les digues et barrages en terre

- Troisième partie :

Modélisation numérique des infiltrations dans le barrage

Partie 1

Présentation générale du barrage

Chapitre 1 :
Définitions et généralités

1. Définition des barrages :

Les barrages sont des ouvrages hydrauliques implantés sur la largeur d'un cours d'eau créant une cuvette géologiquement étanche qui permet de stocker un volume d'eau pour les différents besoins et utilisation comme :

- + Alimentation en eau potable
- + Irrigation des terres
- + Production de l'électricité
- + Protection contre les crues
- + Besoins industriels (refroidissement, lavage)
- + Navigation et sports nautique

Les barrages sont constitués de plusieurs sous ouvrages tel que l'évacuateur de crues, La prise d'eau, vidange de fond, réseau de drainage...

2. Différents types de barrage :

Il existe plusieurs types de barrages et on peut les classer en 2 classe principales

- a) **Barrages rigides** : Les barrages en béton ou maçonnerie autorisent des formes qui tiennent compte de la qualité du sol de fondation et de la forme de la vallée.

- + Barrages poids en béton

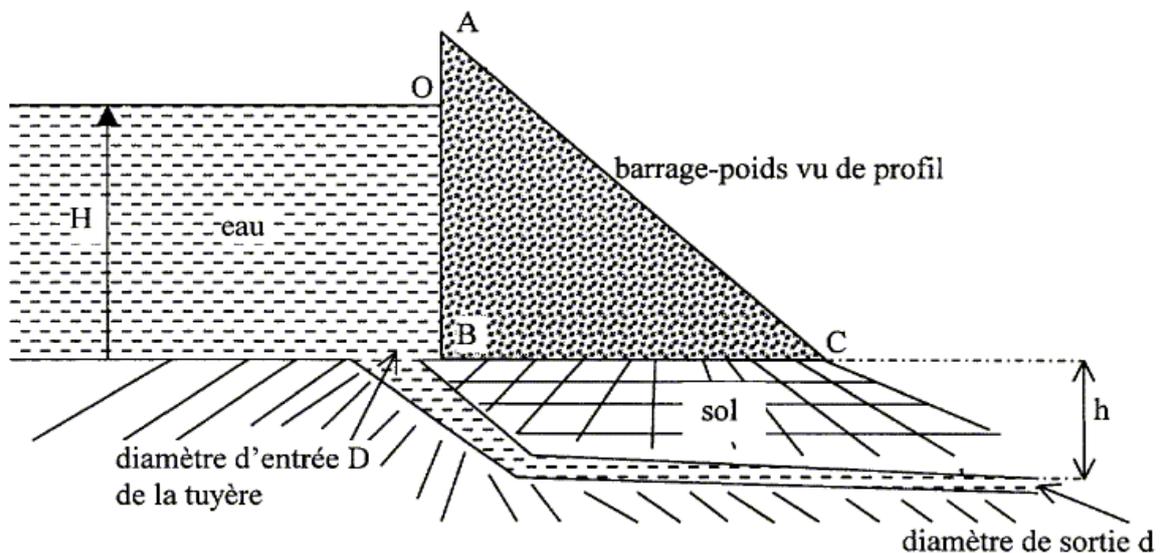


Figure 1.1 : Schéma d'un barrage poids en béton

- + Barrages poids en béton évidé
- + Barrage voute
- + Barrages contre forts ou a voutes multiples

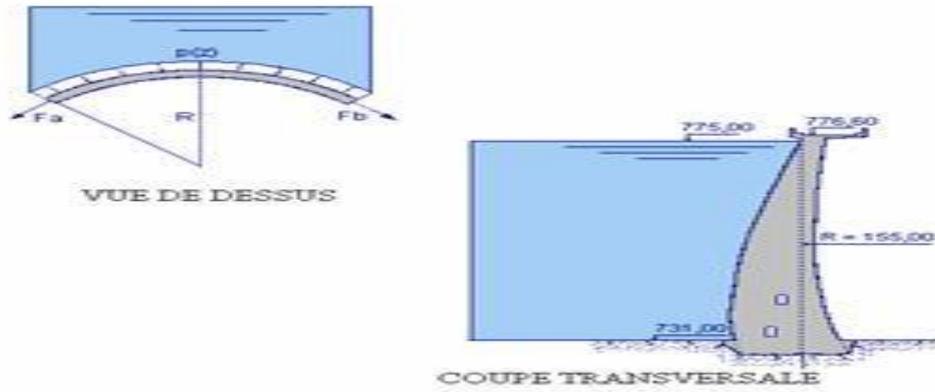


Figure 1.2 : Barrage voûte

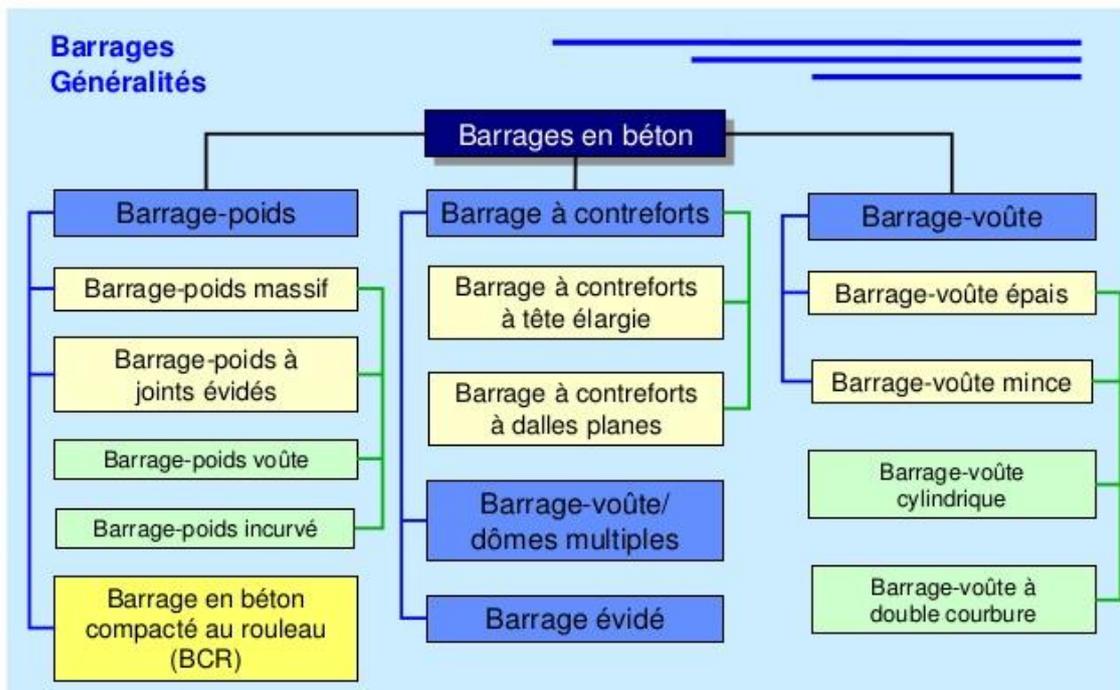


Figure 1.3: Organigramme des différents types de barrages en béton

- b) **Barrages souples** : Les barrages en terre ou en remblai sont construits essentiellement par le sol (meuble ou enrochement). Les matériaux assurent la stabilité, la résistance et l'étanchéité du barrage

 Barrages en terre homogène

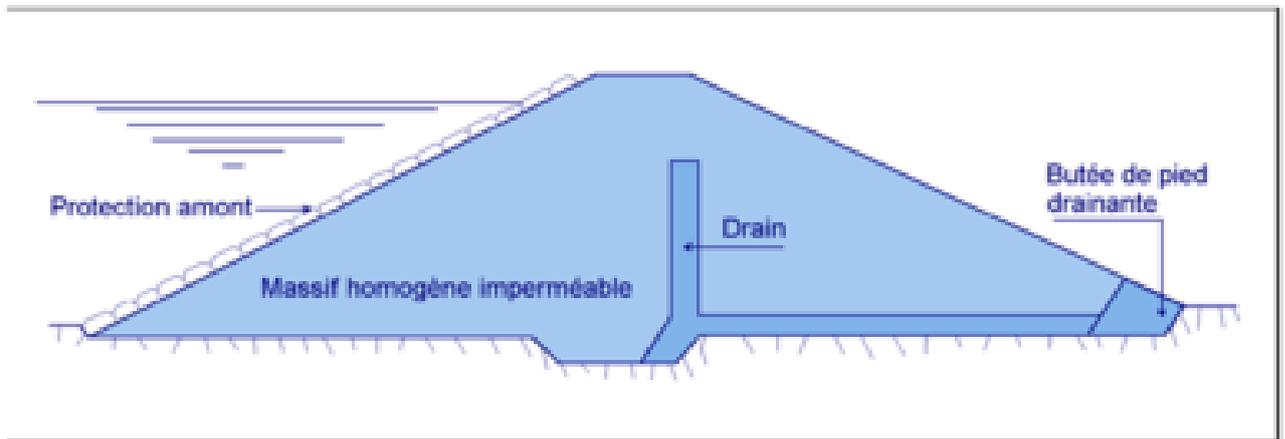


Figure 1.4 : Schéma d'un barrage en terre homogène

 Barrages en terre zonée

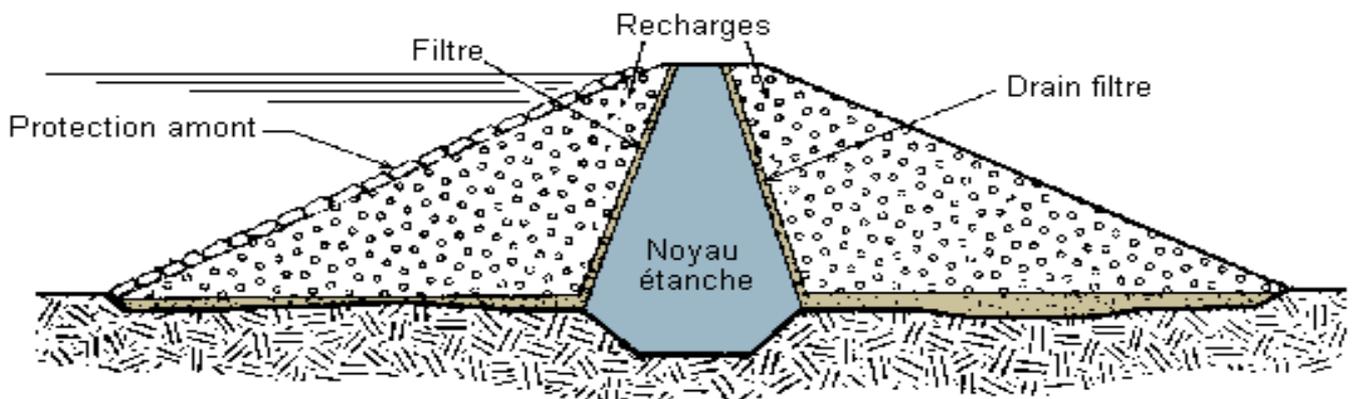


Figure 1.5 : Schéma d'un barrage en terre a noyau étanche

 Barrages en enrochement

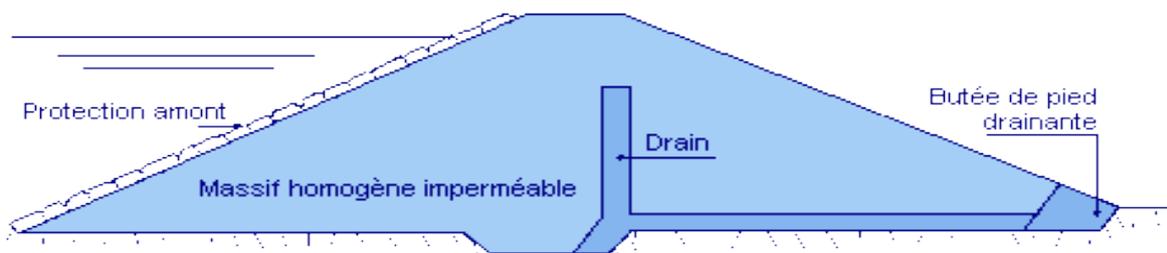
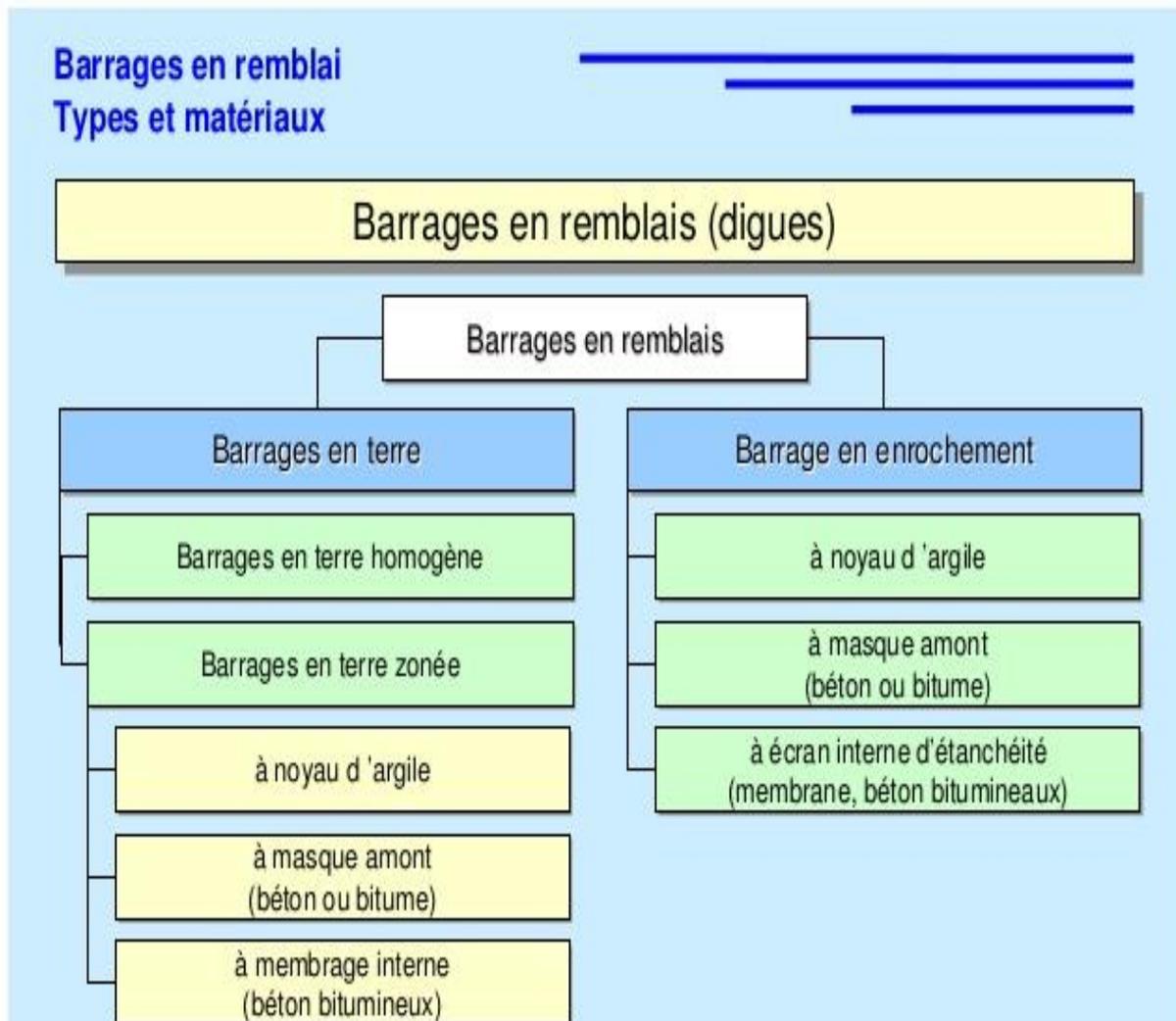


Figure 1.6 : Barrage en enrochement



Figures 1.7: Organigramme des différents types de barrages en terre

3. Facteurs de conception des barrages en terre

Les facteurs d'influence de la conception et la réalisation des barrages en terre, sont :

-  Hydrologie,
-  Géologie,
-  Matériaux disponibles,
-  Caractéristiques de la fondation,
-  Climat,
-  Caractéristiques du site de l'ouvrage,
-  Déviation de la rivière pendant la réalisation (dérivation provisoire),
-  Action des vagues,
-  But de l'ouvrage,
-  Délais de réalisation,
-  Séismicité

*Chapitre 2 : présentation générale
du barrage*

1. Présentation du barrage Souk-Tleta :

Le site du barrage projeté est situé sur l'Oued Bougdoura en aval du confluent de l'Acif Tlata et de la Tala Imedrane a 8 km au Sud de Draa Ben Khedda.

Le barrage sera réalisé par une digue en matériaux meubles qui aura une hauteur de 95 m environ au-dessus de la fondation du noyau central étanche. Au niveau de la retenue normale (RN.) fixée à 122.00 NGA la cuvette retiendra 89.5 millions de m³.

Une digue de col, haute environ 20 m, sera réalisée pour barrer la dorsale en rive gauche. (LOMBARDI ENGINEERING)

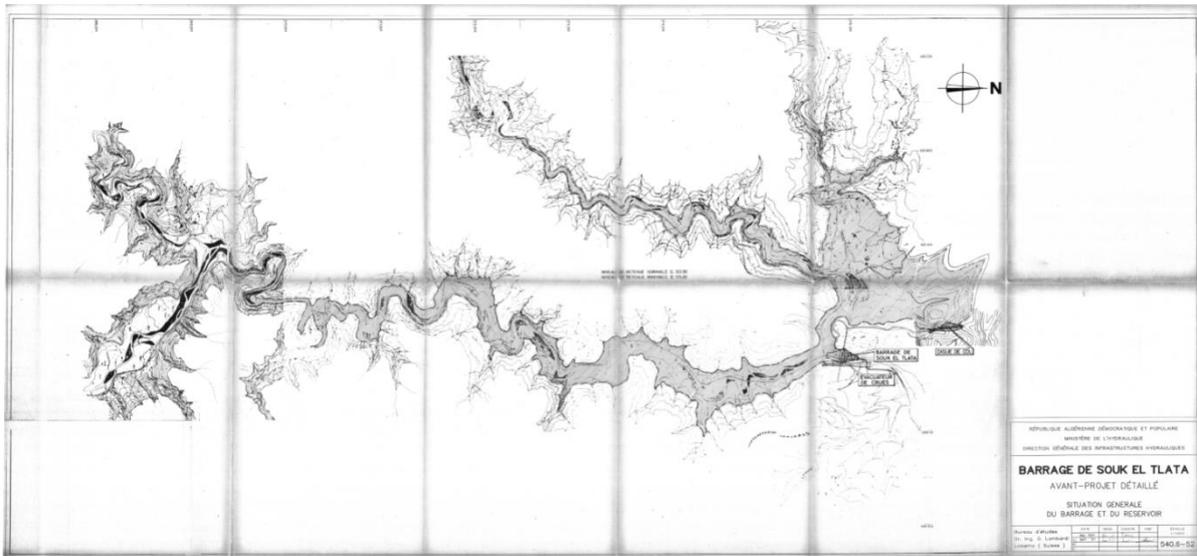


Figure 2.1 : Situation générale du barrage et du réservoir

e. Site du barrage :

Le site du barrage Souk-Tleta sur l'Oued Bougdoura se situe à l'extrémité occidentale de la Grande Kabylie a 8.5 km de Tizi Ouzou 80 km environ a vol d'oiseau d'Alger dans la direction est .

Le réservoir sera constitué essentiellement par deux branches formées par les vallées de l'Acif Tlata et du Tala Imedrane respectivement, qui confluent tout en amont du barrage. Après la confluence, l'Oued Bougdoura tourne a Sud de 120° environ et continue en direction Est, s'engageant dans une gorge, qui a une longueur de quelques centaines de mètres.

C'est celle-ci la gorge choisie pour établir le barrage. Cette gorge est également empruntée par la route reliant Draa Ben Khedda a la RN 25.

Le fond de la rivière est situé approximativement au niveau 65 m NGA et présente en son endroit le plus étroit une largeur d'environ 50 m. Les flancs de la vallée montent jusqu'au niveau 150 m NGA

La largeur de la vallée, a la cote du sommet du barrage, est de 200 m environ.(LOMBARDI ENGINEERING)



Figure 2.2 : Vue générale sur le site du barrage

f. Géologie du site :

Le site de souk Tlata se trouve sur le bord méridional du bassin sédimentaire du miocène inférieur terminal de Tizi Ouzou. Ce bassin formé par une série épaisse de dépôts gréseux, et marneux, appartient à l'ancien golf miocène de la basse Kabylie, qui est la terminaison orientale du grand bassin sédimentaire de la Mitidja Les zones repérées sont situées d'après la description suivante :

- **Colluvions argileuses :**

Cinq zones possibles pour les carrières existent, à l'amont du site du barrage, à une distance de 3 à 9 km, sur les rives de l'Acif Tlata Imdrane, de l'Acif Tlata et de l'Oued Tlata.

Les Colluvions argileuses sont des produits éluviaux des phyllades paléozoïques, remaniées par les mouvements de masse de la couche superficielle. Généralement de granulométrie fine, englobant toutefois de débris rocheux, ces dépôts présentent une plasticité et une consistance moyenne et occupent des surfaces importantes

- **Alluvion graveleuse**

Un possible dépôts est situé en aval du site du barrage, à 0.5 km environ de distance et intéresse les alluvions du lit mineur et majeur de l'Oued Bougdoura. En surface, ces alluvions sont constituées d'un tout-venant grossier. Les graviers sous adjacents passent fréquemment à du sable comportant plus ou moins d'éléments fins. Le terrain semble être assez homogène. Du point de vue pétrographique, les éléments, généralement arrondis ; sont constitués par :

- gneiss et Q-pegmatiques 43% ;
- Calcaire 26% ;
- Micaschistes 22% ;
- Grés 6%.

Ces matériaux peuvent être utilisés pour les recharges du barrage mais devront être exploités par dragline en dessous de la nappe phréatique ; ils ne sont pas recommandables comme agrégats à béton en raison de la présence de micaschiste et de phyllade ainsi que de quartz microfissure (pegmatites) ; par contre, ils sont utilisables pour les transitions et pour les filtres s'ils sont sélectionnés et encore mieux s'ils sont corrigés par l'adjonction d'éléments de quartz de carrière.

- **Grés burdigaliens**

La zone à utiliser est située dans le versant de la rive droite de l'Oued Bougdoura, au droit du site du barrage. Ces sédiments sont largement présent / dans la zone du barrage et constituent en fait la roche de fondation des appuis de l'ouvrage. Il s'agit de grés fins, bien classés, tendres à mi-durs, à ciment carbonatiques (sidérose) ; de couleur ocracée à grisâtre ; localement, ils présentent des intercalations organogènes relativement importantes. Les grés miocènes peuvent être exploités comme pierres de maçonnerie ; à cause de leurs faible densité et résistance à la compression, ils ne peuvent pas être prévus pour des recharges enrochement ou pour le perré ;ils pourraient toutefois être employés sous forme de grés désagrégé comme recharge d'un barrage.

- **Pelites altérés**

La zone de ces matériaux occupe une surface très étendue, entre les vallées de l'Oued Agergoun et de l'Oued Bougdoura ; les matériaux y présentent des caractéristiques assez

homogènes. Affleurant sur les versantes de rive gauche de l'Oued Agergoun, ces argiles sont le produit éluvial plus ou moins remanié des pélites grises, feuilletées à schisteuses de la formation burdigaliens. L'épaisseur de la couche éluviale est de 6m environ, mais au-dessous, les pélites sont encore fortement altérées jusqu'à une profondeur de l'ordre de 10m. Ces sols ne sont pas facilement utilisables comme matériaux pour noyau du barrage, car ils présentent une teneur en carbonates élevée, ce qui comporte un risque sensible de microfissuration en cas de retrait.

- **Les Poudingues pliocènes**

Ils occupent une surface d'une vingtaine d'hectares sur la colline du versant de rive gauche de L'Oued Bougdoura, et remplissent une large vallée, d'une centaine de mètres de profondeur. Après quelques mètres de couverture éluviale (en moyenne 3.8m), des alluvions graveleuses ont été traversées, prises dans une matrice limon-argileuse, à densité relativement élevée et présentant un degré de cimentation très variable. Le conglomérat se présente, néanmoins, parfois avec une matrice plus détritique et parfois, à la grande profondeur, avec des caractéristiques semblables à celle du béton, ce qui pourrait être interprété aussi comme un bloc isolé de conglomérat de la série de base de la formation gréseuse burdigaliens. Du point de vue pétrographique, les éléments, généralement sphériques ; sont constitués par : - gneiss et Q-pegmatiques 58% ; -Calcaire 3% ; -Micaschistes 30% ; -Grès 1% ; -boules d'argile verte 8%. La zone du site du barrage offre des gisements importants de poudingues, qui pourraient être employés pour les recharges.

- **Calcaire d'Assi Youcef**

A 35 km de distance du site du barrage, au sud de boghni, se trouve une grande carrière avec une station de concassage en service. Le gisement se trouve au pied septentrional de la chaîne calcaire du djurdjura. Le Karst a altéré le rocher jusqu'à une profondeur de 5 à 10 m.

Sur la base de l'intensité de fissuration, on peut évaluer le volume moyen des polyèdres à 0,45 m³, ce qui a pu être constaté aussi sur les blocs présents en carrière. Ces matériaux, blocs sélectionnées, peuvent être exploités pour le perré de protection de la recharge amont du barrage, tandis que le tout-venant peut constituer le lit de pose des susdits enrochements.(LOMBARDI ENGINEERING)

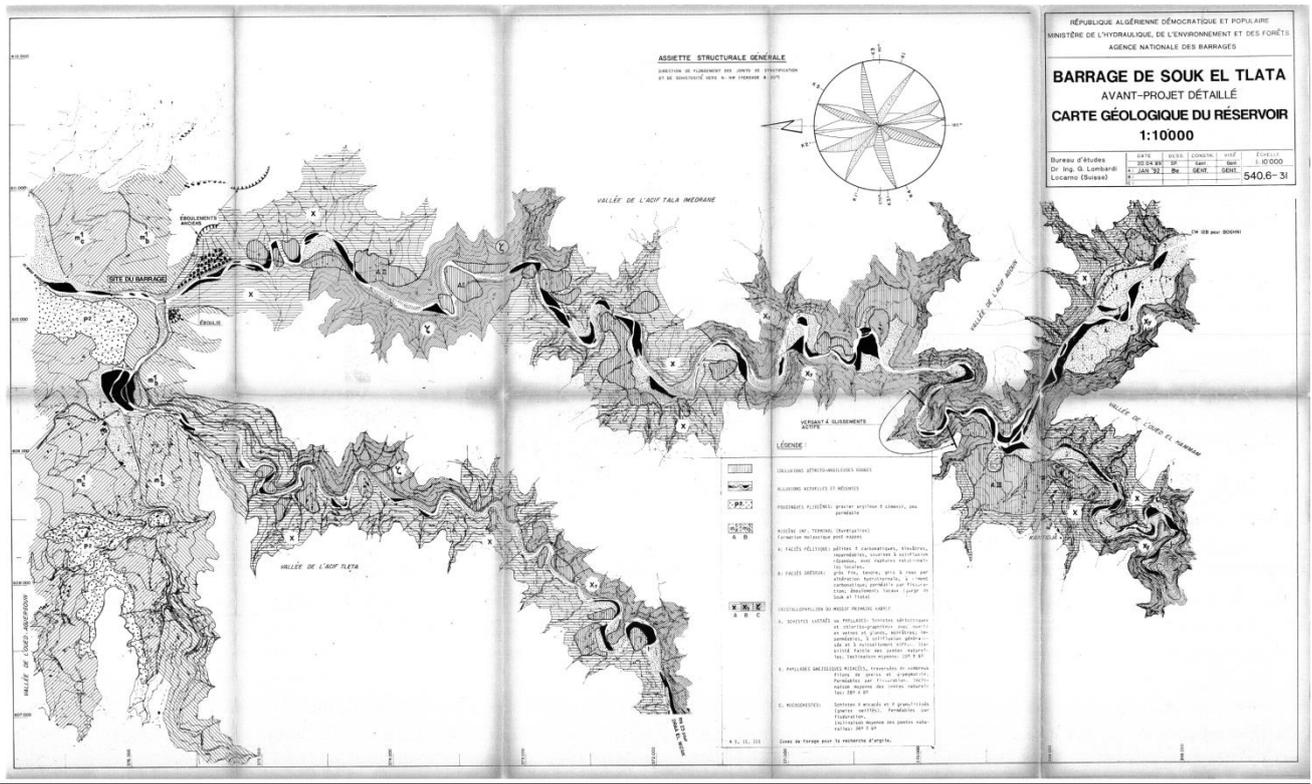


Figure 2.3 : Carte géologique du réservoir

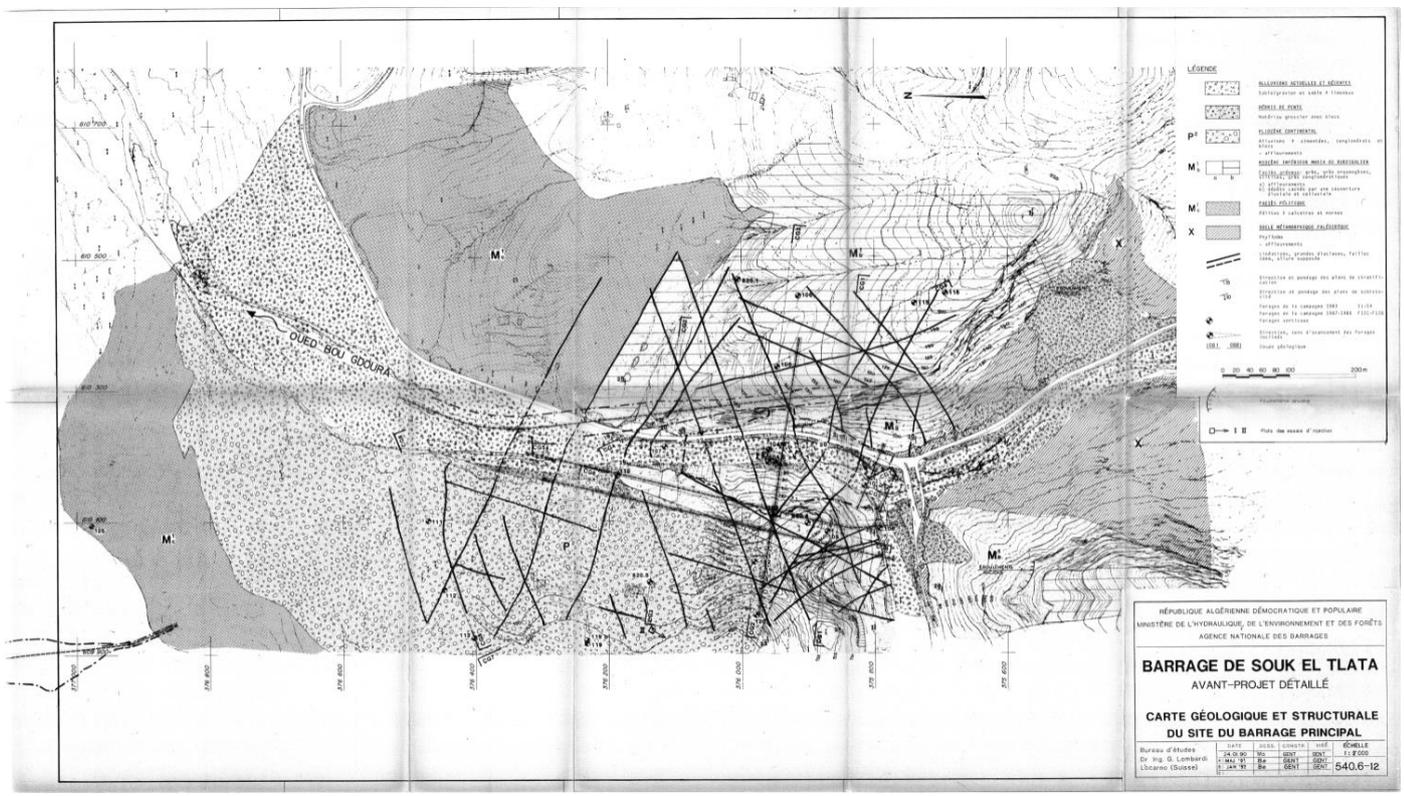


Figure 2.4: Carte géologique et structurale du site du barrage principal

g. Hydrologie du bassin versant :

L'Oued Bougdoura est un affluent de l'Oued Sebaou et se trouve dans le bassin versant de ce cours d'eau. Des études on donner les résultats suivants sur le bassin versant :

Tableau 2.1 : Valeurs des caractéristiques générales du bassin versant

Paramètres	Valeurs
Surface versante	$S_v = 465 \text{ km}^2$
Périmètre	$P = 100 \text{ k}$
Indice de compacité (bassin circulaire $C = 1$)	$I_c = 1.31$
Longueur du rectangle équivalent	$LT = 33 \text{ km}$
Altitude maximale	$HM = 2164 \text{ m}$
Altitude minimale	$H_m = 64 \text{ m}$
Altitude moyenne	$A_m = 529 \text{ m}$
Module pluviométrique	550 mm/an
Module de l'apport annuel	150 hm^3

Les calculs des apports sont basés sur des séries de mesures journalière effectuées aux stations de jaugeage. Ces séries, allant de 1945 à 1980, vu la petite quantité de mesures directes, à l'aide de corrélations avec d'autres stations ne faisant pas partie du bassin du Sebaou pour lesquelles les données s'étaient plus complètes.

On a obtenu, pour les valeurs des apports a Souk el Tlata,

$$A = 150 \text{ hm}^3/\text{an.}$$

En ce qui concerne le débit solide, le Bureau d'Etudes a adopté les valeurs maximums trouvées dans les études munies.

En adoptant la valeur de $0.37 \text{ hm}^3/\text{an}$ pour le module du transport solide, on peut prévoir le comblement du volume mort en 35 ans environ. Le calcul de régularisation s'est fait sur la matrice des apports au barrage étudié, et s'étend sur la série de 35 années.

L'évaporation a été calculée à l'aide de la formule de Conti, qui donne une valeur de 1620 mm/an. On a prévu une tranche morte (12 hm³) qui détermine le niveau d'exploitation minimum.

En répétant le calcul pour différentes capacités, on a pu établir celle qui est nécessaire pour satisfaire aux critères de garantie fixes par l'Administration

Il ressort que pour Souk el Tlata la demande totale en eau potable de 98 hm³ est garantie 32 années sur 35 avec un réservoir d'une capacité utile de 77.5 hm³, ce qui correspond à un niveau d'exploitation normal de 122 m NGA, tel qu'il est prévu dans le projet.

Les crues ont été calculées à partir d'une interpolation des crues observées aux stations de jaugeage (LOMBARDI ENGINEERING)

h. Géotechnique du site du barrage :

- **Caractéristiques géotechniques essentielles Colluvions argileuses**

- **Paramètres de classification :**

Tableau 2.2 : Valeurs des paramètres de classification géotechniques des colluvions argileuse

Paramètres	Valeurs
Granulométrie, fraction < 2 micron	11 ± 4%
Limites et indices de consistance	W_L = 35.36 I_p % = 16.6 ± 5
Activité colloïdale	1.56 ± 0,9

- **Paramètres de compactage A.A.S.H.O. Standard:**

Tableau 2.3: Valeurs des paramètres de compactage A.A.S.H.O. Standard

Paramètre	Valeurs
Densité sèche optimum	t/m³: γ_d = 1.83 ± 0.05
Teneur en eau optimum	%: w_{opp} = 14.7 ± 1.6

➤ Paramètres mécaniques des échantillons compacts a w optimum

Tableau 2.4 : Valeurs des paramètres des Caractéristiques œdométriques

Paramètre	Valeurs
Indice de compression	Cc = 0.15 ± 0.03
Indice de gonflement	Cg = 0.018 ± 0.007
Coefficient de perméabilité k entre	k= 4x 10⁻⁵ cm/s

Tableau 2.5 : Valeurs des paramètres caractéristiques de résistance au cisaillement:

Paramètre	Valeurs
Essai triaxial CU+U	kg/cm²: c' = 0.35 a 0.55 φ = 18 a 19°

• **Caractéristiques géotechniques Alluvions graveleuses de l'Oued Bougdoura**

➤ Paramètres de classification

Tableau 2.6 : Valeurs des paramètres de classification géotechniques des alluvions graveleuses

Paramètre	Valeurs
Granulométrie, fraction < 0.06 mm	%:8 a 23
Densité relative naturelle	D=0.59 ± 0.2

Tableau 2.7 : Valeurs des paramètres de compactage A.A.S.H.O. Standard pour alluvions graveleuses

Paramètre	Valeurs
Densité sèche optimum	t/m³: γd = 2.13 ± 0.03
Teneur en eau optimum	%: w_{opp} = 7.3 ± 0.5

➤ **Paramètres mécaniques des échantillons compacts a w optimum**

Tableau 2.8 : Valeurs des paramètres caractéristiques de résistance au cisaillement pour alluvions graveleuses

Paramètre	Valeurs
Essai triaxial consolidé et drainé (CD)	kg/cm²: c' = 0

• **Caractéristiques géotechniques des Grès burdigaliens**

➤ **Paramètres de classification**

Tableau 2.9 : Valeurs des paramètres de classification géotechniques des Grès burdigaliens

Paramètre	Valeurs
Granulométrie, fraction <0,06 mm	30 a 68%
Limites et indices d'Atterberg	W_L = 27.4 % I_P = 12.2

Paramètre	Valeurs
Teneur en carbonates, à l'exclusion des lithotypes organogènes	13.7 ± 6.5%
Désagrégation après 70 j. d'immersion	0

➤ **Paramètres de résistance**

Tableau 2.10 : Valeurs des paramètres de résistance des Grès burdigaliens

Paramètre	Valeurs
Résistance a la compression simple	kg/cm²: σ_c = 102 ± 45
Idem, après 10j d'immersion	kg/cm²: σ_{c10j} = 80 ± 38

Remarque :

Les résultats des essais de compression simple sur carottes en conditions naturelles ou après 10 jours d'immersion en eau présentent une forte dispersion. Il faut s'attendre à ce qu'une bonne partie des blocs de roche puisse se désagréger après le compactage du tout-venant gréseux.

- **Caractéristiques géotechniques des Petites altérées**

- **Paramètres de classification**

Tableau 2.11 : Valeurs des paramètres de classification géotechniques des petites altérées

Paramètre	Valeurs
Granulométrie, fraction <2 micron	25 ±4%
Limites et indices d'Atterberg	W_L= 44 ± 2.5% I_p= 22.5 ± 3
Activité colloïdale	1.25±0.3
Teneur en carbonates	16.4±3.2%
Poids spécifique des grains	t/m³ γ_s = 2.72 ± 0.04
Teneur en eau naturelle	W_n= 7.55 ± 3.1
Densité sèche	γ_d = 2.08 0.2

- **Paramètres de compactage.A.A.S.H.O. Standard**

Tableau 2.12 : Valeurs des paramètres de compactage A.A.S.H.O. Standard pour petites altérées

Paramètre	Valeurs
Densité sèche optimum	t/m³; γ_d=1.73 ± 0.04
Teneur en eau optimum	%: w_{opp}= 17.5 ± 1

- **Paramètres mécaniques des échantillons compactes à w optimum**

Tableau 2.13 : Valeurs des paramètres caractéristiques de résistance au cisaillement pour petites altérées

Paramètre	Valeurs
Essai triaxial CU+U	Kg/cm² : c'=0.17 φ = 25°

- **Caractéristiques géotechniques des Poudingues pliocènes**

➤ **Paramètres de classification**

Tableau 2.14 : Valeurs des paramètres de classification géotechniques des poudingues pliocènes

Paramètre	Valeurs
Granulométrie, fraction <0,06 mm	4 à 12%
Limites et indices de consistance	$W_L = 34.1 \pm 2.5\%$ $I_p = 10.05 \pm 1.9$
Densité sèche naturelle	t/m³: $\gamma_d = 1.97 \pm 1.99$
Poids spécifique des grains	t/m³: $\gamma_s = 2.66$

➤ **Paramètres de compactage A.A.S.H.O. Standard**

Tableau 2.15 : Valeurs des paramètres de compactage A.A.S.H.O. Standard pour poudingues pliocènes

Paramètre	Valeurs
Densité sèche optimum	t/m³: $\gamma_d = 2.27 \pm 0.03$
Teneur en eau optimum	$W_{opp} = 4.7 \pm 0.8\%$
Coeffde perméabilité au perméamètre sur échantillons compacts	Cm/s : $k = 2.4 \times 10^{-6}$ à 3.3×10^{-6}

3. Paramètres géotechniques des matériaux utilisés pour la construction du barrage :

• **Pour le noyau**

Il est possible d'utiliser des colluvions argileuses, Néanmoins l'exploitation des zones d'emprunt devra être faite avec beaucoup de soin les couches plus particulièrement détritiques ou organiques devront être éliminées et mises en dépôt.

• **Pour les recharges amont du barrage**

Les matériaux graveleux du site du barrage seront utilisés tel que les alluvions sélectionnées et les tous venant ; la différence entre les deux est la suivante :

Les alluvions sélectionnées de la couche amont ne devront pas avoir un pourcentage passant au tamis 0.074 supérieur à 5% dans le but d'obtenir une zone drainante indispensable à la stabilité du barrage.

Cela est valable aussi pour les recharges graveleuses du batardeau.

Les alluvions tout-venant devront avoir un diamètre maximum de 30 mm, une fraction à 60 mm comprise entre 40 et 100%, les éléments inférieurs à 2 mm compris entre 10 et 50% tandis que la fraction inférieure à 0.075 mm ne devra pas dépasser 20%.

- **Pour le batardeau**

Les caractéristiques des matériaux du batardeau sont les mêmes avec les recharges amont du barrage se sont les alluvions sélectionnées

- **Pour les recharges aval du barrage**

Pour le parement aval du barrage les grès du type 1 et 2 qui sont extraits des fouilles de l'évacuateur de crue qui seront utilisés d'une manière ; les grès du type 1 seront placés à l'intérieur du côté aval et les grès du type 2 seront placés à l'extérieur.

- **Pour les drains et les filtres**

Les alluvions de l'Oued Bougdoura peuvent être utilisées. Quel que soit le système de construction la densité relative après compactage ne devra en aucun cas être inférieure à 75%. Les filtres auront une granulométrie comprise entre 0.1 et 2 mm et le drainage entre 2 et 15 mm.

- **Pour l'enrochement amont :**

il s'agit d'une couche de blocs calcaires de la carrière d'Assi Youcef reposant sur un lit de tout-venant de la même carrière. Dans le but de bien serrer l'enrochement, les blocs les plus petits seront mis en place entre les plus gros. Ce tableau résume toutes les caractéristiques géotechniques des matériaux utilisés pour la construction de la digue

Tableau 2.16 : caractéristiques géotechniques des matériaux utilisés pour la construction de la digue

Type de matériaux	Poids volumique γ_h (kN/m ³)	Poids volumique saturé γ_{sat} (kN/m ³)	Angle de frottement interne φ (°)	Cohésion c (kPa)	Coefficient de poisson ν	Module de Young E (MPa)	Perméabilité k (m/day)
Filtre	19	21	34	0	0.25	100	8.64
Noyau	18	19	18	10	0.3	25	0.864×10^{-3}
Grès type 1	19.5	20	30	0	0.23	90	0.0864
Grès type 2	21	21.5	34	0	0.23	90	0.0864
Recharge amont	16	19	10	0	0.3	90	0.0864
Rip Rap	21	22	30	0	0.3	55	0.0864
Alluvion	20	21.5	32	0	0.23	35	0.864
Substratum	21.3	21.8	28	20	0.3	150	8.6×10^{-3}

Conclusion

Dans cette première partie du travail on a présenté c'est quoi un barrage ; les différents types du barrage ainsi le barrage de SOUK TELATHA son site, ces différentes caractéristiques et aussi les matériaux utilisés pour sa construction

Partie 2 :

*Etude et lutte contre les
infiltrations dans les digues et
barrages en terre*

Chapitre 3 :

*Généralités sur les écoulements et
les infiltrations de l'eau*

Chapitre 3 : généralités sur les écoulements et les infiltrations de l'eau

7. Introduction :

Les écoulements représentent une partie essentielle du cycle hydrologique. L'eau précipitée sur un bassin versant va se répartir en eau interceptée, évaporée, infiltrée et écoulée. La quantité d'eau collectée puis transportée par la rivière résultera des précipitations directes à la surface même du cours d'eau et des écoulements de surface et souterrain parvenant à son exutoire

8. Définition des infiltrations :

L'infiltration qualifie le transfert de l'eau à travers les couches superficielles du sol, lorsque celui-ci reçoit une averse ou s'il est exposé à une submersion. L'eau d'infiltration remplit en premier lieu les interstices du sol en surface et pénètre par la suite dans le sol sous l'action de la gravité et des forces de succion

9. Facteur influençant sur les infiltrations :

- Le type de sol (structure, texture, porosité)
- La couverture du sol
- La topographie et la morphologie
- Le débit d'alimentation
- La teneur en eau initiale du sol

10. Définition des écoulements :

De par la diversité de ses formes, on ne peut plus aujourd'hui parler d'un seul type d'écoulement mais bien des écoulements. On distingue dans un premier temps deux grands types d'écoulements, à savoir : les écoulements de surface « rapides » et par opposition, les écoulements souterrains qualifiés de « lents » qui représentent la part infiltrée de l'eau de pluie transitant lentement dans les nappes vers les exutoires.

11. Différents types d'écoulement :

- L'écoulement de surface** ou ruissellement est constitué par la frange d'eau qui, après une averse, s'écoule plus ou moins librement à la surface des sols. L'importance de l'écoulement superficiel dépend de l'intensité des précipitations et de leur capacité à saturer rapidement les premiers centimètres du sol, avant que l'infiltration et la percolation, phénomènes plus lents, soient prépondérants.
- L'écoulement de subsurface** ou écoulement hypodermique comprend la contribution des horizons de surface partiellement ou totalement saturés en eau ou celle des nappes perchées

Chapitre 3 : généralités sur les écoulements et les infiltrations de l'eau

temporairement au-dessus des horizons argileux. Ces éléments de subsurface ont une capacité de vidange plus lente que l'écoulement superficiel, mais plus rapide que l'écoulement différé des nappes profondes.

12. Règles d'écoulement et mesure de perméabilité

d. Définition de la loi de Darcy

La loi de Darcy est une loi physique qui exprime le débit d'un fluide incompressible filtrant au travers d'un milieu poreux supposé isotrope à l'échelle de travail. La circulation de ce fluide entre deux points est déterminée par la conductivité hydraulique ou le coefficient de perméabilité du substrat et par le gradient de pression du fluide. Dans le cas d'un cours d'eau ou d'un réservoir alimentant une nappe, ce gradient est lié à la hauteur de l'eau.

e. Le principe de la loi de Darcy

La loi de Darcy telle qu'elle a été formulée par Henry Darcy, exprime le débit Q d'un fluide incompressible qui s'écoule en régime stationnaire à travers d'un milieu poreux de section A et de longueur L sous l'effet d'une différence de charge ΔH

$$Q = K * S * \frac{\Delta H}{\Delta L}$$

avec :

- Q : le débit volumique (m^3/s) filtrant.
- K : la conductivité hydraulique ou « coefficient de perméabilité » du milieu poreux (m/s), qui dépend à la fois des propriétés du milieu poreux et de la viscosité du fluide.
- S : la surface de la section étudiée (m^2)
- i : Le gradient hydraulique ($i = \Delta H/L$), où ΔH est la différence des hauteurs piézométriques en amont et en aval de l'échantillon, L est la longueur de l'échantillon.

Chapitre 3 : généralités sur les écoulements et les infiltrations de l'eau

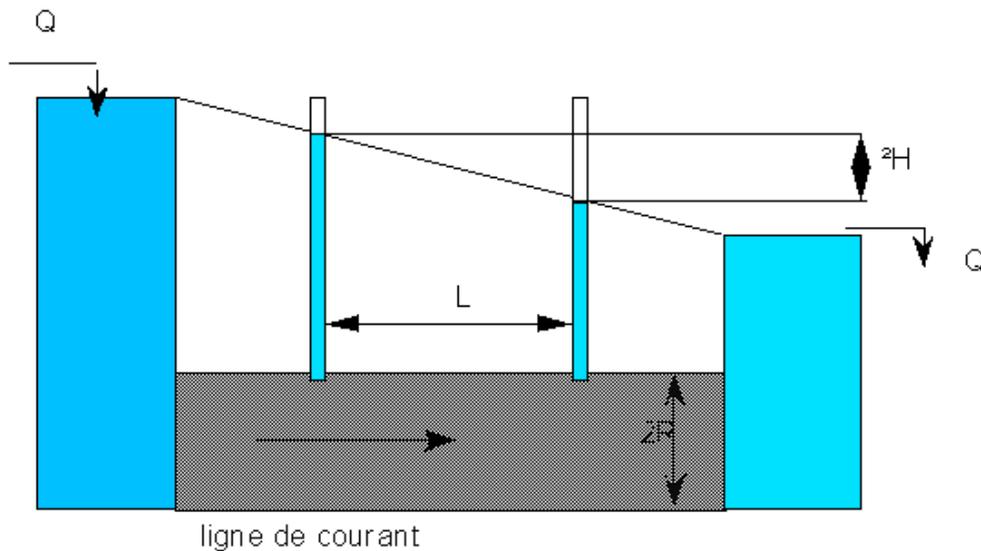


Figure 3.1 : Principe de la loi de darcy

f. La perméabilité et mesure de perméabilité

- **Définition :**

La perméabilité du sol est la propriété qu'a le sol de transmettre l'eau et l'air; c'est une des qualités les plus importantes à prendre en considération lors d'une étude hydrologique d'un sol. Plus le sol est perméable, plus l'eau s'infiltré

K m/s	Coefficients de perméabilité (K) Type de sol - Perméabilité	K m/s
10	Gravier propre	Forte
10^{-1}		
10^{-2}		
10^{-3}	Sables propres	Forte
10^{-4}		
10^{-5}	Mélanges de sables et de gravier propres	Modérée
10^{-6}	Sables très fins	
10^{-7}	Limons (silts) organiques et inorganiques	
10^{-8}	Mélanges de sable, limon et argile	Faible ¹
10^{-9}	Dépôts d'argile en couche, etc.	
10^{-10}	Sols imperméables, par exemple argiles homogènes situées au-dessous de la zone d'altération	Faible ¹
10^{-11}		

Figure 3.2 : Variation du coefficient de perméabilité k selon le type de sol

- **Mesure de perméabilité :**

- **Essai au laboratoire**

Chapitre 3 : généralités sur les écoulements et les infiltrations de l'eau

Le coefficient de perméabilité d'un sol saturé est une caractéristique du sol qui dépend essentiellement de sa granularité, de sa nature, de sa structure, de son indice des vides et de la température.

Plus un sol est fin ou un sol compact, plus les pores sont petits, plus les frottements et les pertes de charge sont importants et plus le coefficient de perméabilité est petit.

Deux méthodes, applications directes de la loi de Darcy, sont utilisées en laboratoire :

- la mesure sous charge constante pour les sols très perméables
- la mesure sous charge variable pour les sols peu perméables.

Permeamètre a charge constante :

L'essai de perméabilité à charge constante montré sur la figure 3.3, convient aux sols très perméables comme les sables. Cet essai doit satisfaire aux conditions suivantes :

L'échantillon doit contenir des particules < 80 mm au plus égal à 10% des particules > 20 mm = 0 %

L'écoulement d'eau à travers l'échantillon de sol est laminaire et permanent, de telle sorte que la vitesse d'écoulement de l'eau reste proportionnelle au gradient hydraulique;

L'échantillon de sol est saturé et ne subit pas de changement de volume durant l'essai la perte de charge (Δh) demeure constante.

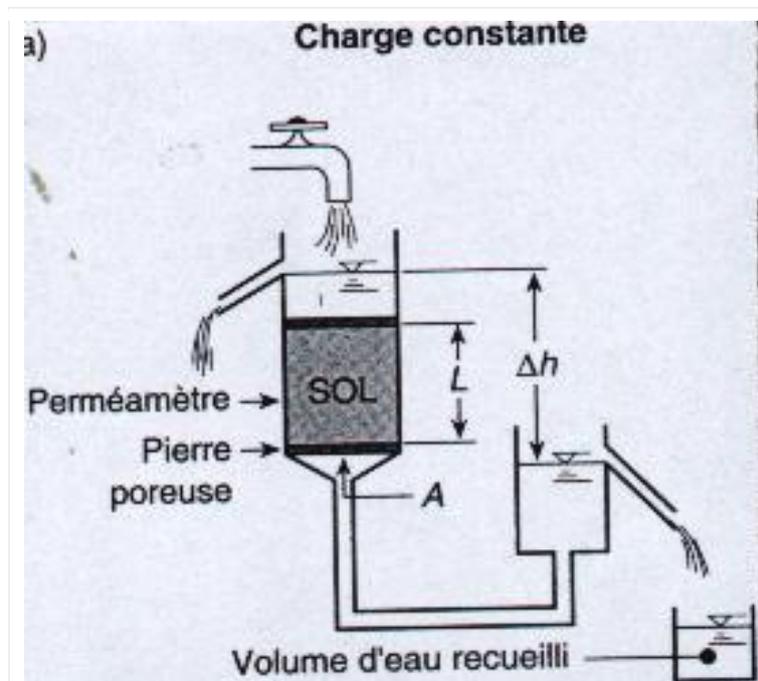


Figure 3.3 : Perméamètre à Charge constante

Chapitre 3 : généralités sur les écoulements et les infiltrations de l'eau

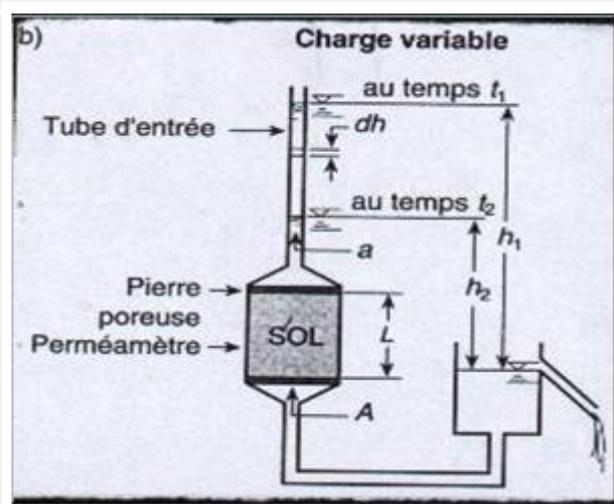


Figure 3.4 : Perméamètre à charge variable

Une perte de charge constante Dh provoque l'écoulement de l'eau à travers l'échantillon de sol. On mesure le débit d'eau q en recueillant un volume d'eau V en un temps t . Connaissant la longueur de l'échantillon L et la surface S à travers laquelle l'eau s'écoule. On peut calculer le coefficient de perméabilité k (équation de Darcy) :

$$Q = k \cdot i \cdot S \longrightarrow k = \frac{Q}{i \cdot S} \text{ et on a } Q = V/t$$

On obtient

$$k = \frac{V}{i \cdot S \cdot t} = \frac{V \cdot L}{\Delta h \cdot S \cdot t}$$

Perméamètre à charge variable

Avec les sols peu perméables comme les sols silteux et argileux, l'essai de perméabilité à charge constante ne délivre que très rarement des résultats acceptables, pour cela, on utilise l'essai à charge variable (figure 6).

En un point du tube d'entrée, la vitesse d'écoulement est égale à :

et le débit à l'entrée est : $q_{\text{entrée}} = - a \cdot dh/dt$

$$v = - \frac{dh}{dt}$$

dh : distance parcourue par l'eau en un temps dt

a : aire du tube d'entrée

Chapitre 3 : généralités sur les écoulements et les infiltrations de l'eau

$$Q = k \cdot i \cdot S = k \frac{h}{L} S$$

Comme l'eau est incompressible et selon le principe de continuité :

$$Q_{\text{entrée}} = Q_{\text{sortie}}$$

$$-a \frac{dh}{dt} = k \frac{h}{L} S$$

En intégrant cette équation et en isolant le coefficient de perméabilité, on obtient :

$$k = \frac{a \cdot L}{S(t_2 - t_1)} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

En utilisant les logarithmes décimaux, on a :

$$K = 2.3 \frac{a \cdot L}{S(t_2 - t_1)} \log_{10} \frac{h_1}{h_2}$$

➤ Essai in-situ

Pour les essais in-situ il existe un essai qui est le plus utilisé c'est l'essai de Lefranc (NF P 94-132 1992)

L'essai Lefranc s'effectue en trois phases. Tout d'abord, on réalise un forage cylindrique jusqu'à la profondeur où l'on souhaite mesurer la perméabilité. Ensuite, on introduit un tube étanche jusqu'au toit de la cavité où s'effectue l'écoulement. Enfin, on mesure la variation du niveau d'eau dans le forage et le volume d'eau échangée (apportée ou prélevée). L'analyse des résultats de mesures permet de déterminer la perméabilité du sol.

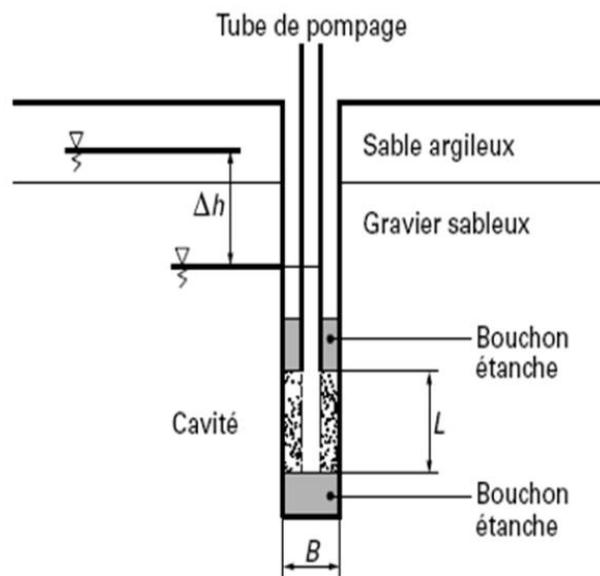


Figure 3.5 : Schéma représentatif de l'essai Lefranc

Chapitre 3 : généralités sur les écoulements et les infiltrations de l'eau

La réalisation de l'essai varie selon le type de sol rencontré (NF P 94-132 1992). Dans le cas des matériaux très perméables (sables et graviers, graves, remblais de décharge), on exécute des essais à charge constante ; l'essai peut durer une à deux heures.

Chapitre 4 :

*Aléas et risques sur les barrages et
digue en terre*

4. Introduction

Malgré les avancées technologiques des dernières décennies en géotechnique, plusieurs barrages d'envergure dans le monde ont subi des dommages importants. Une des causes expliquant cette incongruité provient du fait que le comportement d'un tel ouvrage excède généralement la compréhension des modèles théoriques et mathématiques employés lors de la conception et de la mise en place. Le manque de rigueur dans le contrôle et l'instrumentation lors des phases de construction et d'opération peut également engendrer des aléas et risque qui peuvent provoquer la perte de l'ouvrage

5. Définition de l'aléa et risque

- a. **Alea** : un alea naturel est la possibilité qu'un phénomène, qu'une manifestation naturelle physique relativement brutale, imprévisible, menace de provoquer la perte des vies humaines, des blessures, des dommages aux biens (constructions routes, barrages...), des perturbations sociales ou économiques et des dégradations de l'environnement
- b. **Risque** : danger éventuel plus au moins prévisible

6. Alea et risque qui cause la rupture des barrages

Une rupture de barrage se produit lorsque la structure cède du fait d'événements naturels (séisme, mouvement de terrain, crue, etc.) ou de défaillances humaines (mauvaise conception, négligence, sabotage, etc...). Cette rupture a pour conséquence le déversement non contrôlé de l'eau ou de la boue contenu par le barrage. Ce type de catastrophe reste peu fréquent mais chaque occurrence engendre de graves conséquences humaines, environnementales et techniques.

Un barrage peut rompre pour différentes raisons ; d'autre part il existe plusieurs types de barrages et chacun peut présenter des pathologies qui lui sont propres.

Les principales causes de ruptures sont les suivantes :

- L'érosion interne, qui concerne les barrages en terre (cas du barrage de Teton) ;
- La rupture d'un appui, qui concerne les barrages-voûtes mais reste heureusement rarissime (cas du barrage de Malpasset) ;
- La submersion de l'ouvrage, provoquée par exemple par la rupture d'un autre barrage à l'amont (catastrophe de Banqiao), ou par une élévation anormale du plan d'eau (par exemple à la suite d'un glissement de terrain) ;
- le déplacement de l'ouvrage provoqué par les sous-pressions (cas du barrage du Gleno).

La négligence, une surveillance et un entretien insuffisants, peuvent également conduire à des accidents.

Chapitre 4 : aléas et risques sur les barrages et digues en terre

La plupart des grands barrages sont néanmoins des barrages-voûtes, dotés par nature d'une résistance élevée ; l'exemple de la catastrophe du Vajont montre qu'un tel ouvrage peut résister à une vague de grande hauteur. De nombreux barrages chiliens ont traversé plusieurs séismes de grande énergie sans dommage.

Tableau4.1 : exemples de barrages perdus à cause de différents risques

Barrage	Province, Pays	Date	Nombre de décès	Pertes, commentaires
Zeyzoun Dam	Zeyzoun (Syrie)	2002, 4 juin	22 avec 10 000 personnes concernées	
Walnut Grove Dam	Wickenburg(Arizona, États-Unis)	1890	50 à150	Importantes chutes de neige suivies de fortes pluies
Wadi Qattara Dam	Benghazi(Libye)	1979		Des inondations en amont et une capacité de stockage endommagée, le barrage secondaire a été détruit.
Vodnínádrž Soběnov	Soběnov(République tchèque)	2002		Très fortes pluies en 2002
Vega de Tera / Catástrofe de Ribadelago (es)	Ribadelago(Espagne)	1959, 9 janvier	144	Mauvaise construction du barrage. Défauts de cimentation des contreforts et pierres de mauvaise qualité pour deux d'entre eux. Infiltrations ayant abouti à des sous-pressions qui ont probablement entraîné la rupture de deux contreforts, puis, par effet domino, des contreforts suivants de part et d'autre. Le village de Ribadelago entièrement rasé a été reconstruit une dizaine de

Chapitre 4 : aléas et risques sur les barrages et digues en terre

Barrage	Province, Pays	Date	Nombre de décès	Pertes, commentaires
				kilomètres plus loin. Le barrage n'a pas été reconstruit et ses ruines sont toujours visibles.
Upriver Dam	État de Washington(États-Unis)	1986		La foudre a frappé le système électrique, arrêtant les turbines. Le niveau d'eau monta pendant les essais de redémarrage. Les systèmes de secours, inopérants, ne purent pas actionner les déversoirs à temps. Le barrage fut submergé puis reconstruit.
TokweMukorsi Dam (de)	Masvingo, Zimbabwe	2014, 4 février	0	
TaumSaukr eservoir	Lesterville(États-Unis)	2005		Erreur d'ordinateur et d'opérateur ; les jauges indiquant le remplissage n'étaient pas respectées; le barrage continuait de se remplir. De petites fuites avaient affaibli le parement amont par érosion interne.
Sweetwater Dam	Comté de San Diego(Californie, États-Unis)	1916	12à50	Barrage noyé par les inondations.
Spaulding Pond	Norwich(Connecticut, États-Unis)	1963	6	plus de 6 millions \$ de dégâts.

Chapitre 4 : aléas et risques sur les barrages et digues en terre

Barrage	Province, Pays	Date	Nombre de décès	Pertes, commentaires
Dam (Mohegan Park)				
Situ Gintung Dam	Tangerang(Indonésie)	2009		Mauvais entretien lié avec de fortes pluies de mousson
Shakidor Dam	Pakistan	2005	70	Pluies soudaines anormalement violentes
Sadd-el-Kafara	Wadi Garawi au Caire (Égypte)	-2600 (environ 2600 av. J.-C.)		
Rupture du barrage d'Attapeu	Laos	2018, 23 juillet	Au moins 17, plusieurs centaines de disparus	Le barrage, encore en construction au moment des faits, a déversé près de 5 milliards de mètres cubes d'eau sur 7 des 12 villages situés en aval. Le groupe sud-coréen SK Engineering & Construction, partenaire du projet de construction, a découvert que la partie supérieure d'un barrage auxiliaire avait été emportée par les eaux environ 24 heures avant son effondrement. ¹⁶
Přehrada Desná (cs)	Desná(Autriche-Hongrie)	1916	62	Défauts de construction.

Chapitre 4 : aléas et risques sur les barrages et digues en terre

D'une manière générale Le phénomène de rupture de barrage correspond à une destruction partielle ou totale d'un barrage.

Les causes de rupture peuvent être diverses :

- **techniques** : défaut de fonctionnement des vannes permettant l'évacuation des eaux, vices de conception, de construction ou de matériaux, vieillissement des installations ;
- **naturelles** : séismes, crues exceptionnelles, glissements de terrain (soit de l'ouvrage lui-même, soit des terrains entourant la retenue et provoquant un déversement sur le barrage) ;
- **humaines** : insuffisance des études préalables et du contrôle d'exécution, erreurs d'exploitation, de surveillance et d'entretien, malveillance.

- Le phénomène de rupture de barrage dépend des caractéristiques propres du barrage.

Ainsi, la rupture peut être :

- **progressive** : dans le cas des barrages en remblais, par érosion régressive, suite à une submersion de l'ouvrage ou à une fuite à travers celui-ci (phénomène de " renard ") ;
- **brutale** : dans le cas des barrages en béton, par renversement ou par glissement d'un ou plusieurs plots. Une rupture de barrage entraîne la formation d'une onde de submersion se traduisant par une élévation brutale du niveau de l'eau à l'aval.

Chapitre 5 :
Les risques des infiltrations dans
les barrages et les digues en terre

Chapitre 5 : Les risques des infiltrations dans les barrages et les digues en terre

4. Introduction :

Le phénomène lié aux pertes d'eau dans un barrage est qualifié de non stable, non linéaire et non homogène, de par le mécanisme auquel il est associé. La compréhension de ce mécanisme requiert la connaissance de l'hydraulique, de l'hydrodynamique, de l'érosion des sédiments et des aspects géotechniques qui pourraient se produire au niveau du barrage. Dans la littérature, ces évènements sont interprétés par rapport aux incidents découlant :

- Des méthodes de construction et de l'état des remblais qui se définiraient par le type et la mise en place des matériaux, par leur état de compaction, par la variation de saison au cours de la construction.
- Des comportements géotechniques des structures du barrage mettant en évidence une augmentation de l'intensité des déformations et des contraintes entre les matériaux pendant et après la construction du barrage en remblai. Les déformations sont provoquées par la variation des contraintes entre les différentes zones du barrage, les effets de fluage et les déformations de la fondation. Les poussées hydrostatiques d'eau du réservoir pendant le remplissage peuvent causer des déformations supplémentaires
- Des problèmes de stabilité dans le barrage résultant d'écoulement avec des gradients trop élevés ou critiques, de trop fortes pressions interstitielles dans la structure.
 - Des actions exceptionnelles telles que des débordements d'eau au-dessus de la crête du barrage ou de son évacuateur de crue, de la rupture sur le flanc amont du barrage, du retard dans la construction.

Les pertes d'eau résultent généralement de la combinaison de plusieurs de ces causes. Cependant, la plupart des dommages sont reliées au déversement et à la présence de renards comme le présentent les statistiques effectuées présentées au tableau 5.1. Ces statistiques ont été compilées à partir de 124 grands barrages construits depuis 1986 et dont le mode d'endommagement est bien connu. Comme nous le verrons plus loin, la formation de ces renards est une conséquence de l'évolution de l'érosion interne dans le barrage.

Chapitre 5 : Les risques des infiltrations dans les barrages et les digues en terre

Tableau 5.1 : pourcentage des pertes selon le mode d'endommagement

Mode d'endommagement	% de pertes totales
Renard par remblais	31
Renard par fondation	15
Renard des remblais à la fondation	2
Instabilité des pentes	4
Déversements	46
Tremblements de terre	2

L'écoulement d'eau dans le corps de barrage et sa fondation menace la stabilité de l'ouvrage hydraulique, qui peut subir le phénomène d'érosion interne ou bien externe. Ces actions causent des endommagements très graves et irréversibles.

Généralement les barrages en remblais sont plus susceptibles à la rupture progressive dû à l'érosion externe ou interne, par contre les barrages en béton risquent d'avoir des ruptures instantanées et immédiats partielles ou totales.

5. Définition de l'érosion interne :

L'érosion interne est un processus selon lequel les particules sont éloignées du noyau ou de la fondation en empruntant des voies de migration préférentielles. Ce procédé est initialement favorisé par :

- La présence d'un chemin d'infiltration et d'une source d'eau,
- L'existence de matériaux érosifs à l'intérieur de ce chemin et transportables par le flux d'infiltration,
- L'absence de protection qui pourrait retenir ces particules.

Chapitre 5 : Les risques des infiltrations dans les barrages et les digues en terre

Plus le processus de l'érosion évolue, plus il y a de risque que se forment dans le barrage des conduites de circulation d'eau. Ces dernières se localiseraient (Foster *et al.*, 2000) à 50% dans le remblai, à 40% dans la fondation ou à 10% relierait le remblai à la fondation.

L'érosion interne résulte du détachement et du transport de matière sous l'effet d'un écoulement d'eau, dans le corps d'un barrage ou dans la fondation. Lorsque le transport est un charriage concentré dans un conduit, c'est un renard. Lorsque le transport est diffus à travers la matrice solide et ne concerne que les fines en suspension, c'est une suffusion. (BONELLI, 2001). Ces deux notions fondamentales dans le processus d'érosion interne sont le gradient hydraulique et la vitesse d'écoulement. Elles interviennent à tous les stades d'arrachement des grains ou de transports.

Lorsqu'il y a un arrachement de particules dans le sol, la vitesse d'écoulement est nécessairement une « une vitesse critique » pour le milieu traversé par l'écoulement. Elle peut être atteinte par une augmentation de k ou une augmentation de i .

Ces gradients élevés peuvent avoir trois origines :

-  Une erreur de conception de barrage ;
-  Des négligences de chantier ;
-  Une cause accidentelle.

On admettra aisément qu'il est difficile de connaître dans le détail les variations de la perméabilité au sein d'un remblai ou d'une fondation, comme il est difficile d'estimer les pertes de charges le long de filets liquides autrement que d'une manière globale entre l'amont du barrage et un exutoire connu (drain, recharge, pies aval, puits, etc...). huit phénomènes peuvent être initiateurs de l'érosion interne qui peut se développer selon deux types de transports différents (l'arrachement et le transport des particules).

- La boullance
- La suffusion
- L'érosion régressive
- Le débouillage
- La dissolution
- La dispersion
- L'entraînement
- L'exsclusion

Chapitre 5 : Les risques des infiltrations dans les barrages et les digues en terre

Dans ce travail on s'intéressera au phénomène de boulangerie qui est un phénomène très important qui menace la stabilité de l'ouvrage

Les mécanismes de l'érosion interne

6. La boulangerie

Dans un écoulement la composante verticale ascendante de la force d'écoulement génère un gradient hydraulique i vertical ascendant. Cette composante verticale de la force d'écoulement s'oppose directement à la pesanteur (figure 10) ; avec i suffisamment élevé, les grains sont entraînés par l'eau : c'est le phénomène de boulangerie.

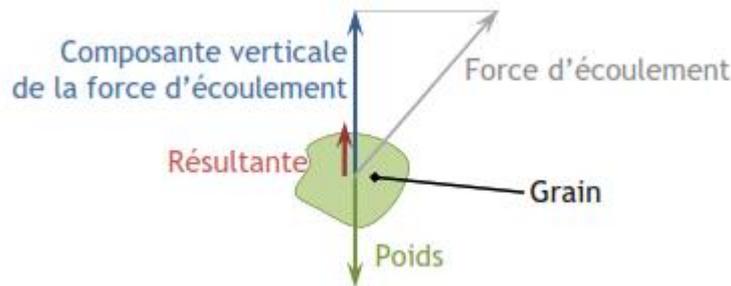


Figure 5.1 : phénomène de boulangerie

On définit un gradient hydraulique critique, i_c , pour lequel la résultante des forces est nulle et donc les grains du sol à la limite d'être entraînés :

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$$

Il est nécessaire de vérifier que les gradients hydrauliques ascendants sont inférieurs au gradient critique lors de construction de barrage ou digue en terre, mais aussi lors de fouille dans un sol ou de construction sur un sol où ce phénomène est possible. L'arrachement des grains est la première phase de l'érosion interne. Il crée de nouvelles conditions d'écoulement éventuellement plus menaçantes : augmentation des vides, modification des assemblages de composition des sols... Le sol devient plus décharné et plus perméable, permettant à l'eau de circuler à vitesse plus importante et/ou dans de nouveaux écoulements.

Dans un écoulement, la force qui lui est liée (force d'écoulement) a une composante verticale ascendante qui s'oppose directement à la force de pesanteur. Si la résultante de ces deux forces est dirigée vers le haut, les grains du sol « flottent » et sont entraînés par l'eau : il s'agit du phénomène de boulangerie. Celui-ci peut générer des détériorations importantes sur des ouvrages dont les fondations reposent sur un sol dans lequel se produit le phénomène ou si le sol est lui-même l'ouvrage comme pour une digue, un barrage ou un fond de fouille.

Chapitre 5 : Les risques des infiltrations dans les barrages et les digues en terre

Le phénomène de renard est un processus d'érosion interne qui se produit avec l'augmentation des vitesses d'écoulement de l'eau sous une fondation ou un remblai. L'eau atteint localement des vitesses susceptibles d'entraîner progressivement les éléments les plus fins du sol et augmente ainsi le débit. Progressivement des éléments plus gros sont entraînés, l'arrachement des particules progresse vers l'amont générant un conduit depuis l'aval. Le phénomène peut s'arrêter si par manque de cohésion le conduit s'effondre. Dans le cas contraire, l'érosion progresse jusqu'à l'amont, l'eau s'engouffre et désorganise le sol. C'est le phénomène de renard difficilement détectable et à évolution très rapide.

Phénomène de renard hydraulique.

Le phénomène d'arrachement comme la boullance est susceptible d'être accompagné d'un transport important des grains, déstabilisant les sols. Le phénomène de renard apparaît dans des écoulements en milieu perméable comme les barrages ou digues en terre, dans la direction d'écoulement de l'amont vers l'aval. Localement les vitesses d'écoulement augmentant peuvent atteindre le seuil d'entraînement des grains fins qui progressivement va « raviner » les lignes de courant de l'intérieur. Les éléments plus importants vont alors être entraînés, l'érosion progresse de manière régressive le long d'une ligne de courant, formant un conduit où s'engouffre l'eau de manière irréversible.

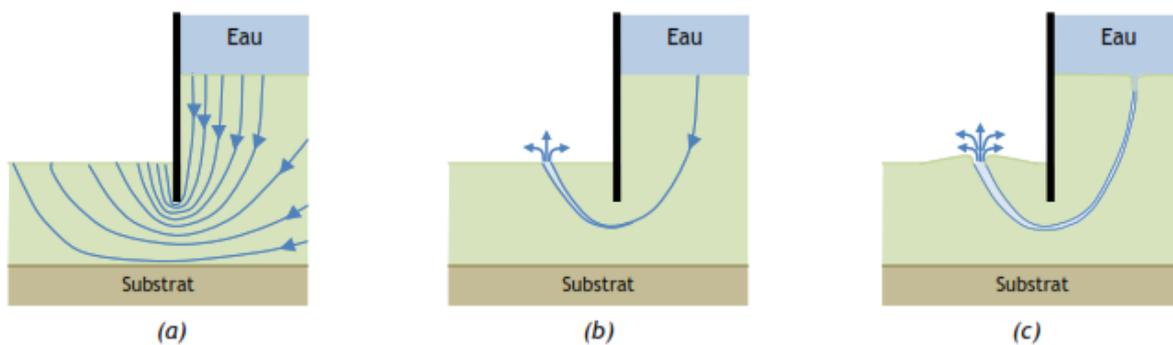


Figure 5.2 : développement de l'érosion interne

Le développement d'un renard hydraulique est conditionné par le gradient hydraulique au sein de la structure, de la différence de niveau Δh et de la propension de la structure à libérer des particules. Ainsi, lorsque l'écoulement de l'eau dans la structure est long, l'eau ne développe pas la force pour pouvoir emporter des grains du sol. De même, si les grains du sol ont une grande cohésion (comme pour l'argile) il n'y a pas de transport de grain. Alors que dans un massif sableux qui présente une grande différence de niveau d'eau amont-aval et une faible largeur de remblai la probabilité du développement d'un renard hydraulique est importante. L'écoulement se fait préférentiellement aux points de « fragilité » d'un ouvrage comme le

Chapitre 5 : Les risques des infiltrations dans les barrages et les digues en terre

long des structures (en béton, rideaux de palplanche...) ou des joints, en suivant les passages de conduites ou câbles internes à la structure mais aussi aux « faiblesses » de réalisation (défaut de compactage...). Lors du dimensionnement d'un ouvrage, le risque de développement d'un renard doit être maîtrisé, principalement aux niveaux des zones de faiblesse prévisible.

Le sol devient localement plus perméable, les vitesses d'écoulement augmentent, le phénomène s'amplifie avec l'élargissement de la conduite créée. Les conséquences sont la rupture du barrage soit par ouverture d'une brèche soit par effondrement de l'ouvrage avec submersion par une vague.



Figure 5.3 : phénomène d'érosion interne

Chapitre 6 : Lutte contre les infiltrations et étanchéisation dans les
barrages

Chapitre 6 :
Lutte contre les infiltrations et
étanchéisation dans les barrages

Chapitre 6 : Lutte contre les infiltrations et étanchéisation dans les barrages

4. Introduction :

Construire et exploiter un barrage, c'est également prévoir l'imprévisible. Tout scénario catastrophique est à imaginer. Par exemple, lors des grandes crues, il faut éviter l'inondation des berges et la submersion des barrages. Ainsi éviter les infiltrations des eaux à travers le corps du barrage et aussi sa fondation afin d'éviter la création du phénomène de renard ou de bouillasse qui menace la stabilité du barrage ou de la digue pour cela des techniques d'étanchéisations sont utilisées pour éviter ces risques.

5. Dans le corps du barrage :

Lorsque la terre du remblai n'est pas suffisamment imperméable pour constituer un remblai homogène étanche, il faut équiper le barrage d'un organe d'étanchéité spéciale. Les techniques les plus couramment mises en œuvre sont les noyaux en matériaux argileux compactés, en béton bitumineux et les masques amont en béton de ciment ou bitumineux. Il existe néanmoins d'autres techniques telles que : parois moulées, chape et les membranes souples.

d) Noyaux aux matériaux argileux

Le noyau argileux compacté disposé verticalement au centre du barrage ou en position inclinée à l'amont de celui-ci, son épaisseur est de l'ordre $1/6$ de la hauteur de l'ouvrage. Vers le sommet le noyau doit être monté au-dessus des plus hautes eaux et pratiquement, compte tenu des remontées capillaires, jusqu'à la tête du barrage. Il doit être protégé de la dessiccation à sa partie supérieure pour éviter toute fissure de retrait qui risquerait de se révéler catastrophique. Cette protection peut être assurée par une couche de sable ou de préférence, en traitant le sommet du barrage en chemin avec une chaussée enrobée bitumineuse.

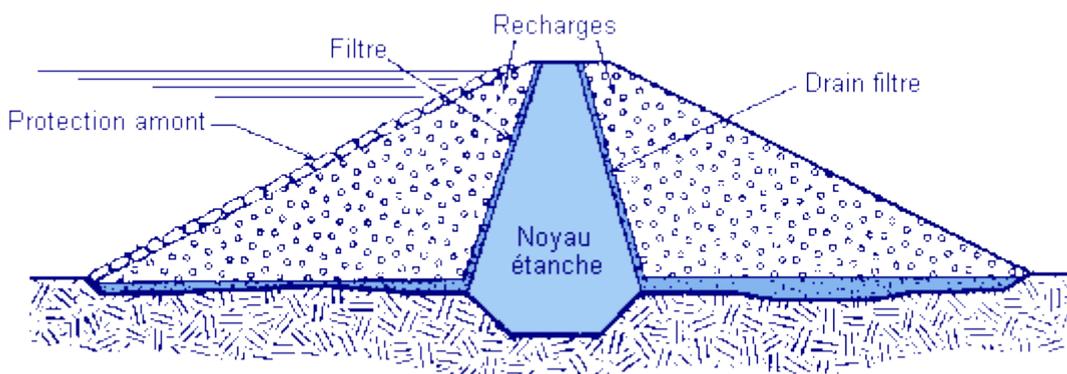


Figure 6.1 : Barrage à noyau aux matériaux argileux

Chapitre 6 : Lutte contre les infiltrations et étanchéisation dans les barrages

e) Noyaux en béton bitumineux

L'étanchement des barrages en terre au moyen de noyau bitumineux a pris une très grande importance dans le monde entier et dans toute les zones climatiques, cet élément d'étanchéité (mieux que les autres) satisfait, en effet, aux exigences de sécurité les plus strictes grâce à sa déformation, sa bonne résistance à l'érosion et au vieillissement, et surtout grâce au mode de construction sans joints

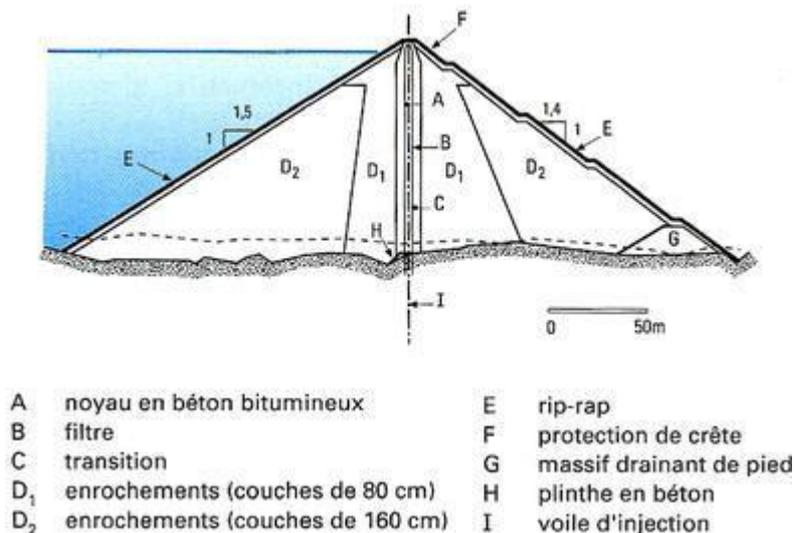


Figure 6.2 : Barrage a noyaux en béton bitumineux

f) Masque amont

Le masque amont qui constitue l'organe d'étanchéité est classiquement exécuté en béton de ciment, en béton bitumineux ou en géomembrane. Il a une épaisseur réduite, ce qui lui permet de s'accommoder aux déformations du massif support.

• Masque en béton de ciment

La dalle doit posséder des joints de construction, du fait du retrait, que l'on munit de lames d'étanchéité. Ces joints sont respectivement parallèles et perpendiculaires aux lignes de plus grande pente du talus, ces dernières étant nécessaires pour diminuer l'importance des efforts de flexion.

Chapitre 6 : Lutte contre les infiltrations et étanchéisation dans les barrages

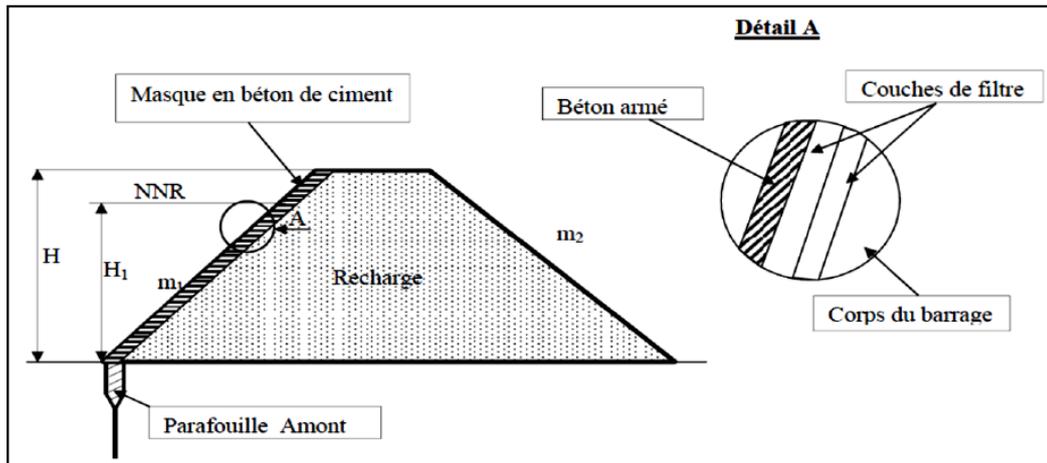


Figure 6.3 : Barrage à masque amont en béton de ciment

- **Masque en béton bitumineux**

C'est a priori le produit idéal en raison de sa remarquable étanchéité et de sa résistance à la flexion. Si certaines fissures se produisent, elles se colmatent d'elles-mêmes peu à peu sous l'effet de la pression de l'eau, par déformation plastique. Grosso modo, un béton bitumineux agit de façon plastique aux déformations lentes, de façon élastique aux déformations rapides, or le tassement s'effectue en général de façon lente. Également, il n'y a pas de problème de joint, les différentes couches de béton bitumineux se soudent littéralement à chaud.

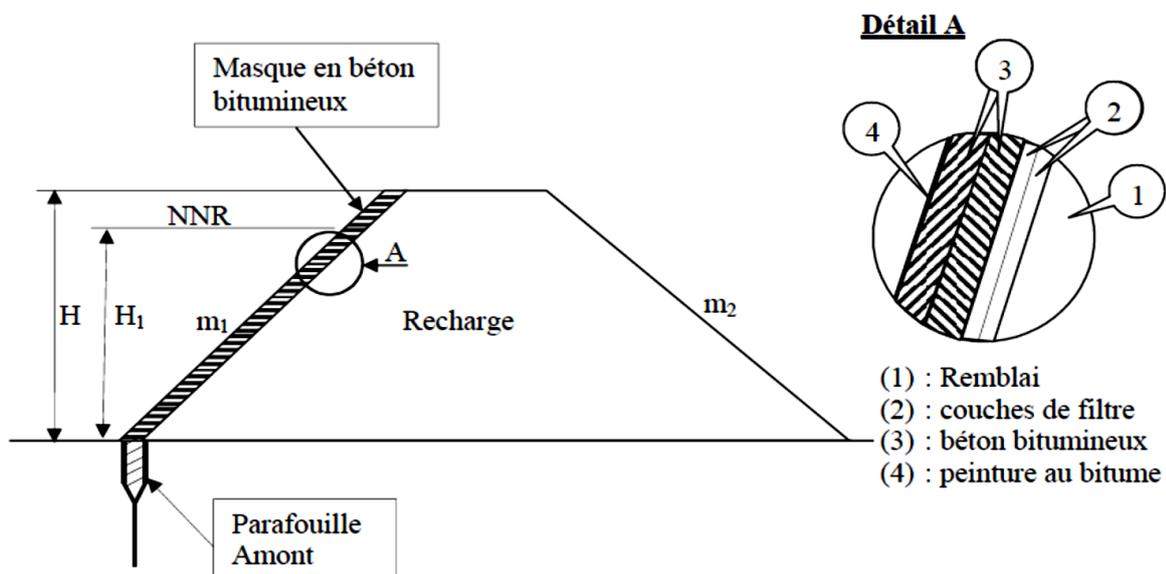


Figure 6.4 : Barrage à masque en béton bitumineux

Chapitre 6 : Lutte contre les infiltrations et étanchéisation dans les barrages

- **Masque en acier**

En raison de la grande déformabilité alliée à une résistance élevée et une étanchéité faite de l'acier, celui-ci constitue un matériau techniquement à peu près parfait pour un masque amont. L'inconvénient en est généralement une question de coût, et il généralement peut utiliser

- **Masque en enrochement**

Au moyen de terre argileuse compactée, nous pouvons réaliser une étanchéité convenable, avec des épaisseurs qui sont des caractéristiques de perméabilité du matériau dont on dispose.

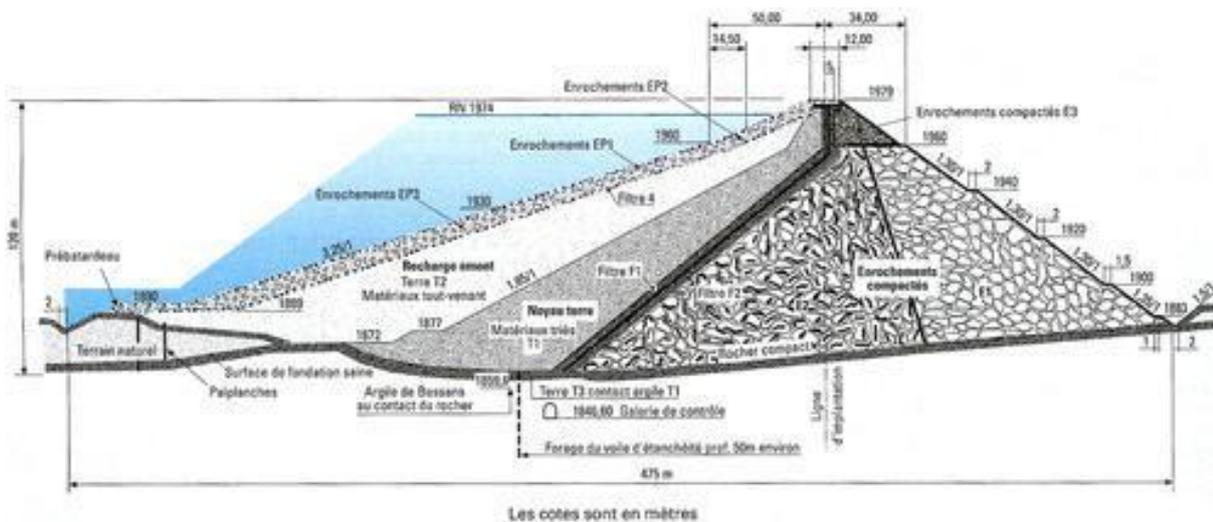


Figure 6.5 : Barrage à masque en enrochement

- **Masque en membrane souple**

Le masque en membrane souple est un procédé d'étanchéité relativement récent. Il présente l'avantage d'être très simple à réaliser et résistant physiquement et chimiquement avec toutefois l'inconvénient d'être sensible aux chocs, aux poinçonnements et aux poussées des racines de végétaux. Pour la réalisation de ce type de masque les produits, les plus utilisés sont : le butyle caoutchouc, les matières plastiques, les produits bitumineux.



Figure 6.6 : Barrage à masque en membrane souple

Chapitre 6 : Lutte contre les infiltrations et étanchéisation dans les barrages

6. Dans les fondations du barrage :

Lorsque les fondations du barrage sont imperméables, il suffit d'assurer la liaison entre le massif du barrage et sa fondation en réalisant un ancrage du dispositif d'étanchéité pour empêcher les infiltrations suivant la ligne de contact entre le barrage et sa fondation.

Dans le cas où les fondations sont perméables, leur traitement est indispensable pour les rendre étanches. Ce traitement est en fonction de la nature des matériaux constituant et de leurs profondeurs.

e. Clé d'étanchéité (parafouille) :

Cas d'une fondation constituée de matériaux peu perméables : il est recommandé d'exécuter une clé d'étanchéité en matériaux argileux compacts afin de tenir compte de la fissuration superficielle et d'hétérogénéités éventuelles.

Clé d'étanchéité est une tranchée remplie de matériaux assurant l'étanchéité du massif, qui doit recouper la couche perméable et s'ancrer dans le substratum imperméable.

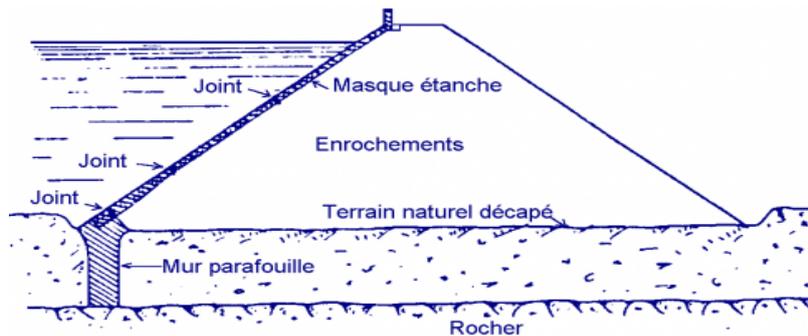


Figure 6.7 : Imperméabilisation des fondations de barrage avec mur parafouille

Cette solution est adoptée lorsque l'épaisseur de la couche imperméable n'est pas très grande car l'exécution de la tranchée et son remblayage se fait d'une manière mécanique.

f. Paroi moulée :

Cette solution est assez classique dans les terrains meubles ; elle est aussi possible dans les fondations rocheuses selon la technique, plus couteuse, de hydro fraise. Elle peut entraîner des désordres si des déplacements importants se produisent, par exemple le poinçonnement inverse du remblai dans le cas d'un fort tassement de la fondation meuble (risque aussi d'un frottement latéral excessif) ; si elle est située au pied amont du remblai, la paroi peut subir un cisaillement important dans sa partie supérieure.

Chapitre 6 : Lutte contre les infiltrations et étanchéisation dans les barrages

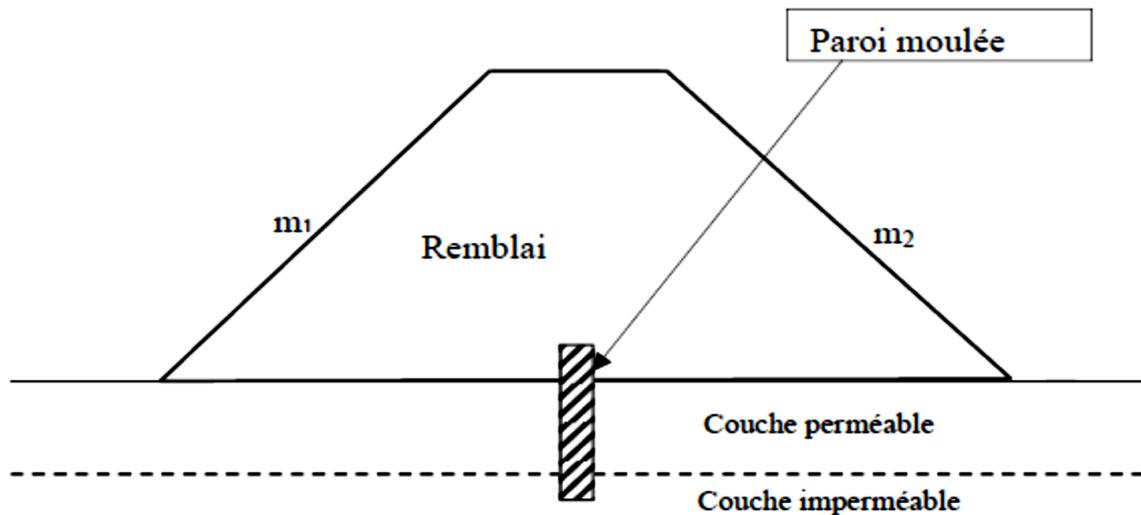


Figure 6.8 : Traitement des fondations de barrage avec paroi moulée

g. Tapis d'étanchéité amont

Lorsque l'étanchéité de la retenue ne peut pas être réalisée par une coupure au droit du barrage, la solution consiste à étancher la cuvette totalement ou partiellement à l'aide d'un tapis en matériaux argileux compactés. On peut adjoindre aux matériaux argileux des produits d'étanchéité, des polymères synthétiques et de la bentonite pour améliorer son efficacité.

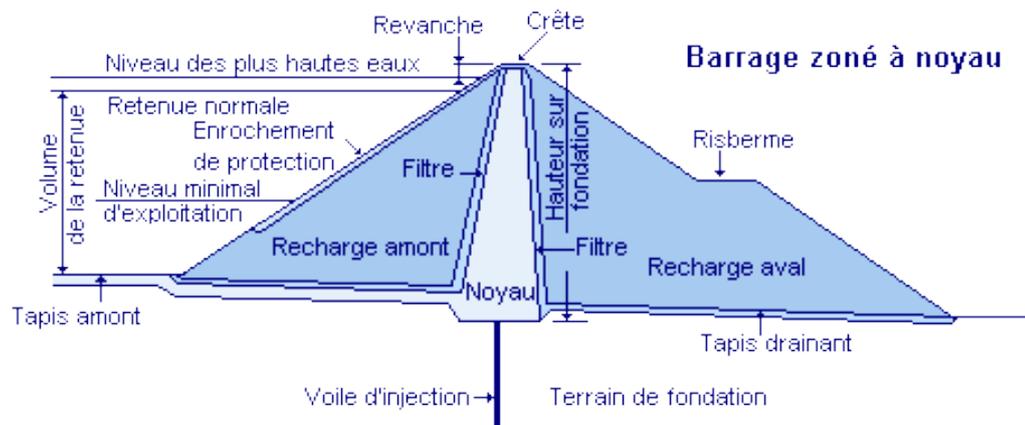


Figure 6.9 : Tapis d'étanchéité amont

h. Traitement des fondations des barrages avec injection

L'injection est un procédé permettant d'étanchéer des vides au moyen de produits liquides qui se solidifient dans le temps.

Cette technique permet de modifier certaines caractéristiques du sol, et notamment sa perméabilité ; sans nécessiter une substitution de matériaux, ce qui la distingue fondamentalement des procédés d'écrans étanches continus tels que les parois étanches au

Chapitre 6 : Lutte contre les infiltrations et étanchéisation dans les barrages

coulis, au béton ou au béton plastique. La forme des écrans injectés est liée à la géométrie des forages.

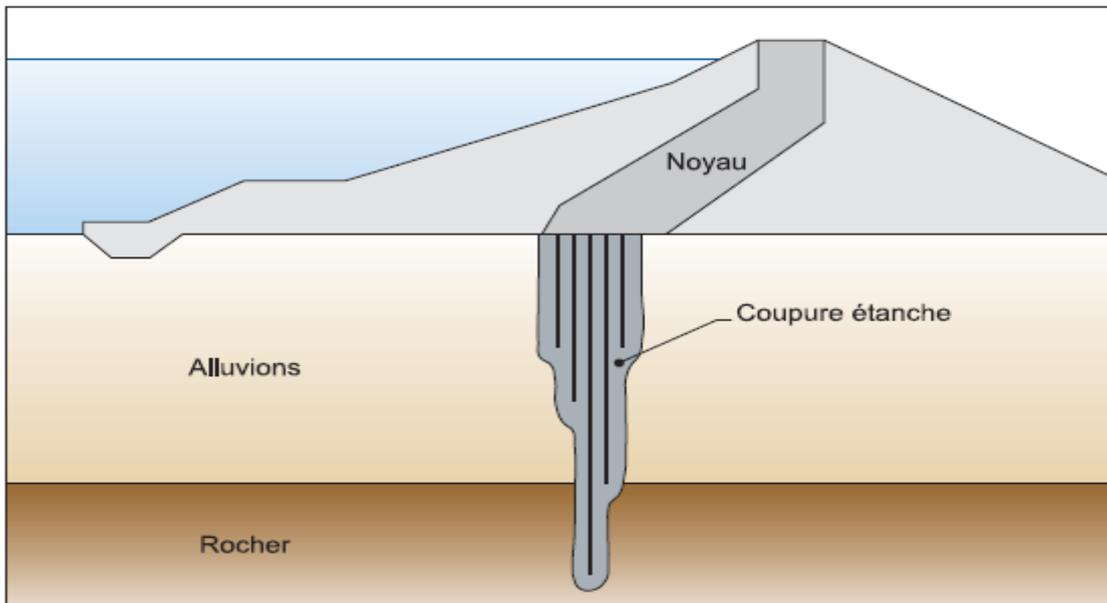


Figure6.10 : injection dans les fondations de barrage

Types d'injection :

Les produits d'injection sont mis en place dans le sol par l'intermédiaire de forages. Mais les techniques et les types de produit utilisés diffèrent très sensiblement selon la nature des terrains à traiter. On peut distinguer trois cas principaux :

- ✚ L'injection des roches fissurées.
- ✚ L'injection dans les terrains alluvionnaires.
- ✚ L'injection de remplissage de cavité.

7. Traitement pour l'étanchéisation du barrage de souk telatha :

4. Corps du barrage :

- **Enrochement amont (rip-rap)**

La mise en place du rip-rap doit éviter toute ségrégation. Les roches doivent être saines, denses, inaltérables. Le rip-rap doit contenir une forte proportion d'éléments supérieurs à la dimension minimale nécessaire pour résister à l'action des vagues. En fonction de la hauteur des vagues h , on détermine la dimension préconisée de la protection classique en enrochements : épaisseur e de la couche d'enrochements (mesurée perpendiculairement au parement) et diamètre d_{50} tel que 50 % en poids des blocs aient un diamètre égal ou supérieur

Chapitre 6 : Lutte contre les infiltrations et étanchéisation dans les barrages

à d_{50} . La dimension des plus gros blocs est limitée à e . Les éléments les plus petits n'ont pas un diamètre inférieur à 0,10 mètres.

Tableau 6.1 : dimension des blocs de rip rap et leurs épaisseurs en fonction de la hauteur des vagues

Hauteur des vagues h (m)	Épaisseurs (m)	d_{50} des blocs (m)
0.30	0.30	0.20
0.55	0.40	0.25
0.80	0.50	0.30
1.05	0.60	0.40
1.30	0.70	0.45
1.55	0.80	0.50

- **Filtres et drains :**

Le dispositif filtre/drain est un élément particulièrement important d'un barrage en remblai. Nombre d'accidents et de ruptures sont imputables à l'absence de filtres et/ou de drains, ou encore à une mauvaise conception ou réalisation du système filtre/drain pouvant conduire à une érosion interne ou un drainage insuffisant. La sécurité des barrages en remblai dépend donc d'une conception et d'une construction adéquate des systèmes de filtres et de filtres/drains.

-Fonctions du dispositif de drainage et filtres :

Dans un barrage et dans sa fondation, du fait de la charge amont, l'eau s'infiltré progressivement même si le matériau est étanche. Par ailleurs, des fuites accidentelles peuvent

Chapitre 6 : Lutte contre les infiltrations et étanchéisation dans les barrages

provenir d'une fissure du noyau par fracturation hydraulique, d'un collage imparfait entre le noyau et la fondation... Les infiltrations ne doivent pas déboucher sur le parement aval de manière incontrôlée car il s'en suivrait un risque de déstabilisation du pied du talus aval ou d'amorce de renard. Un dispositif drainant, zone de forte perméabilité, est donc quasiment toujours nécessaire afin de maîtriser les écoulements. Il est en général composé d'un drain vertical (drain cheminée) et d'un drain horizontal (drain tapis). Il constitue un élément de sécurité majeur des ouvrages.

Un drain naturel est réalisé en matériaux grossiers (graviers, sables) pour être le plus perméable possible. Sous l'effet de la circulation de l'eau, les particules de sol peuvent migrer vers une zone de sol plus grossier comme des matériaux du remblai vers les vides interparticulaires des matériaux du drain.

Il est impératif que les systèmes de filtre et de drain dans les barrages en remblai évacuent en toute sécurité la totalité des eaux d'infiltration vers le pied aval ou vers une zone adjacente plus perméable sans développer de pressions excessives. La conception du système de drainage doit considérer le scénario le plus défavorable, incluant la fissuration du noyau, la fracturation hydraulique et/ou une ségrégation dans le noyau.

Les matériaux pour les filtres et drains sont fabriqués à partir d'alluvions ou d'enrochements de carrière par concassage et triage afin d'obtenir la composition granulométrique attendue puis lavage afin d'éliminer les éléments fins en excès. Les matériaux calcaires sont à éviter.

- **Noyau :**

Si l'hétérogénéité des matériaux disponibles sur place ou si leurs caractéristiques géotechniques ne permettent pas d'envisager une digue homogène étanche, une solution est de concevoir un massif en plusieurs zones dont chacune est constituée d'un matériau différent selon le rôle que doit jouer chaque zone. La fonction d'étanchéité est alors assurée par un noyau étanche réalisé en matériau argileux compacté placé soit en position inclinée en amont de l'ouvrage soit en position verticale en son centre. L'épaisseur du noyau doit être d'autant plus importante que le barrage est haut. On choisit en général une épaisseur de $1/6$ de la hauteur de l'ouvrage. Le sommet du noyau doit être au-dessus du niveau des plus hautes eaux et pratiquement compte tenu des remontées capillaires jusqu'à la crête de l'ouvrage. Il doit être protégé de la dessiccation à sa partie supérieure pour éviter toute fissure de retrait. Cette protection peut être assurée par une couche de sable ou en traitant la crête en chemin avec une chaussée en enrobé bitumineux.

Chapitre 6 : Lutte contre les infiltrations et étanchéisation dans les barrages

Le noyau étanche est maintenu par une ou plusieurs zones constituées de matériaux plus grossiers et relativement perméables assurant la stabilité mécanique de l'ouvrage. Le noyau interne a l'avantage d'être peu sensible aux agressions extérieures : il constitue une solution robuste de durée de vie longue et relativement peu coûteuse. L'inconvénient est qu'il est difficilement réparable en cas de fuite.

Il faut assurer la continuité de l'étanchéité en raccordant celle-ci à la fondation imperméable ou au dispositif d'étanchéité des fondations.

Caractéristiques des matériaux pour les noyaux :

Les matériaux constituant les noyaux doivent présenter certaines caractéristiques qui sont évaluées en laboratoire.

Une propriété importante des matériaux utilisés pour réaliser le noyau est l'indice de plasticité qui caractérise la susceptibilité des matériaux à leur teneur en eau. Il est idéalement compris, pour les terres à noyau, entre 15 et 25 %. Les matériaux fins dont l'indice de plasticité est supérieur à 35 posent non seulement des problèmes de stabilité mais également de tassement, de gonflement et de mise en œuvre.

- **Recharge amont et aval**

Protection de la partie amont :

Le dimensionnement de la protection du talus amont tient compte de la hauteur de vague significative, du soulèvement de la surface de l'eau dû au vent, du déferlement de la vague.

L'action des vagues dépend essentiellement de la dimension de la retenue et de sa localisation géographique (rose des vents). Le choix du type de protection et son dimensionnement sont donc indépendants de la hauteur du barrage. De ce point de vue, les barrages de faible hauteur ne peuvent être considérés comme des cas spécifiques que si la retenue est de faible surface.

-1 - Hauteur de vague significative

-2- Soulèvement de la surface de l'eau dû au vent

-3- Déferlement de la vague

-4- Dimensionnement en fonction des tranches caractéristiques de la retenue

Protection de la partie aval :

Le talus aval d'un barrage en remblai doit être protégé contre les effets de ruissellement des eaux de pluies. L'enherbement du talus aval est la solution adoptée de façon quasi systématique. La couche de terre végétale de 0,15 mètre d'épaisseur environ est mise en place à la pelle mécanique et/ou au buteur.

Chapitre 6 : Lutte contre les infiltrations et étanchéisation dans les barrages

Pour des remblais de hauteur supérieure à 12 mètres environ, il est recommandé de prévoir une risberme intermédiaire à mi-hauteur du talus aval. Pour des remblais de hauteur supérieure à 15 mètres, cette recommandation devient une quasi exigence. Cette risberme a le double intérêt :

- De limiter les effets du ruissellement le long de la pente ;
- De permettre un accès à mi-hauteur du talus à des piézomètres ainsi que pour les opérations d'épandage de la terre végétale, d'engazonnement et d'entretien ultérieur.

5. Fondation du barrage

• Introduction :

Dans le cas du barrage de souk telatha, le sol des fondations est un massif rocheux fissuré. Dans le cas du traitement de massif rocheux affectés par des fissures générant des circulations d'eau, le but de l'injection est de les remplir totalement. Les forages exécutés dans ce type d'encaissant doivent rester ouverts sur une grande longueur sans risque d'éboulement. Il est possible d'injecter en une seule fois des tranches de terrain de plusieurs mètres, 3 m à 8 m en moyenne. Chaque tranche est appelée passe d'injection.

L'injection des massifs rocheux fissurés est réalisée soit " en remontant ", soit " en descendant ".

L'injection des roches fissurées se fait toujours par séries successives de forages alternés (primaires, secondaires, tertiaires). Les forages primaires sont souvent localisés sur une même ligne, ils sont espacés de quelques mètres. Les secondaires sont exécutés entre deux primaires et les tertiaires entre deux secondaires, venant le cas échéant resserrer la maille des forages.

• Traitement par injection :

Les injections sont des produit liquide (coulis de ciment) qui remplissent des vides existant dans une masse rocheuse on l'injectant par pression à travers des perforations ainsi les propriétés de la masse rocheuse seront modifiées dans le sens désiré. et pour le choix des traitement par injection, plusieurs aspects sont à considérer (Giovanni Lombardi) :

- Faisabilité
- Expansion de la masse par suite de l'injection
- Durabilité des effets bénéfiques
- Aspect économique du traitement
- **Objectif de l'injection :**

Le choix du traitement des fondations du barrage par injection a plusieurs objectifs :

Chapitre 6 : Lutte contre les infiltrations et étanchéisation dans les barrages

- Réduire la perméabilité de la masse rocheuse
- Réduire sa déformabilité
- Augmenter sa résistance particulièrement envers les forces de cisaillement

- **Faisabilité de l'injection**

De nombreuses conditions et circonstances peuvent rendre impossible le processus d'injection à moins que des mesures spéciales soient prises

Ainsi, la présence d'eau en mouvement peut demander l'adjonction de quelques aditifs

Une grande sensibilité de structures avoisinantes (puis ; système de drainage) peut rendre peu souhaitables des travaux d'injection

Des considérations relatives à l'environnement peuvent aussi exclure l'usage de certains produits (Giovanni Lombardi)

- **Durabilité de traitement par injection**

Un certain nombre d'écrans d'étanchéité de barrage ont particulièrement disparus après quelque décennie ; des coulis d'injection très fluide avaient été utilisés et avaient été délavés

Deux conditions doivent être respectées pour qu'un coulis soit bien résistant :

- Une forte résistance et une forte adhérence aux épontes de la discontinuité
- Les pressions d'injection doivent être supérieures à la pression de l'eau à l'intérieur des fissures pour éviter l'infiltration de l'eau à l'intérieur des fissures injectées (Giovanni Lombardi)

Partie 3

Modélisation numérique des infiltrations dans le barrage

*Chapitre 7 : modélisation
numérique*

Introduction :

PLAXIS est un programme d'éléments finis en deux dimensions spécialement conçues pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechniques. Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle plan ou axisymétrique. Le programme utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier

L'interface d'utilisation de PLAXIS se compose de quatre sous-programmes (*Input, Calculations, Output et Curves*).

Présentation de plaxis 2D :

Plaxis V8 est un logiciel géotechnique aux éléments finis spécialement destiné à l'analyse en 2D des déformations et de la stabilité des sols et structures. L'interface d'utilisation de PLAXIS se compose de quatre sous-programmes (Input, Calculations, Output et Curves)

Ces applications géotechniques nécessitent des lois de comportement pour la simulation du comportement des sols et des roches, non linéaire, dépendant du temps et anisotropique. Le programme utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier. La génération du modèle d'éléments finis commence par la création du modèle géométrique, qui est la représentation du problème réel à étudier. Un modèle géométrique consiste en des points, des lignes et des couches. Après la définition de la géométrie, l'utilisateur devra saisir les paramètres relatifs aux matériaux puis, assigner ces jeux de données aux éléments géométriques.

Chapitre 7 : modélisation numérique

Modèle utilisé pour la modélisation de la digue :

Pour la modélisation de la digue ; après avoir ouvert le plaxis la fenêtre des réglages généraux sera ouverte comme suit ; pour faire introduire les paramètres afin d'avoir une planche à dessin sur laquelle l'utilisateur pourra dessiner la géométrie de la digue

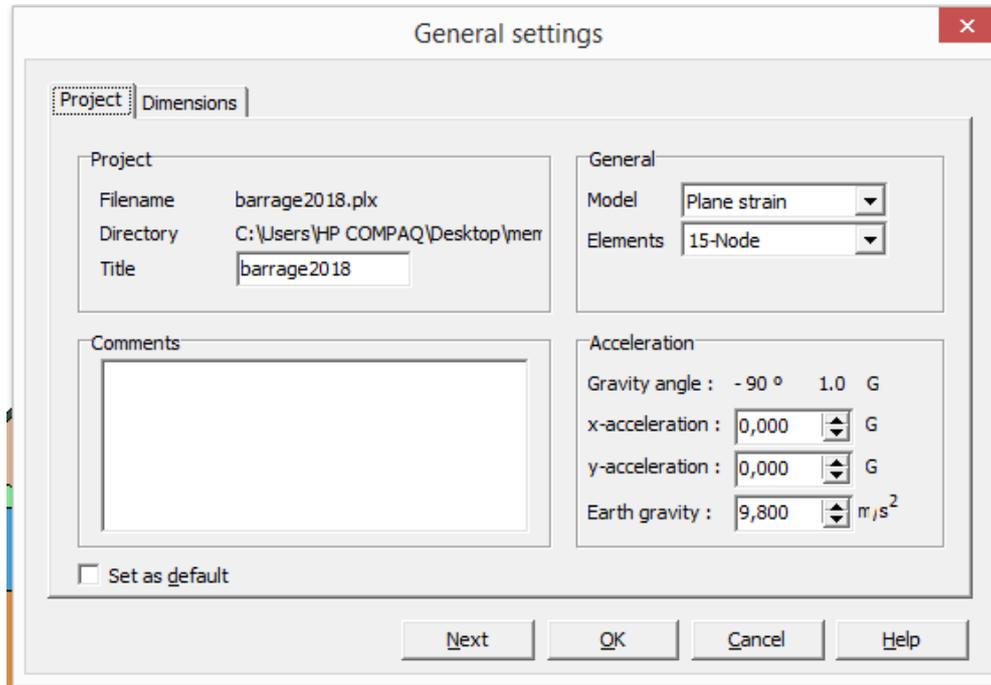


Figure 8.1 : entrée des données du projet

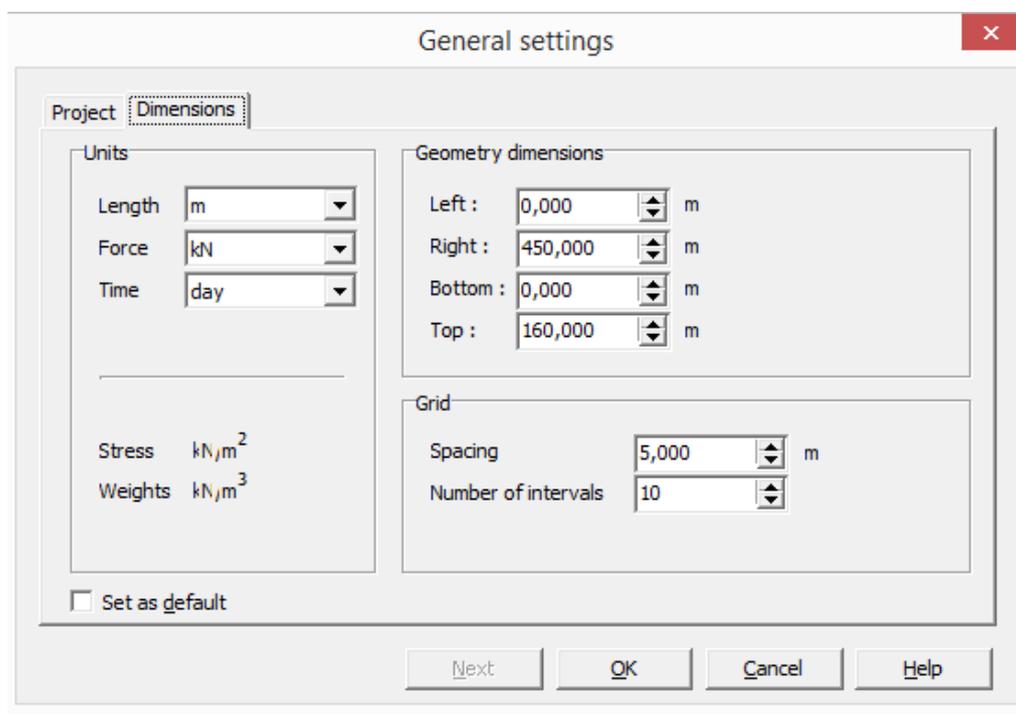


Figure 8.2 : entrée des dimensions du projet

Chapitre 7 : modélisation numérique

Mohr-Coulomb - drain

General Parameters Interfaces

Material Set

Identification: drain

Material model: Mohr-Coulomb

Material type: Drained

General properties

γ_{unsat} : 20,000 kN/m³

γ_{sat} : 205,000 kN/m³

Comments

Permeability

k_x : 864,000 m/day

k_y : 864,000 m/day

Advanced...

Next Ok Cancel Help

Figure 8.4 : Définition de l'état de comportement du sol des différentes couches

- **Modèle de Mohr Coulomb**

Ce modèle se considère comme une première approximation du comportement d'un sol, il comporte cinq paramètres (le module d'Young, le coefficient de poisson, la cohésion, l'angle de frottement et l'angle de dilatance).

Mohr-Coulomb - drain

General Parameters Interfaces

Stiffness

E_{ref} : 3,500E+04 kN/m²

ν (nu): 0,330

Strength

c_{ref} : 1,000 kN/m²

ϕ (phi): 35,000 °

ψ (psi): 0,000 °

Alternatives

G_{ref} : 1,316E+04 kN/m²

E_{oed} : 5,186E+04 kN/m²

Velocities

V_s : 80,300 m/s

V_p : 159,400 m/s

Advanced...

Next Ok Cancel Help

Figure 8.5 : Différent paramètres du modèle de comportement de Mohr Coulomb

- **Le module d'Young**

Chapitre 7 : modélisation numérique

Dans le modèle élastique et le modèle de Mohr Coulomb, Plaxis utilise le module d'Young comme module de déformation de référence. Le choix de ce dernier nécessite un soin considérable, d'ailleurs il est conseillé d'utiliser E_0 pour des argiles très sûr consolidées et quelques roches avec un large domaine élastique, alors que pour les sables et les argiles normalement consolidées, il est préférable de prendre E_{50} .

- **Le coefficient de Poisson**

Le choix d'une valeur pour le coefficient de poisson est particulièrement simple dans le cas du modèle élastique ou du modèle de Mohr Coulomb avec un chargement gravitaire. Dans la plupart des cas, les valeurs de ν seront comprises entre 0,3 et 0,4. Pour le cas du comportement non drainé, le coefficient de Poisson effectif devra être inférieur à 0,35.

- **L'angle de frottement**

L'angle de frottement peut s'obtenir à partir de la courbe intrinsèque du modèle Mohr Coulomb. Dans le code Plaxis, on doit éviter de travailler avec des angles de frottements supérieur à 35° dans des calculs préliminaires pour un projet, car le temps de calcul varie exponentiellement avec de l'angle de frottement.

- **La cohésion**

Il est conseillé aux utilisateurs peu expérimentés d'entrer au moins une valeur faible de la cohésion (prendre $c > 0.2$ kPa) dans le cas des sols purement frottant à fin d'éviter les complications dans des calculs. Pour les couches dans lesquelles la cohésion croît avec la profondeur Plaxis propose une option spéciale dans des paramètres avancés.

- **L'angle de dilatance**

L'angle de dilatance ϕ est donné en degrés, il peut se calculer par la règle suivante :

$$\Phi = \phi - 30^\circ \text{ si } \phi > 30^\circ$$

La valeur ($\Phi = 0^\circ$) correspond généralement aux argiles ou pour les sables de densité faible à moyenne. Pour les sables lâches l'angle de dilatance peut être inférieur à zéro.

Une fois la géométrie de la digue est dessinée et les paramètres des différentes couche de sols sont introduit l'utilisateur obtiendra un résultat comme suit :

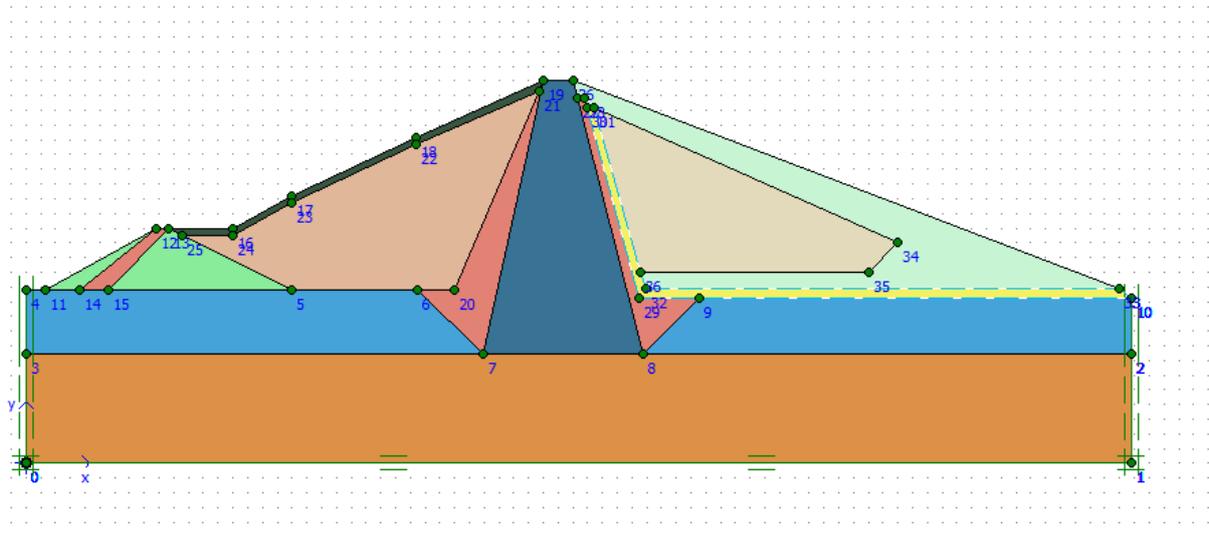


Figure 8.6 : Géométrie du barrage après introduction des différentes couches

- **Maillage**

Le maillage se génère automatiquement, ce qui est un point fort de Plaxis. L'opérateur peut paramétrer la finesse du maillage entre différents options (très grossie, grossie, moyen, fin, très fin), l'utilisateur peut également décider de mailler plus finement une certaine région du sol et le voisinage d'un élément grâce aux options refine dans le mesh menu.

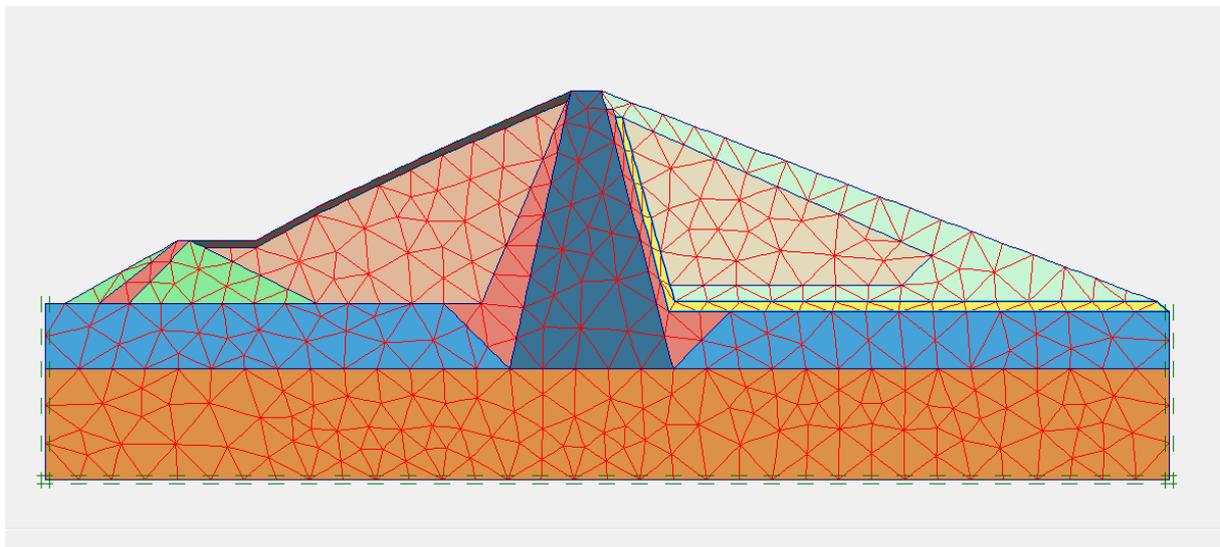


Figure 8.7 : Géométrie après maillage

- **Conditions initiale :**

La définition des conditions initiales se fait en deux étapes distinctes. Tout d'abord, lorsque la fenêtre des conditions initiales s'ouvre, seul le sol est activé. L'opérateur active les éléments constructifs (déplacements, contraintes imposées, ancrage, plaque) qui correspondent à l'instant initial. Il désactive les éléments de sol qui ne correspondent pas à cet instant initial.

Chapitre 7 : modélisation numérique

Un switch bouton permet d'accéder à deux fenêtres différentes, chacune représentant la géométrie de la modélisation :



- La première qui s'appelle *initial pore pressure* permet de définir un niveau de nappe phréatique initial, et de générer les pressions interstitielles correspondantes.

La deuxième fenêtre permet de générer les contraintes initiales à l'intérieur du massif.

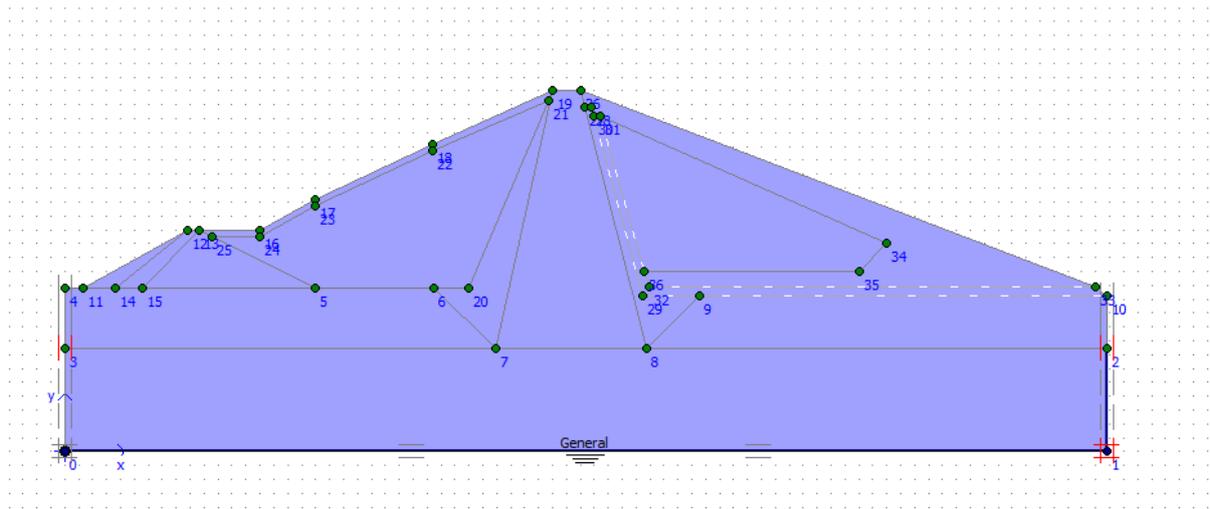


Figure 8.8 : géométrie après génération des conditions initiales

- **Résultats obtenus après calcul :**

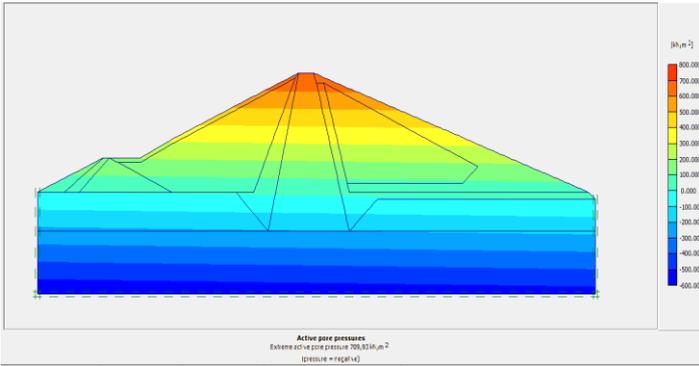
Après avoir fait le calcul ; Plaxis nous donnent les valeurs des paramètres suivants :

- Les pressions interstitielles actives.
- Potentiel hydraulique.
- Le degré de saturation

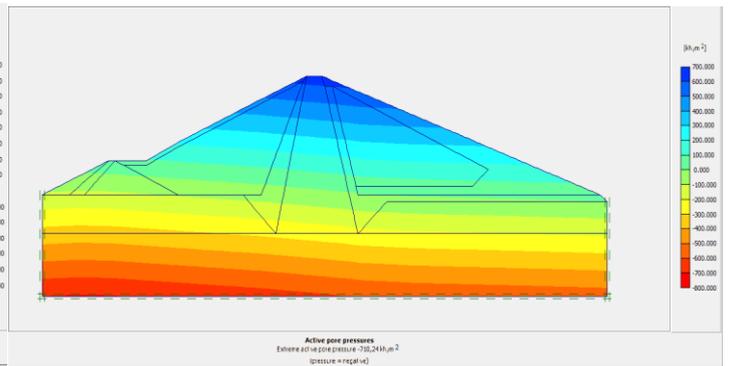
Le calcul est fait sur plusieurs niveaux différents de remplissage du barrage :

Chapitre 7 : modélisation numérique

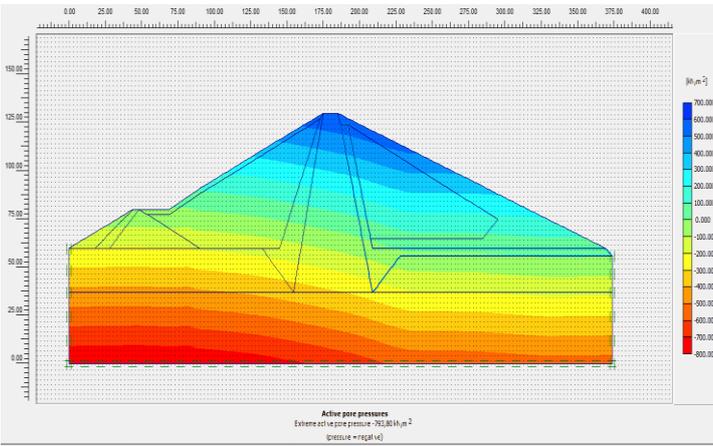
d. Les pressions interstitielles pour différents niveaux de remplissage :



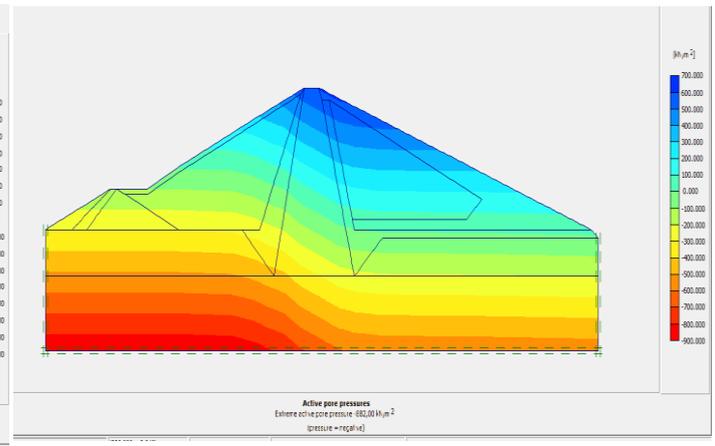
a : pression interstitielle à 60m NGA



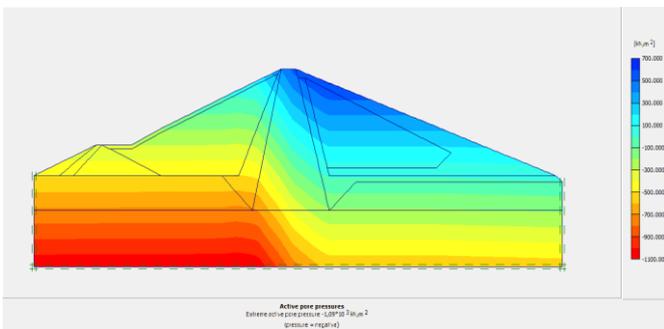
b : pression interstitielle à 70m NGA



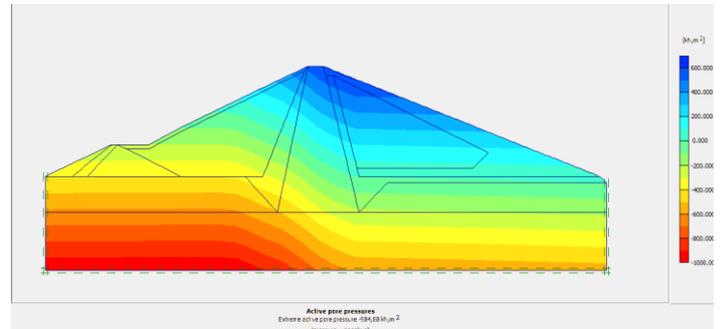
C : pression interstitielle à 80m NGA



d : pression interstitielle à 90m NGA

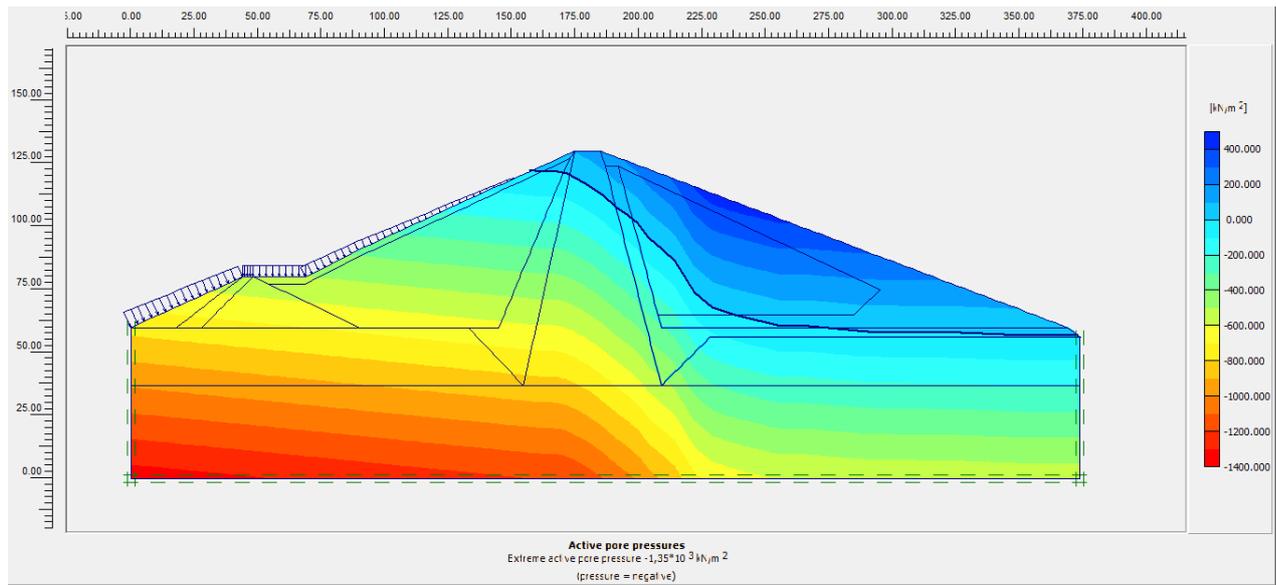


E : pression interstitielle à 100m NGA



f : pression interstitielle à 110m NGA

Chapitre 7 : modélisation numérique



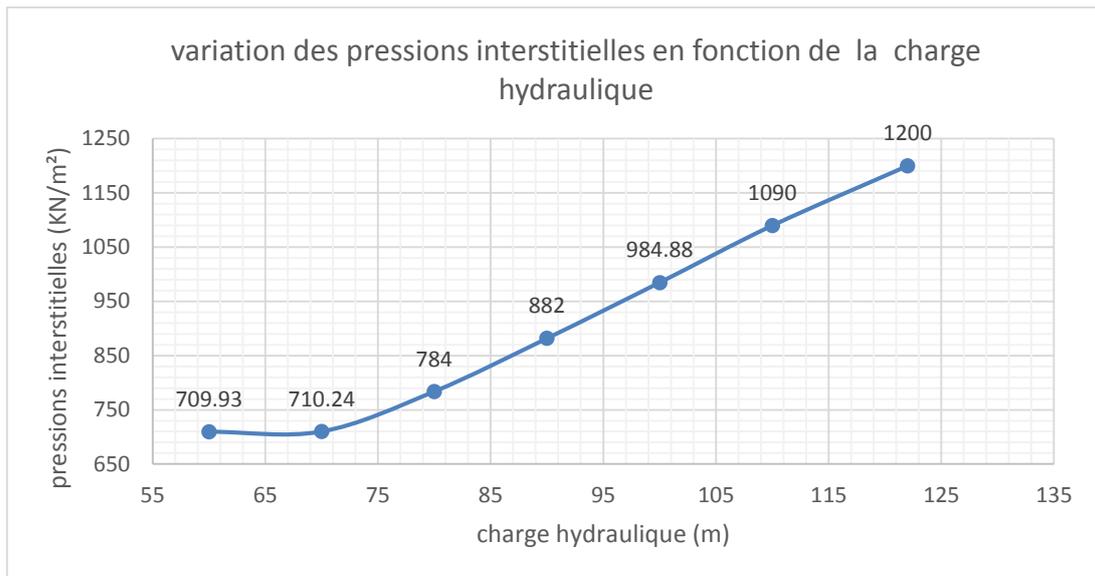
G : pression interstitielle à 122m NGA

Figure 8.9 (a-g) : variation des pressions interstitielles pour différents niveaux de remplissage

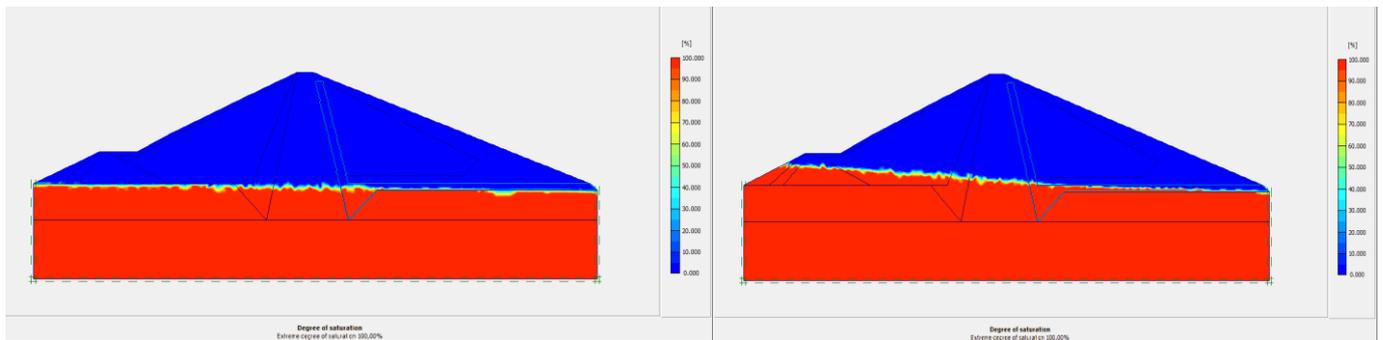
Tableau 8.1 : Valeurs des pressions interstitielles pour différents niveau de remplissage

Charge hydraulique	Pression interstitielle (KN/m ²)
60m NGA	-709.93
70m NGA	-710.24
80m NGA	-784.00
90m NGA	-882.00
100m NGA	-984.88
110m NGA	-1090.00
122m NGA	-1200.00

Chapitre 7 : modélisation numérique

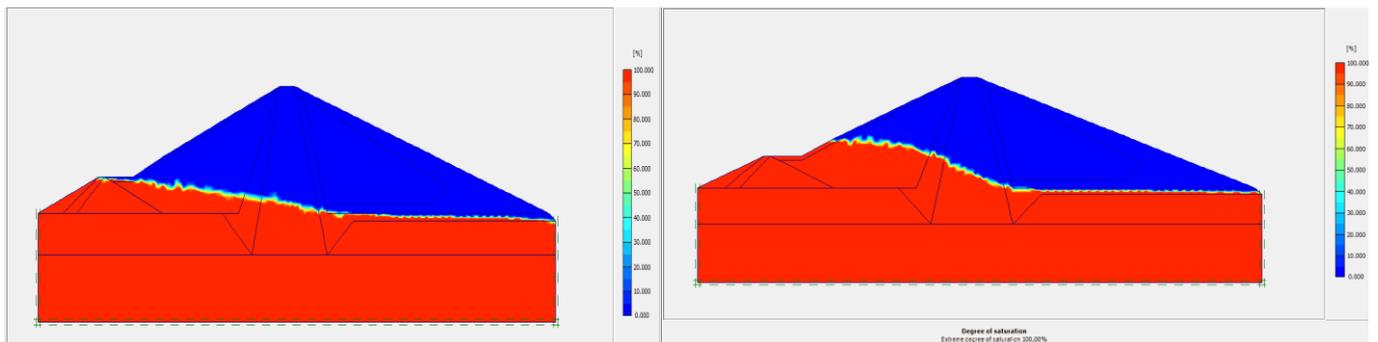


e. Développement du degré de saturation pour différents niveaux de remplissage :



a :degré de saturation à 60m NGA

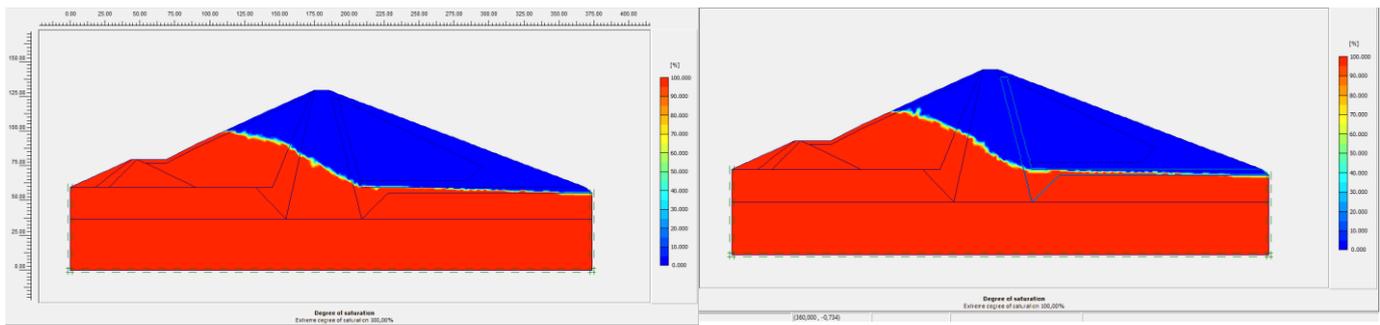
b:degré de saturation à 70m NGA



c :degré de saturation à 80m NGA

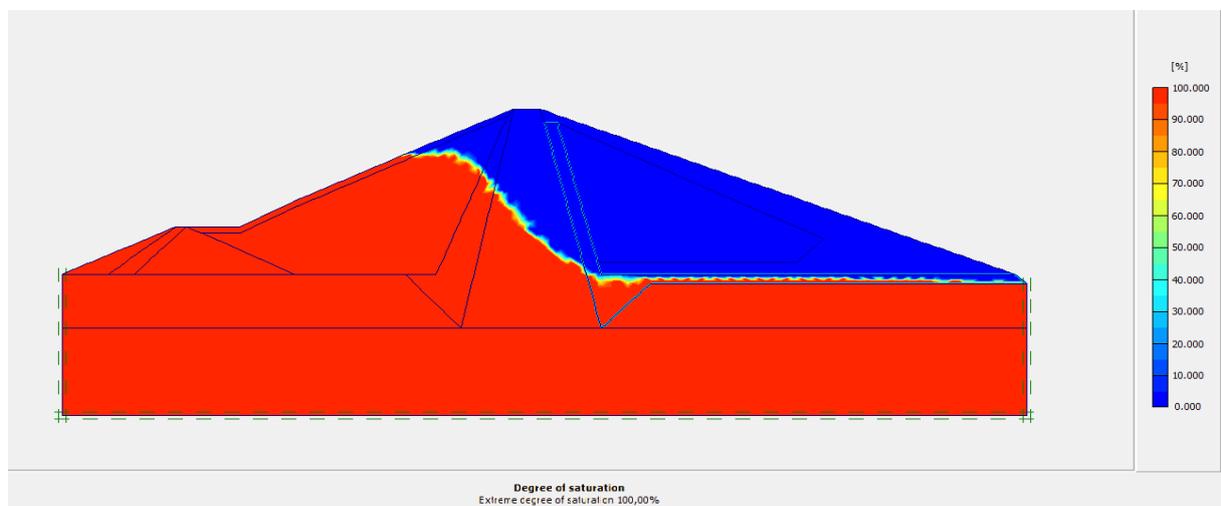
d :degré de saturation à 90m NGA

Chapitre 7 : modélisation numérique



e :degré de saturation à 100m NGA

f :degré de saturation à 110m NGA



g : degré de saturation à 122m NGA

Figure 8.10 (a-g) : Développement du degré de saturation pour différent niveaux de remplissage

f. Interprétation des résultats :

Les pressions interstitielles atteignent le maximum $= -12000 \text{ KN/m}^2$. Les pressions interstitielles augmentent avec l'augmentation du niveau de remplissage de la cuvette du barrage (charge hydraulique) comme indique le graphe.

Les lignes de saturation ont la même allure pour tous les niveaux de remplissage comme l'indiquent les figures (8.9 de a-g) c'est-à-dire au début elles prennent une forme oblique de l'amont du barrage et diminuent jusqu'au pied du noyau, ensuite elles prennent une forme horizontale pour s'annuler au pied du drain.

Le degré de saturation reste le même et égal à 100% au-dessous de la ligne de saturation, et diminue au-dessus de la ligne de saturation, avec apparition de l'effet de succion entre la partie saturée du barrage et la partie humide.

Conclusion générale :

Dans ce travail réalisé sur le barrage de Souk-Tleta sur l'oued Bougdoura dans la wilaya de TIZI OUZOU, après avoir consulté et étudié les différents documents et données sur le barrage on peut faire la conclusion suivante :

Le site du barrage étudié représente de bonnes conditions et caractéristiques :

- Topographique
- Géologique
- Hydrologique
- Géotechnique

La hauteur du barrage est de 95 m au-dessus de la fondation du noyau central

La cuvette retiendra 89.5 millions de m³ au niveau de la retenue normale (NNR) fixée à 122m NGA.

Le niveau de la retenue maximale est de 125m NGA.

Une digue de col de 20m de hauteur est réalisée pour barrer la dorsale gauche du barrage.

Le choix du type de barrage a permis l'utilisation des matériaux existants sur le site.

On a pu définir les différents problèmes, aléas et risques des infiltrations sur les barrages en terre. Les différentes causes de rupture des barrages sont :

- Techniques
- Naturelles
- Humaines

Les différentes méthodes et solutions pour la lutte contre les infiltrations et l'étanchéisation des barrages et leurs fondations.

Le travail de modélisation a montré que les pressions interstitielles, la charge hydraulique, et le degré de saturation sont proportionnels au niveau de remplissage de la cuvette du barrage.

Les matériaux utilisés dans la construction du barrage présentent de bonnes caractéristiques pour l'étanchéisation du barrage.

Bibliographie :

Afiri R. , 2011-2012 : étude de faisabilité d'un barrage en terre : barrage de souk Tlata
Mémoire de Master 2 (Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou).

Afiri R. , Gabi S. , 2017 : Finite element slope stability analysis of Souk Tleta dam by shear strength reduction technique. Journal Innovative Infrastructure Solutions. Springer.

Berkal K. , 2011 : étude de faisabilité d'un barrage en terre sur l'Oued Bougdoura. Mémoire ingénieur. Ecole nationale supérieure de l'hydraulique Arbaoui Abdellah.

Cherchem N. ,2012-2013 : étude du barrage de Souk Tlata sur l'Oued Bougdoura. Mémoire master 2 (Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou).

Dahlab F. ; Ouzzir S. ; Senoussi H. , (étudiants)2005 : étude d'infiltration dans un barrage en terre par la méthode des éléments fini (université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou)

Guenoun O ; Kelali N. , (etudiants) 2002-2003 : hydrologie de bassin versant de l'Oued Bougdoura. Mémoire master 2 (Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou).

Jacques L. , 2005 • 2006 : Cours géotechnique1, Chapitre 2 : Institut National des sciences appliquées de Toulouse. Département de Sciences et Technologies Pour l'Ingénieur.

Messaïd B. , 2009 : Etude de la position efficace des drains dans les barrages en terre, thèse doctorat en science hydraulique de l'Université Colonel Hadj- Lakhdar-Batna.

Larousse. , Encyclopédie 2018[en ligne] (page consulté le 15/07/2018)

<http://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/barrage/25759>

Lombardi G. , 1991 Avant-projet détaillé du barrage de souk tlata EPFZ/OTIA/SIA- ING conseil ASIC Suisse

SCRIBD., Barrage en remblais. PDF 2018[en ligne] (page consulté le 05/08/2018)

<https://fr.scribd.com/doc/157687833/Barrage-en-remblai-pdf>

TalaTizi A. ,2014 étude des infiltrations à travers une digue en terre (cas d'un barrage algérien). Mémoire de magistère (Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou).