

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## **Mémoire de Master**

**Présenté à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma**

**Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Département de : Génie Civil & Hydraulique**

**Spécialité : Travaux Publics**

**Option : VOIES ET OUVRAGES D'ART**

**Présenté par : Aouabdi Besma et Merbai Narimane**

---

---

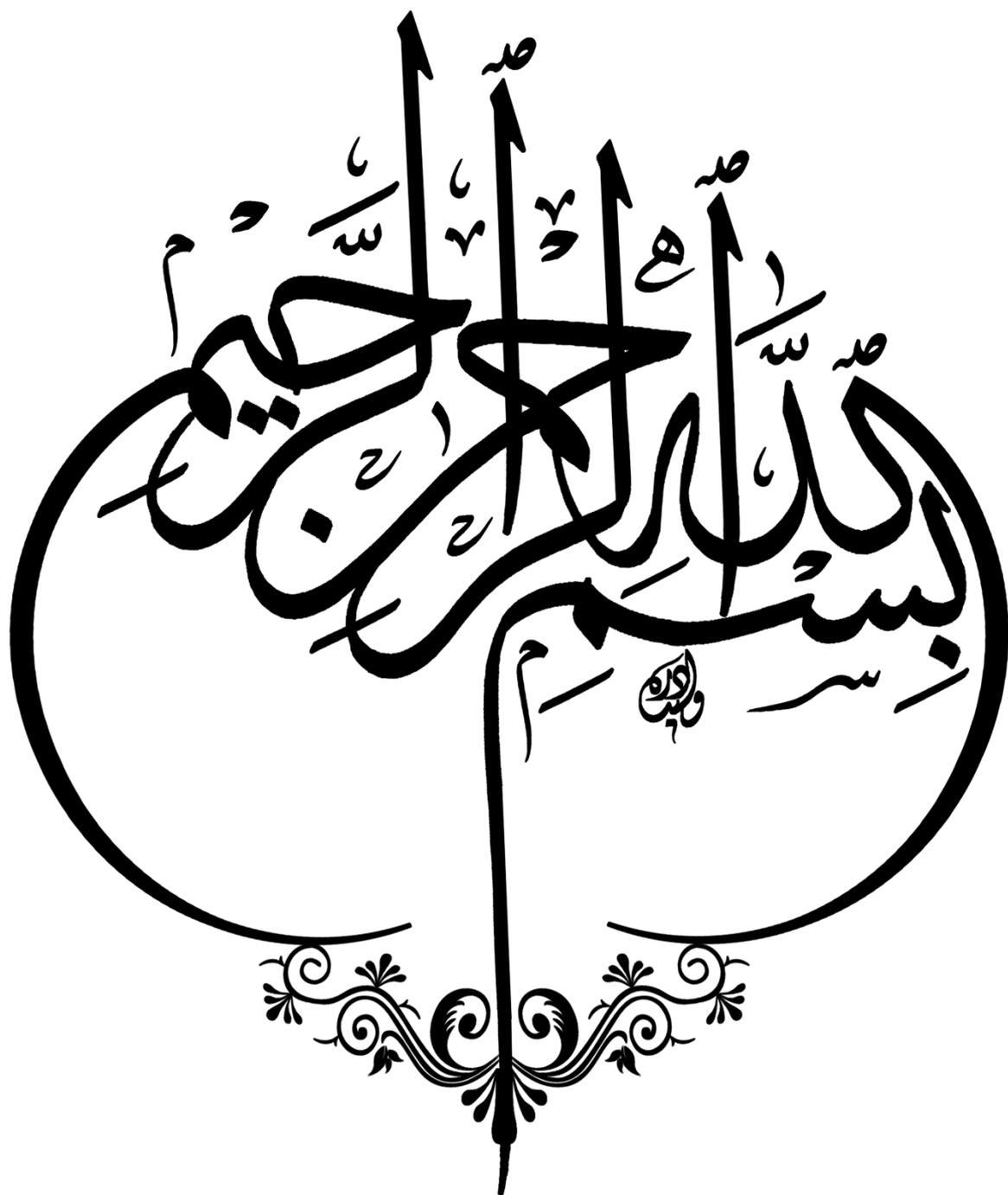
### **Etude numérique d'un Barrage En terre " Cas du barrage de Zit -El – Emba Wilaya de Skikda"**

---

---

**Sous la direction de : Mme Bouragbi Née Lekouaghet Nassima**

**Juin 2024**



# Dédicace



Au nom de Dieu le clément et le miséricordieux

Celui qui a dit que j'étais à elle 'l'a eu'

Et je suis à elle, et si elle refuse contre sa volonté, je l'amènerai. Je l'ai suivi et embrassé aujourd'hui avec une grande gloire. Je l'ai fait après que c'était des chemins et des chemins Difficiles dans lesquels j'ai beaucoup perdu, mais je suis 'arrivé'.

Tout d'abord je tien à remercier dieu le tout puissant.

Je dédie ce modeste travail à ma mère ainsi qu'à mon père. Ils ont su être à mes côtés dans les moments difficiles sans lesquelles je n'aurais pas abouti à ce stade dans mes études, ainsi que chaque instant de bonheur qu'ils m'ont procuré, fasse dieu que je puisse les honorées.

Le projet de fin d'étude qu'on a l'honneur de présenté ici, a été exécuté et mené à bien grâce à la participation exceptionnelle de notre encadreur.

Mes frères : islem, rami, nader, eyad que j'aimes beaucoup.

Mes sœurs : Hadia, houda, Besma,

A toutes ma grande famille, qui m'a soutenu depuis tout le temps.

A toutes mes tantes, mes oncles et mes cousins.

Mes amies : Malek, Rahma, Randa, Abir, Rabab, Rami, Ikram, Kader, sami, attef, Amina, Lilya, Sara, Wissem, ...

A mon binôme Besma qui était ma sœur durant tout le cycle d'étude. A tous mes collègues et mes copains. A tous les enseignants de l'université 8 MAI 1945 en particulier les enseignants de département de génie civil.

# Dédicace

Je dédie cet humble travail avec grand amour :

A l'homme de ma vie mon exemple éternel, mon soutien moral, celui qui s'est toujours sacrifié pour ne voir réussir à toi mon père Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

A ma très chère mère

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, à qui je dois la vie  
: maman que j'adore

Je voudrais remercier mes sœurs, son mari et mes cousines,

Qui m'ont soutenu tout au long de ce projet A

tous mes amis, tous mes professeurs.

A mon binôme Lina qui était ma sœur durant tout le cycle d'étude.

Et à toutes les personnes qui me sont chères



## **REMERCIEMENTS**

*Tout d'abord Nous remercions **Allah** le tout puissant de nous avoir donné la Volonté et le Courage de mener à bien ce travail.*

*A l'issu de cette étude, Nous tenant à exprimer nos vifs remerciements à Toutes les personnes qui Nous ont aidés tout au long de notre travail.*

*Nous tenons particulièrement à remercier notre encadreur Dr. Bouragbi Née Lekouaghet Nassima & Dr. Benamara fatima zahra pour la patiente et l'aide durant tout l'encadrement*

*Et Pour la confiance qu'il nous a témoignée et la liberté qu'il nous a laissée.*

*Notre remerciement s'adresse aussi à tous nos enseignants de filière de science et technique surtout les enseignants du département de génie civil et hydraulique et tout le personnel administratif de l'université 08 mai 1945 de Guelma, sans oublier les responsables de la bibliothèque qui nous ont beaucoup facilité notre recherche bibliographique.*

*Un grand merci qui s'adresse également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail, et qui nous feront le plaisir d'apprécier*

*Merci aussi à tous les ingénieurs et les travailleurs de la direction de l'agence national des barrages de la wilaya de Skikda.*

*Enfin nous adresse nos sincères remerciements à nos familles et toute personne ayant participé de près ou de loin la réalisation de ce modeste projet.*

***A toutes et à tous ces personnes***

***Mille Merci***

## **Résumé :**

Depuis la plus haute Antiquité, les hommes ont pétri la terre pour en faire des digues soit le long des cours d'eau potable ou d'eau destinée aux irrigations.

Ces digues ou barrages sont parmi les constructions humaines les plus importantes qui tiennent une place de choix de par leur utilité dans la gestion des ressources en eau. Représentant 70% des barrages dans le monde, les barrages en remblai sont construits en matériaux locaux et ont la grande qualité de convenir aux fondations meubles qui ne peuvent supporter un ouvrage en béton.

Quel que soit le type de barrage et qu'il soit en projet, en construction, en exploitation, un problème permanent est posé : celui de sa sécurité.

La rupture des barrages a toujours de lourdes conséquences, ainsi les études de la stabilité continuent à faire l'objet de nombreuses recherches scientifiques. La stabilité des barrages en terre dépend de leur géométrie, des propriétés des matériaux utilisés et des forces auxquelles ils sont soumis.

Ce travail vise à évaluer la stabilité d'un modèle type de barrage en terre en fin de construction et pendant le remplissage ou la vidange du barrage par le biais de la modélisation numérique en s'appuyant sur le code de calcul numérique Plaxis.

### **Mots clés :**

- Barrage en terre
- Modélisation numérique
- Géotechnique
- Plaxis-Méthode des éléments finis, stabilité

## **Summary :**

Since ancient times, men have kneaded the earth to make dikes either along drinking water courses or water intended for irrigation. These dikes or dams are among the most important human constructions which hold a special place due to their usefulness in the management of water resources. Representing 70% of dams in the world, embankment dams are built from local materials and have the great quality of being suitable for soft foundations which cannot support a concrete structure.

Whatever the type of dam and whether it is planned, under construction, or in operation, a permanent problem arises: that of its safety.

The failure of dams always has serious consequences, so stability studies continue to be the subject of numerous scientific research. The stability of earth dams depends on their geometry, the properties of the materials used and the forces to which they are subjected.

This work aims to evaluate the stability of a typical earthen dam model at the end of construction and during filling or emptying of the dam through digital modeling based on the plaxis digital calculation code.

### **Keywords:**

- Earth dam
- Numerical modeling
- Geotechnics
- Plaxis
- Finite element method, stability

## ملخص :

ان السدود على طول مجاري مياه الشرب أو المياه المخصصة للري.

وتعتبر هذه السدود من أهم الإنشاءات البشرية التي تحظى بمكانة خاصة نظرًا لفائدتها في إدارة الموارد المائية. تمثل السدود 70% من السدود في العالم، وهي مبنية من مواد محلية وتتميز بجودة رائعة لكونها مناسبة للأساسات الناعمة التي لا يمكنها دعم الهيكل الخرساني. ومهما كان نوع السد وسواء كان مخططًا له، أو قيد الإنشاء، أو قيد التشغيل، تنشأ مشكلة دائمة: مشكلة سلامته.

دائمًا ما يكون لفشل السدود عواقب وخيمة، لذلك تظل دراسات الاستقرار موضوعًا للعديد من الأبحاث العلمية. ويعتمد استقرار السدود الترابية على هندستها، وخصائص المواد المستخدمة، والقوى التي تتعرض لها.

يهدف هذا العمل إلى تقييم ثبات نموذج سد ترابي نموذجي في نهاية الإنشاء وأثناء ملء أو تفريغ السد من خلال النمذجة الرقمية بالاعتماد على كود الحساب الرقمي البلاكسي.

## الكلمات المفتاحية:

السد الأرضي

- النمذجة العددية

- الجيوتقنية- البلاكسي

-طريقة العناصر المحدودة، الاستقرار



# **Sommaire**

## Sommaire

Résumé	I	
Abstract	II	
ملخص	III	
Sommaire	III	
Liste des figures et des courbes	V	
Liste des tableaux	VI	
Introduction générale	VII	
<b>Chapitre 1 : Généralités sur les Barrages en terre</b>		
1.1.	Introduction	3
1.2.	Classification des barrages selon la nature du matériau de construction	5
1.2.1	Les barrages rigides	5
1.2.2	Les barrages souples	5
1.3.	Classification des barrages en terre	6
1.3.1	Barrage en terre homogène	6
1.3.2	Barrage en terre hétérogène ou zone	7
1.3.3	Barrage à masque amont	7
1.3.4	Barrage à membrane centrale	9
1.4.	Avantages et particularités des barrages en terre	9
1.5.	Sécurité des barrages en terre	10
1.6.	Conception des éléments principaux dans les barrages en terre	12
1.6.1	Les éléments de la géométrie	12
1.6.2	Les volumes d'eau	15
1.6.3	La Largeur en crête du barrage (bcr)	16

1.6.4	La pente des talus	16
.		
1.6.5	La couche de protection des parements	17
.		
1.7	Système de protection contre les effets de l'eau (les Drains et les filtres) :	20
1.7.1	Rôle des drains et des filtres	20
.		
1.7.2	Méthode de protection contre l'érosion interne :	20
.		
1.7.3	Les drains et les filtres	21
.		
1.8.	Les Facteurs influençant la conception et la réalisation des barrages en remblais	22
1.9.	Problématique d'alluvionnement des retenues et ses solutions	23
1.9.1	Cause d'alluvionnement des retenues	23
1.9.2	Les mesures contre l'alluvionnement	24
.		
1.9.2	Mesures dans le bassin versant	25
.1.		
1.9.2	Mesures dans la retenue	26
.2.		
1.9.2	Mesures au barrage	26
.3.		
<b>Chapitre 2 : Méthodes d'analyse de la stabilité d'un barrage en terre</b>		
2.1.	Introduction	27
2.2.	Rupture de barrage	27
2.2.1	Causes de rupture des barrages	28
.		
2.2.2	Les conséquences de la rupture	28
.		
2.2.3	Les types de rupture	29
2.2.4	Calcul à la rupture	29
.		
2.2.5	Les risques de rupture des barrages	29
.		
2.3.	Notion de coefficient de sécurité $F_s$	29
2.4.	Les méthodes analytiques d'analyse de stabilité des talus	31
2.4.1	Les méthodes globales	31
.		

2.4.2	Les méthodes des tranches	32
2.4.3	La méthode des Coins	32
.		
2.5.	Méthode des tranches de BISHOP et FELLENIUS	33
2.5.1	Exposé du problème	33
.		
2.5.2	Hypothèses	33
.		
2.5.3	Etude de l'équilibre d'un talus par les méthodes de BISHOP et de FELLENIUS	34
.		
2.5.3	Méthode des tranches de FELLENIUS	34
.1.		
2.5.3	Méthode des tranches de BISHOP	37
.2.		
2.5.3	Méthode de BISHOP simplifié	38
.3.		
2.6.	Les méthodes numériques	39
2.6.1	La méthode des éléments finis	39
.		
2.6.2	La méthode des différences finies (MDF)	41
.		
2.7.	Conditions d'analyse de la stabilité d'un barrage en terre	41
2.7.1	Fin de construction	41
.		
2.7.2	Période d'exploitation	42
.		
2.7.3	Vidange rapide	42
.		
2.8.	Facteurs de sécurité minimaux	43
2.9	Exemple de la rupture par la submersion	44
2.9.1	2.9.1. Exemple de rupture par l'érosion régressive	45
.		
<b>Chapitre 3 : présentation de la zone d'étude</b>		
3.1.	Introduction	3
3.2.	Présentation du barrage de Zit-El-Emba	3
3.2.1	Situation Géographique	4
.		
3.2.2	Situation du barrage de Zit El Emba Le barrage de Zit El Emba	5
.		

3.2.3	Destination et rôle du barrage	6
3.2.5	Sol	8
3.3	Hydro climatologie	9
3.3.1	Aspect du climat	9
3.3.2	Les précipitations	10
3.3.3	Température	13
3.3.4	L'humidité et vent	18
3.4.	Milieux physiques	18
3.4.1	Délimitation du bassin versant	18
3.5.	Présentation de la wilaya de Skikda	18
3.6.	Présentation du site d'étude (Barrage de Zit-Emba)	19
3.7.	Cadre géologique de la région d'étude	42
3.8.	Etude Climatique	42
3.8.1	La température	43
3.2.5	Sol	8
3.3	Hydro climatologie	9
3.3.1	Aspect du climat	9
3.3.2	Les précipitations	10
3.3.3	Température	13
3.3.4	L'humidité et vent	18
3.4.	Milieux physiques	18
3.4.1	Délimitation du bassin versant	18
3.5.	Présentation de la wilaya de Skikda	18
3.6.	Présentation du site d'étude (Barrage de Zit-Emba)	19
3.7.	Cadre géologique de la région d'étude	42
3.8.	Etude Climatique	42

3.8.1	La température	43
.		
3.8.2	Les précipitations	44
.		
3.8.3	L'humidité relative	44
.		
3.8.4	Le vent	44
.		
3.9.	Exploitation de Site	47
3.10.	Dispositifs de protection contre l'érosion interne	63
3.10.	Le drain	63
1		
3.10.	Le filtre	63
.		
3.12	Disposition des drains et des filtres dans un barrage en terre	64
3.12.	Drain tapis filtrant	64
1		
3.12.	Drain vertical	65
2		
3.13.	Etude piézométrique dans le barrage de Zit El Emba	66
3.14.	Types de piézomètres	74
3.3.2	Les précipitations	10
.		
3.3.3	Température	13
.		
3.3.4	L'humidité et vent	18
<b>Chapitre4 : Analyse numérique de stabilité du barrage en terre de Zit-Emba par Plexis</b>		
4.1	Présentation du logiciel Plexis	69
4.2	Fonction et domaine d'application	69
4.3	Les modelés des matériaux	69
4.3.1	Modèle élastique linéaire	70
.		
4.3.2	Modèle de Mohr-Coulomb	70
.		
4.4	Type de comportement des matériaux (drainée, non drainée, non poreux)	72
4.5.	Étapes de modélisation	73

4.5.1	Partie input Plexis	75
.		
4.5.2	Partie maillage et calcul	76
.		
4.5.3	Partie output Plexis	79
.		
4.6.	Caractéristiques géotechniques des sols du barrage	79
4.7.	Phases de calcul de stabilité	81
4.7.1	Phase fine de construction (barrage vide)	82
.		
	Conclusion.	84
	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>89</b>
	Références bibliographique	90

## Liste des figures

Le numéro	Le titre	La page
<b>CHAPITRE I</b>		
1.1	Coupe schématique de la structure du barrage Saad El Karafa sur le wadi-Garawi	3
1.2	Evolution du nombre de barrage dans le monde (hauteur >15m)	4
1.3	Types des barrages en béton (barrage rigide).	5
1.4	Types des barrages en remblai (barrages souple).	6
1.5	Barrages en terre homogène avec drain	6
1.6	Barrages en terre en terre hétérogène ou zone	7
1.7	Coupe d'un barrage en terre en terre à masque	8
1.8	Mise en place du masque de barrage zit El Emba	8
1.9	Barrages en terre avec membranes centrales	9
1.10	Coupe transversale d'un barrage en terre	12
1.11	Définition des cotes NNR et NPHE	13
1.12	Ligne de fetch (ABEST, 2017)	14
1.13	La hauteur des vagues (ABEST,2017)	14
1.14	Schéma de répartition des tranches dans la retenue	15
1.15	Les méthodes de protection de la face amont (Google image)	18
1.16	Protection du talus aval avec des galets dans le barrage de Jordanelle, Utah, USA (USBR, 2012)	19
1.17	Protection végétale du talus aval du barrage de Coggins, Oregon (USBR, 2012)	19
1.18	Photo imaginaire du barrage en fin de construction.	20
1.19	Un barrage homogène avec drain dans la face aval (Kunitomo, 2000)	21
1.20	Les drains filtrant retenir les matériaux fins et évacuer les débits et pressions d'eau	21
1.21	Types de fondation de barrage en remblai <b>sur rocher</b> :( a) noyau ;(b, c, d) corps d'appui de qualité différente.	22
1.22	Types de fondation de barrage en remblai <b>sur matériaux meubles</b> : (a) noyau ; (b, c) corps d'appui de qualité différente.	22

1.23	Représentation schématique d'un courant de turbidité dans une retenue (selon De Cesare, Boillat, 1998).	24
1.24	Vue d'ensemble des mesures préventives et rétroactives pour lutter contre l'alluvionnement (selon schleiss et oehy, 2002)	25
<b>Chapitre2</b>		
2.1	Surface de rupture d'un talus	31
2.2	Surface de cisaillement d'un talus.	32
2.3	Surface de rupture approchée par 2 lignes droites.	33
2.4	Découpage d'un talus en tranches élémentaires.	34
2.5	Etude de l'équilibre d'une tranche (i)	35
2.6	Division d'un barrage en éléments finis	40
2.7	Surface de rupture les plus critiques en fonction du type de barrage en terre	42
2.8	Glissement du parement amont sous l'effet de vidange rapide	43
2.9	Photo du Barrage de Swift aux USA avant la rupture.	44
2.10	Etat final de la rupture du barrage de Swift.	45
2.11	Photo de vue du barrage de Teton (rive nord proche de l'évacuateur).	46
2.12	Rupture du barrage de Teton.	46
<b>Chapitre3</b>		
3.1	Photo du barrage de Zit-El-Emba	50
3.2	Photo par satellite de l'emplacement du barrage de Zit-El-Emba	51
3.3	Photo satellite du sol de la région d'étude (Zit El Emba)	52
3.4	L'extrait de la carte topographique d'Algérie 2016	55
3.5	Situation géographique de la Wilaya de Skikda	55
3.6	Carte géographique des communes de la Wilaya de Skikda	56
3.7	Variation de la température moyenne mensuelle : station de Skikda (1997-2012).	58
3.8	Variation des précipitations moyennes mensuelles : station de Skikda (1997-2012)	59
3.9	Variation de l'humidité moyenne mensuelle : station de Skikda (1997-2012)	60
3.10	Variation de la vitesse moyenne mensuelle du vent : station de Skikda (1997-2012).	60

3.11	Photo prise de la rive gauche représentant une vue générale du barrage Zit El Emba	62
3.12	(PON) à manomètre dans la galerie du barrage de Zit El Emba d'un drain	63
3.13	Drain tapis filtrant	64
3.14	Représentation schématique de la piézométrie	66
3.15	Photo d'un piézomètre dans le barrage de Zit El Emba	66
3.16	Schéma du piézomètre ouvert (ANBT)	67
<b>Chapitre 4</b>		
4.1	Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb	70
4.2	Pyramide de Mohr-coulomb tracée pour $c=0$	71
4.3	Surface de rupture dans l'espace des contraintes principales	72
4.4	Fenêtre principale du programme d'entrée des données	73
4.5	Fenêtre principale du programme de calcul	74
4.6	Barre d'outils de la fenêtre principale du programme Output	74
4.7	Organigramme de la structure du plexis code	75
4.8	Représentation du modèle géométrique du barrage avec les conditions aux limites	77
4.9	Représentation du maillage	78
4.10	Représentation des phases de calcul	79
4.11	Niveau de la nappe phréatique en fin de construction du barrage	79
4.12	Maillage initial de profil	84
4.13	Représentation du modèle géométrique du barrage avec les conditions aux limites	86
4.14	Représentation du maillage	87
4.15	Représentation des phases de calcul	88
4.16	Niveaux de la nappe phréatique en fin de construction du barrage	89
4.17	Déformation de la mèche en fin de construction du barrage	89

<b>4.18</b>	représentation de maillage dans barrage plein	91
<b>4.19</b>	Coefficient de sécurité FS en fin de construction du barrage	100

## Liste de tableaux

Numéro	Le titre	La page
<b>Chapitre 1</b>		
<b>1.2</b>	Largeur minimale en crête	<b>16</b>
<b>1.3</b>	Pente des talus pour pré dimensionnement	<b>17</b>
<b>Chapitre 2</b>		
<b>2.1</b>	Les accidents les plus graves entre 1959 et 1987	<b>44</b>
<b>2.2</b>	Résultats de simulation de coefficient de sécurité $F_s$	<b>47</b>
<b>Chapitre 3</b>		
<b>3.1</b>	Précipitations moyennes mensuelles	<b>53</b>
<b>3.2</b>	Pluies annuelles de 15 ans.	<b>53</b>
<b>3.3</b>	Température moyennes mensuelles de 20 ans	<b>54</b>
<b>3.4</b>	Caractéristiques techniques de barrage de Zit-Emba (ANBT).	<b>57</b>
<b>3.5</b>	Températures moyennes mensuelles en °C (1997-2012).	<b>58</b>
<b>3.6</b>	Précipitations moyennes mensuelles en mm (1997-2012).	<b>59</b>
<b>Chapitre 4</b>		
<b>4.1</b>	Caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux utilisés	<b>77</b>
<b>4.2</b>	Propriétés matérielles du barrage et du sous-sol	<b>82</b>

# ***Introduction Générale***

**M2-VOA  
AU : 2023-2024**

## *Introduction Générale*

Les barrages en terre représentent quantitativement l'essentiel des barrages réalisés en Algérie. Leur nombre continue à se développer en raison du fort accroissement des besoins en eau. Ces ouvrages exigent toujours une grande fiabilité en matière de sécurité. De nombreux chercheurs se sont particulièrement penchés sur l'étude de la stabilité des structures en sols en générale et les barrages en terre en particulier, dans le but de dégager des méthodes de calcul plus sophistiquées.

Les chercheurs, de leurs côtés, ne cessent de développer des modèles de comportement pour les sols, afin de mieux approcher la réalité. Par ailleurs, les barrages en remblais étant affectés par des phénomènes complexes tels que les glissements, déformations, colmatage, perte d'étanchéité, érosion interne et externe etc..., qui influencent la performance de l'ouvrage et de ses composants.

L'étude de la stabilité d'un barrage en terre met en jeu les méthodes générales d'étude de la stabilité des talus parmi les plus utilisées. Aussi la stabilité d'une digue en terre doit elle être vérifiée à différents stades de son histoire :

- Pendant et en fin de construction de sa construction,
- Lorsque l'eau est à son niveau maximal dans la retenue c'est-à-dire dans les conditions normales d'exploitation.
- Lorsque l'on abaisse rapidement le niveau de l'eau dans la retenue (vidange rapide) et qu'un écoulement Permanent s'est établi à travers l'ouvrage,

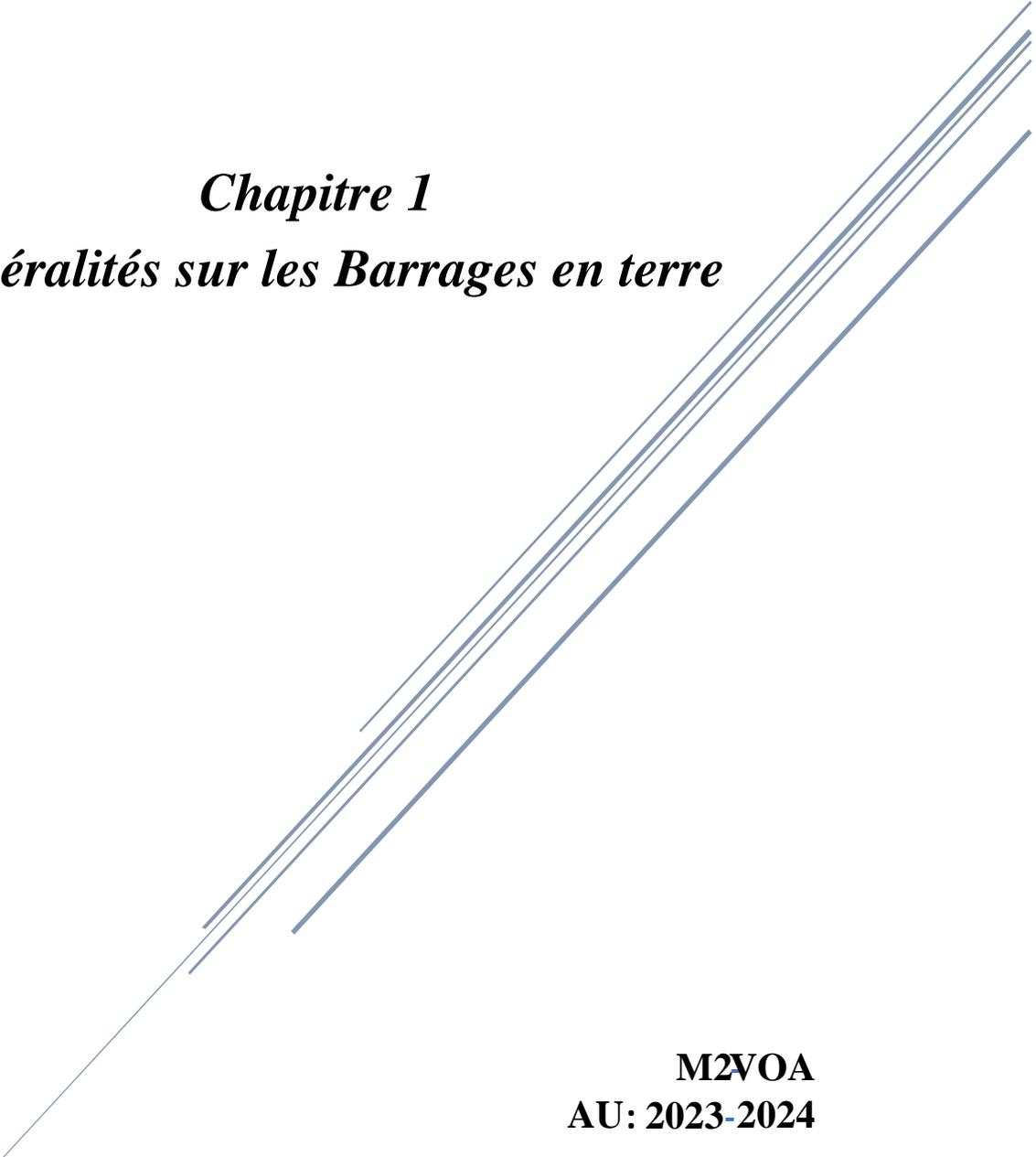
Les caractéristiques de l'ouvrage sont déterminées le plus souvent par son comportement au cours des deux derniers stades.

Dans cette perspective, l'objectif de notre travail est d'exposer une méthodologie de modélisation d'un barrage en terre en vue de simuler son comportement en termes de déplacements pour vérifier la stabilité de barrage en utilisant la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel Plaxis. Le barrage en terre de Zit-El-Emba wilaya de Skikda est considéré ici comme exemples. Le calcul du coefficient de sécurité est effectué en trois phases : après sa construction (barrage vide), pendant sa première mise en eau (remplissage) et durant la vidange.

Le présent travail nous permet d'analyser la stabilité des barrages à partir de quatre chapitres organisé après une introduction générale comme suite :

- **Le chapitre 01** : Est consacré aux aspects généraux sur les barrages, leurs types, ainsi les paramètres qui peuvent influencer le choix d'un barrage.
- **Le chapitre 02** présente d'abord la définition de la stabilité d'un barrage puis on décrivant les méthodes analytiques utilisées pour évaluer la stabilité des barrages en terre avec les différentes actions qui peuvent la menacer la stabilité des barrages et provoquer un risque, et présente aussi les méthodes numérique d'analyse de la stabilité d'un barrage.
- **Le chapitre 03** Présente le barrage de Zit-El-Emba, sa situation géographique, une synthèse du contexte climatique, hydrologique et les caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux utilisés dans ce projet.
- **Le chapitre 04** Expose le code de calcul par éléments finis ainsi que les modèles de comportement, employés dans les simulations numériques en utilisant le modèle de comportement de Mohr -Coulomb, pour calculer la stabilité du barrage de Zit-El-Emba pour : un barrage vide, un barrage plein et pendant la vidange rapide du barrage.

Enfin les résultats obtenus seront discutés et on clôturé par une conclusion générale.



***Chapitre 1***  
***Généralités sur les Barrages en terre***

**M2VOA**  
**AU: 2023-2024**

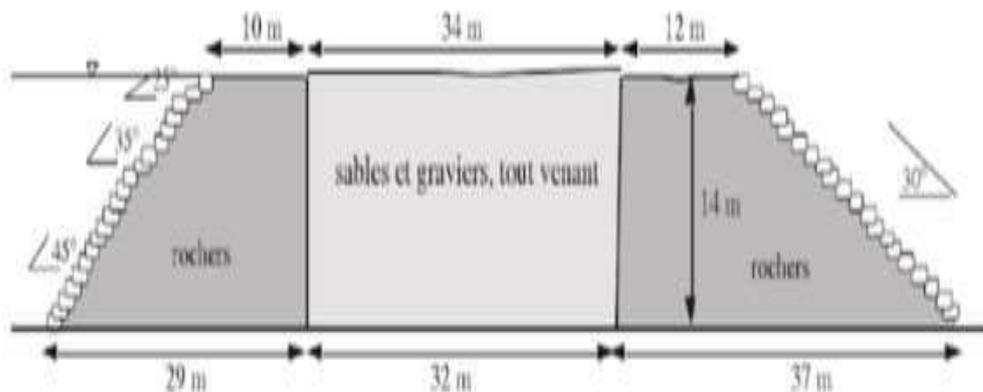
## Chapitre 1 : Généralités sur les Barrages en terre

### 1.1. Introduction :

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

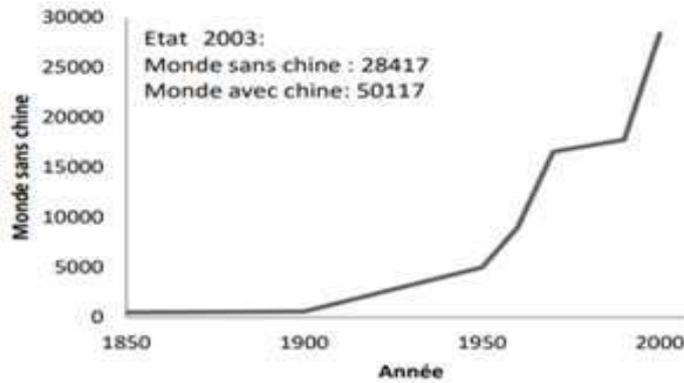
Les barrages en terre sont des structures construites pour retenir l'eau en utilisant principalement des matériaux naturels tels que la terre, le sable, le gravier et la roche. Ils sont conçus pour former des réservoirs d'eau, appelés lacs de retenue, afin de stocker l'eau pour diverses utilisations, telles que l'irrigation, l'approvisionnement en eau potable, la production d'énergie hydroélectrique et la prévention des crues. Les barrages en terre sont généralement construits dans des vallées des rivières ou des cours d'eau.

Les barrages en terre sont composés de différentes couches de matériaux, chacune ayant des caractéristiques géotechniques spécifiques. La couche principale, appelée noyau, est constituée de matériaux argileux ou de matériaux imperméables afin de minimiser les fuites d'eau à travers le barrage. Les couches extérieures, appelées zones de transition et de filtrage, sont composées de matériaux plus perméables qui permettent l'écoulement contrôlé de l'eau. La partie supérieure du barrage, appelée crête, est généralement large et plate pour contenir le réservoir d'eau.



**Figure 1.1** : Coupe schématique de la structure du barrage Saad El Karafa sur le wadi-Garawi [1]

Les projections à 2030 prévoient à ce que le nombre passera à 139 barrages avec une capacité de stockage de 12 milliards de  $m^3$  sur l'ensemble du pays.



**Figure 1.2 :** Evolution du nombre de barrage dans le monde (hauteur >15m) [2]

Les barrages en remblai sont des barrages constitués de matériaux meubles allant de l’argile fine à des éléments très grossiers (enrochements). Ils regroupent plusieurs catégories en fonction de la méthode employée pour assurer l’étanchéité. Ce type d’ouvrage très ancien est le plus communément utilisé, il représente près de 70% du parc mondial des barrages. En Algérie plusieurs barrages sont construits en matériaux meubles, c’est le cas des barrages Hammam Boughrara, Sidi abdelli, Cheffia, Guenitra, Beni Zid, Mexa, Zit El Emba, Fontaine des Gazelles, Deurdeur, Oued Cherf, Foug El Gueiss, Ghrib, Bakhadda, Beni Amrane, El Agrem....

**Tableau 1.1 :** Les barrages Algériens avant 1962 [3]

Nom	Oued	Année de construction	Volume initial (hm <sup>3</sup> )
Meurad	Djabroum	1852-59	0,8
Tlelat	Tlelat	1869-70	0,7
Fergoug	Habra	1865-71 puis 1882	30
Cheurfas	Sig	1880-82	3
Cheurfas	Sig	1886-92	18
Djidiouia	Djidiouia	1857-77	0,7
Hamiz	Hamiz	1869-94	14
O. Fodda	Fodda	1932	228
Boughzoul	Chelif	1934	55
Bakhadda	Mina	1936	56
Ghrib	Chelif	1939	280

Foum El Gueiss	Gueiss	1939	3,4
K'sob	K'sob	1940	12,4
Zardezas	Saf-Saf	1946	14,9
Beni Bahbel	Tafina	1946	63
Bouhanifia	Hammam	1948	73

Voici un résumé des principales généralités à connaître sur les barrages en terre :

Un barrage en terre est un ouvrage de rétention d'eau constitué par un massif de matériaux meubles compactés (essentiellement des sols limoneux et argileux).

Et assure deux fonction qui sont :

- **L'étanchéité** est assurée par les propriétés des sols de faible perméabilité utilisés et leur compactage ;
- **La stabilité** est assurée par le poids du remblai qui compense la poussée hydrostatique provoquer des glissements de terrain, ce qui peut endommager ou détruire le barrage.

## 1.2. Classification des barrages selon la nature du matériau de construction :

Selon la nature du matériau de construction utilisé, on classe les barrages selon deux grandes catégories :

- 1) **Les barrages rigides** : ouvrages en maçonnerie et en **béton**, Ces barrages sont le plus souvent fondés sur une fondation rocheuse, de module de déformation élevé. Comme l'illustre la figure 1.3, On distingue trois grandes familles de barrage en béton, chacune comportant un certain nombre de sous familles.
- 2) **Les barrages souples** : ouvrages réalisés en matériaux meubles, terre et enrochements appelés aussi barrage en **remblai (digue)**.

Les barrages en remblai (digue) sont constitués essentiellement de matériaux granulaires naturels meubles prélevés à proximité immédiate de l'ouvrage. On distingue deux catégories de barrages en remblai (fig.1.3).

- Les barrages en terre, réalisés essentiellement à partir de sols naturels meubles prélevés dans des gravières ;
- Les barrages en enrochements, dont la majeure partie est constituée de matériau de carrière concassé.

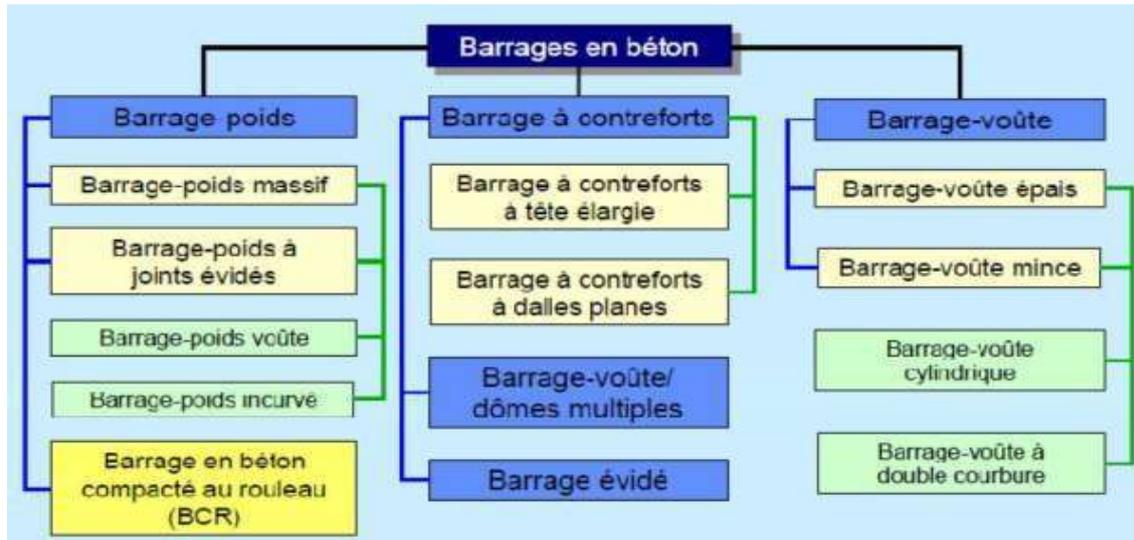


Figure 1.3 : Types des barrages en béton (barrage rigide). [1]

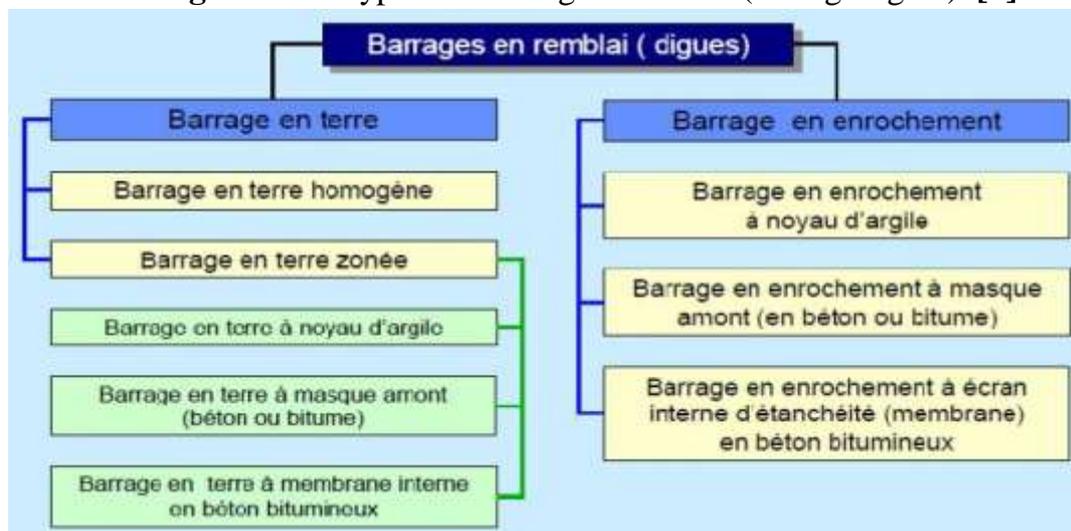


Figure 1.4 : Types des barrages en remblai (barrages souple). [1]

### 1.3. Classification des barrages en terre :

Tous les barrages en terre peuvent être classifiés comme suit :

- Barrage en terre homogène ;
- Barrage en terre hétérogène ou zone ;
- Barrage à masque amont ;
- Barrage à membrane centrale.

#### 1.3.1. Barrage en terre homogène :

Ces barrages sont constitués d'un remblai homogène en terre suffisamment imperméable pour retenir l'eau du réservoir créé par le barrage. Ce type d'ouvrage très ancien a permis la réalisation de très nombreux barrages de faibles dimensions. (Fig.1.5), Ce type de barrage présente les particularités suivantes :

- Disponibilité de matériau fin en quantité et en qualité suffisantes ;

- Barrage le plus facile à réaliser ;
- Stabilité et étanchéité assurées par toute la digue ;
- Organe de drainage permettant de rabattre les pressions des eaux infiltrées ;
- Protection contre le batillage au parement amont.

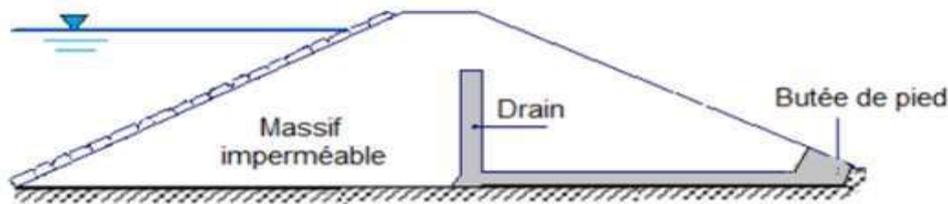


Figure 1.5 : barrages en terre homogène avec drain [4]

### 1.3.2. Barrage en terre hétérogène ou zone :

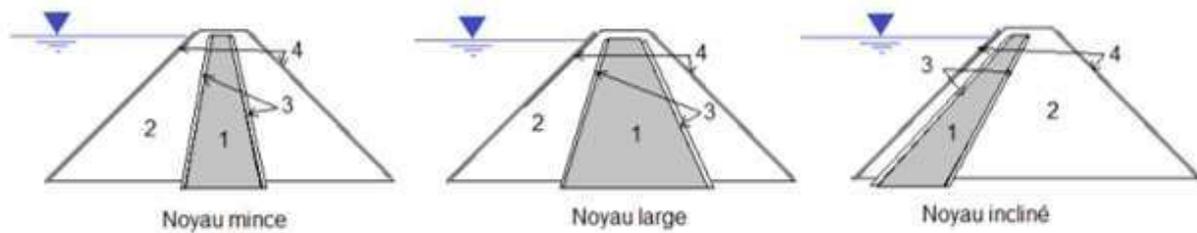
Les barrages en terre hétérogène ou à zones utilisent différents types de matériaux et techniques de construction, les différentes zones de l'ouvrage sont :

- **Le noyau** : c'est la partie étanche faite en matériaux fins (argile, limon) ;
- **Les épaulements (les recharges)** : ce sont des zones de transition faites de matériaux plus grossiers et drainants (sable, gravier) ;
- **La protection amont** : il est souvent fait en enrochements pour résister à l'action des vagues.

Ce type de barrage est utilisé lorsque les matériaux fins ne suffisent pas pour constituer toute la digue ; l'étanchéité est assurée par un noyau constitué de matériaux argileux et la stabilité mécanique est assurée par les recharges amont et aval.

**L'avantage** de ce type de barrage qu'il est peu sensible aux agressions extérieures et à une longue durée de vie et présente **l'inconvénient** de difficulté de réparable en cas de fuite et nécessite des drains et des filtres pour rabattre les pressions d'infiltration et éviter l'entraînement des fines.

Les barrages en terre homogène sont généralement des barrages de taille modeste. Avec des barrages zonés, on peut atteindre des dimensions beaucoup plus importantes. Les deux barrages les plus hauts du monde, toutes catégories confondues, sont ceux de Rogun et Nurek, tous les deux situés au Tadjikistan, avec respectivement 335 et 300 m de hauteur. Il s'agit de deux barrages zonés avec un noyau central en terre. Au niveau mondial, 4 000 barrages sont de ce type.



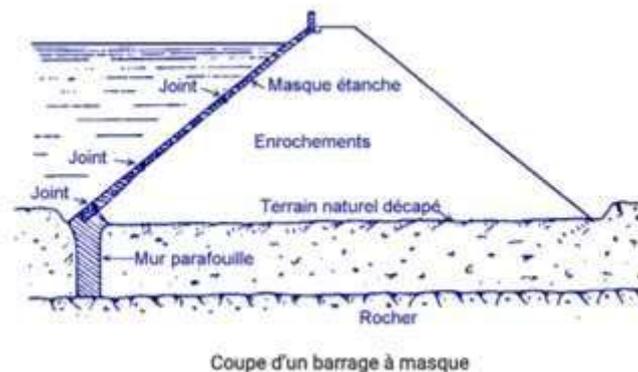
1 : Noyau 2 : Recharges 3 : Filtres 4 : Protection de talus (Rip-rap)

**Figure 1.6 :** barrages en terre en terre hétérogène ou zone [1]

### 1.3.3. Barrage à masque amont :

Un barrage à masque est formé par :

- Un massif en enrochements construit en travers de la rivière avec des pentes de talus assez douces pour assurer la stabilité. Les enrochements ne sont pas imperméables et, à eux seuls, ils sont incapables de retenir l'eau ;
- Une couche d'étanchéité appelée masque posée à l'amont du massif en enrochement et qui s'appuie sur ce massif. Le masque est étanche sur toute sa surface. Un soin particulier doit être porté à ce que l'étanchéité soit aussi assurée sur la périphérie du masque aussi bien en pied de barrage et dans la fondation qu'en rive pour éviter que le masque ne soit contourné.



**Figure 1.7 :** Coupe d'un barrage en terre en terre à masque [3]

Le barrage à masque amont présente **les avantages** suivants :

- Le corps d'appui est situé hors d'eau donc pas d'infiltration et pas de variations de pressions interstitielles ;
- L'édification du masque se fait après à la fin de la construction de la digue ;
- La poussée de l'eau s'exerce dans une direction favorable à la stabilité, elle renforce ainsi la résistance au glissement des talus. Il présente aussi des inconvénients suivants :

- Le gradient hydraulique au pied amont est très élevé, un traitement particulier de la fondation est nécessaire ;
- Le masque est sensible aux sollicitations dynamiques.

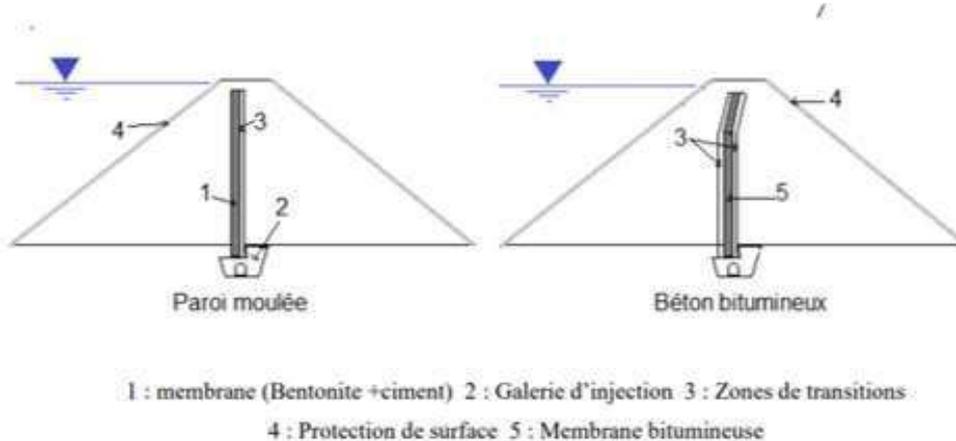


**Figure 1.8 :** Mise en place du masque de barrage zit El Emba

#### 1.3.4. Barrage à membrane centrale :

La solution d'un barrage avec membrane centrale est à envisager lorsque le matériau nécessaire au noyau n'est pas disponible à proximité du site. Deux types de membranes sont généralement mises en œuvre (Figure 1.9) :

- **Béton bitumineux :** Cette méthode est très utilisée du fait de la flexibilité du matériau lors des tassements et du tremblement de terre. Une galerie d'injection et de contrôle est nécessaire pour surveiller l'étanchéité.
- **Paroi moulée :** cette technique consiste à réaliser un mur en béton armé après achèvement du remblai puis excavation à partir de la crête. Elle n'est applicable que pour des barrages de faibles hauteurs du fait de la rigidité des parois moulées qui crée des difficultés en cas de tassement ou de tremblement de terre.



**Figure 1.9 :** Barrages en terre avec membranes centrales [1]

#### 1.4. Avantages et particularités des barrages en terre :

Les barrages en terre sont largement utilisés dans le monde entier en raison de leur coût relativement bas, de leur adaptabilité et de leur fonctionnalité. Cependant, il est important de prendre en compte les caractéristiques géologiques et les risques spécifiques à chaque site lors de la conception et de la construction de ces structures.

##### ➤ Les Avantages :

- Faibles contraintes dans le béton ;
- Faibles contraintes transmises au rocher ;
- Les variations de température ne produisent que des contraintes faibles ;
- Gradient des sous-pressions sous la fondation faible ;
- Evacuateur de crues peut facilement être intégré.

##### ➤ Les particularités :

- Volume d'excavation important ;
- Volume de béton important ;
- Refroidissement artificiel nécessaire lors de la prise du béton ;
- Sous-pressions importantes sous la fondation ;
- Sensibilité aux tassements ;
- Sensibilité aux séismes.

##### ➤ Les inconvénients :

- Capacité de stockage limitée par rapport aux barrages en béton en raison des propriétés des matériaux utilisés.
- Sensibilité aux mouvements du sol, tels que les glissements de terrain et les séismes.
- Nécessité d'une surveillance et d'un entretien réguliers pour prévenir les fuites et les dommages potentiels.
- Durée de vie plus courte par rapport aux barrages en béton.

#### 1.5. Sécurité des barrages en terre :

La sécurité des barrages en terre est d'une importance capitale. Des études géotechniques approfondies sont réalisées pour évaluer les risques potentiels et garantir la stabilité du barrage. Des dispositifs de surveillance sont installés pour détecter les mouvements du sol, les fuites ou toute autre anomalie. Des plans d'urgence et des procédures d'évacuation sont également établis pour faire face à d'éventuelles situations d'urgence.

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

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

La géologie (nature des roches sur lesquelles sera édifié le barrage, agrégats extraits sur place) et la topographie (largeur de la vallée), commande le type de barrage utilisé. Les barrages forment avec le terrain sur lequel ils sont construits un ensemble indissociable : à chaque site, un type de barrage, un dimensionnement adapté tant sur le plan technique qu'économique. C'est pourquoi il n'existe pas de barrage type standard.

Les barrages en terre présentent certains risques potentiels, notamment :

- **Fuite d'eau :** Les barrages en terre peuvent présenter des risques de fuite d'eau à travers les couches du barrage. Si la couche imperméable (noyau) ou les zones de transition ne sont pas correctement construites ou entretenues, cela peut entraîner des fuites d'eau non désirées. Cela peut affaiblir la structure du barrage et potentiellement entraîner des inondations en aval.
- **Glissement de terrain :** Les mouvements du sol, tels que les glissements de terrain, peuvent représenter un risque pour les barrages en terre. Les conditions géologiques instables, les précipitations abondantes ou les séismes peuvent
- **Action des vagues :** Le recouvrement du talus de la digue doit être dimensionné pour palier à l'action des vagues. On peut aussi choisir le site de réalisation de sorte qu'il soit protégé du vent et diminuer ainsi l'effet des vagues.
- **Climat :** Les conditions climatiques ont une forte influence sur le délai d'exécution des ouvrages en terre. La teneur en eau étant le critère le plus important dans le compactage optimal des matériaux, les travaux sont souvent interrompus dans les zones où les précipitations sont élevées. Dans ces zones, la conception de digue avec un noyau incliné ou avec un volume minimal de matériaux argileux est préférable.
- **Séismicité :** De par leurs capacités à supporter les grandes déformations, les barrages en remblai sont les plus résistants aux sollicitations dynamiques. Néanmoins les barrages situés dans des zones sismiques doivent être conçus avec des talus moins abrupts, des crêtes plus larges, des filtres et des drains plus importants. Il est donc essentiel de prendre en compte les caractéristiques sismiques lors de la conception et de la construction des barrages en terre.
- **Érosion interne :** L'érosion interne est un phénomène où l'eau s'infiltré à travers les couches du barrage et entraîne l'érosion des particules de sol. Cela peut affaiblir la structure du barrage au fil du temps et augmenter le risque de fuite ou de rupture.
- **Surverse et rupture :** Si le réservoir d'un barrage en terre dépasse sa capacité de stockage en raison de fortes précipitations ou d'une gestion inadéquate des débits d'eau, cela peut entraîner une surverse. Une surverse prolongée peut exercer une pression excessive sur le barrage, augmentant ainsi le risque de rupture.

➤ **Défaillance de la structure** : Une conception ou une construction inadéquate, un entretien insuffisant ou une surveillance inadéquate peuvent entraîner une défaillance de la structure du barrage en terre. Cela peut se manifester par des déformations excessives, des fissures, des affaissements ou des ruptures, mettant en danger la sécurité du barrage et des zones en aval.

Il est important de noter que ces risques peuvent être gérés et réduits grâce à une planification et une conception appropriée, à une surveillance régulière, à un entretien adéquat et à des procédures d'urgence bien établies. Les autorités responsables des barrages en terre doivent prendre toutes les mesures nécessaires pour garantir la sécurité des structures et la protection des populations vivant en aval.

### 1.6. Conception des éléments principaux dans les barrages en terre :

Les éléments principaux dans les barrages en terre sont :

- **Les éléments de la géométrie** déterminée par sa hauteur, sa largeur en crête et la pente des talus amont et aval ;
- Les éléments de protection des talus ;
- Les éléments d'étanchéité de la digue et de la fondation ;
- Les éléments de drainage.

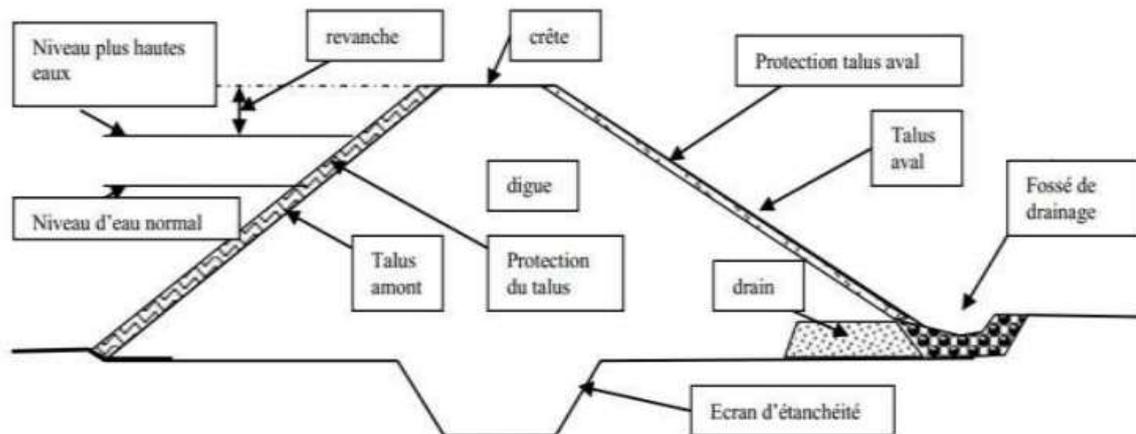


Figure 1.10 : Coupe transversale d'un barrage en terre.

#### 1.6.1. Les éléments de la géométrie :

➤ **Niveau de la Crête du Barrage NCB (Hauteur du barrage) :**

La hauteur totale du barrage se calcule en ajoutant à la hauteur normale de la retenue la charge maximale sur le déversoir de crue et la revanche selon la relation suivante :

$$\text{Niveau}_{\text{crête}} = \text{NPHE} + R_v + a = (\text{NNR} + h_d) + R_v + a \quad \text{Eq. 1.1}$$

Où :

- ◆ **NPHE** : Niveau Plus Hautes Eaux pour la probabilité de conception.

- ◆ **NNR** : Niveau Normal de la Retenue.
- ◆  $h_d$  : Charge maximale sur le déversoir de crue.
- ◆  $R_v$  : Hauteur de montée de la vague ou revanche.
- ◆  $a$  : Hauteur libre de sécurité (réserve constructive) ; dans le cas des petits barrages comprise entre **0.4** et **0.6m** et **< à 2%  $H_B$**

D'où on calcul la hauteur du barrage ( $H_B$ ) par la formule :  $H_B = N_{\text{crête}} - N_{\text{Imp}}$  **Eq. 1.2**

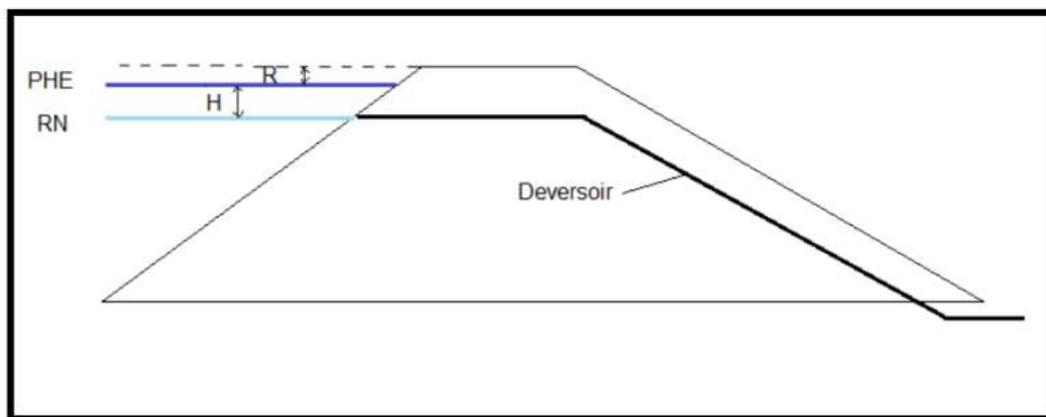
- ◆  $N_{\text{crête}}$  : Niveau de la crête.
- ◆  $N_{\text{Imp}}$  : Niveau d'implantation.

#### a. Niveau Normale de la Retenue (NNR) :

Le niveau normal de la retenue est calculé en tenant compte de la capacité utile à stocker, de la tranche morte éventuellement prévue au fond de la retenue pour emmagasiner les dépôts et de la tranche correspondant aux pertes par infiltration et évaporation.

#### b. Niveau des Plus Hautes Eaux (NPHE) :

Ce niveau égal au niveau normal de la retenue plus La lame d'eau sur le déversoir qui dépend des débits des crues à évacuer, de leur laminage par retenue et des caractéristiques hydrauliques du déversement.



**Figure 1.11** : Définition des cotes NNR et NPHE

#### c. Calcul de la hauteur de montée de la vague (Revanche) ( $R_v$ ) :

La revanche est une tranche de sécurité entre le NPHE et la crête du barrage. Elle se calcul en fonction de la hauteur des vagues qui se forment due à la vitesse du vent et la longueur du plan d'eau ou « fetch » ; ces paramètres sont généralement estimés à l'aide des formules empiriques.

##### c.1) Hauteur des vagues :

- Formule de **MALLET ET PACQUANT** :  $h_v = \frac{1}{2} + \frac{1}{3}\sqrt{F}$  **Eq. 1.3**
- Formule de **STEVENSON** (valables pour une vitesse du vent inférieure à **100 km/h**):
  - $F < 18 \text{ km}$  ;  $h_v = 0.75 + 0.34 \sqrt{F} - 0.26 \sqrt[4]{F}$  **Eq. 1.4**

$$\triangleright F > 18 \text{ km} ; h_v = 0.34 \sqrt{F} \quad \text{Eq. 1.5}$$

➤ Formule de **MOLITOR** :

$$\triangleright \text{Pour } F > 30 \text{ km} ; h_v = 0.75 + 0.032 \sqrt{V_v * F} - 0.27 \sqrt[4]{F} \quad \text{Eq. 1.6}$$

$$\checkmark \text{ Pour } F < 30 \text{ km} ; h_v = 0.032 \sqrt{V_v * F} \quad \text{Eq. 1.7}$$

Avec : **F** : Longueur rectiligne maximum du plan d'eau (Fetch), mesurée à partir du barrage (km) ;

**$h_v$**  : Hauteur des vagues (m) ;

**$V_v$**  : vitesse du vent (Km/heure).

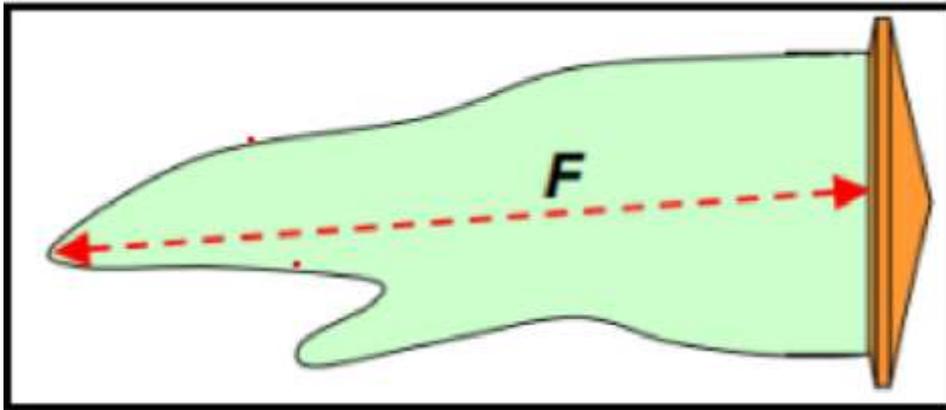


Figure 1.12 : ligne de fetch (ABEST, 2017)

### c.2) Vitesse des vagues :

La vitesse de propagation des vagues est elle-même déduite de l'amplitude des vagues

D'après la formule de Guillard :  $V_v = 1.5 + 2 h_v$  (m/s) Eq .1.8

Avec :  **$h_v$**  : hauteur des vagues (m).

**$V_v$**  : Vitesse de propagation des vagues en :m /s

**La hauteur des vagues** qui se forment du fait du vent peut être estimée à partir de la formule empirique de Molitor. Cette formule stipule que la hauteur des vagues dépend de la vitesse du vent horaire  $V$  et du fetch ( $F$ ) (longueur du plan d'eau dans le sens des vents dominants).

$$\text{Si : } F < 30 \text{ km} ; \quad h_v = 0.76 + 0.032 * \sqrt{V * F} - 0.26 * \sqrt[4]{F} \quad \text{Eq. 1.9}$$

$$\text{Si : } F > 30 \text{ km} ; \quad h_v = 0.032 * \sqrt{V * F} \quad \text{Eq.1.10}$$

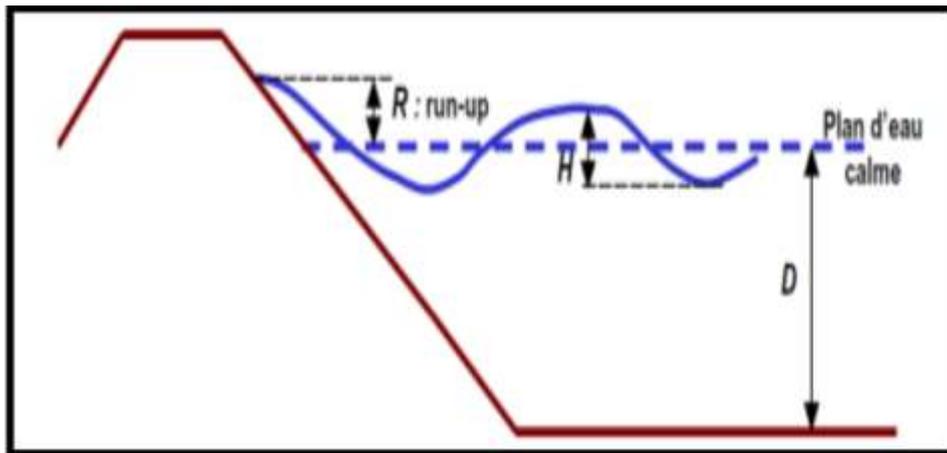


Figure 1.13 : la hauteur des vagues (ABEST,2017)

### c.3) La revanche :

La revanche  $R$  est la différence de côte entre les Plus Hautes Eaux (PHE) correspondant à la crue de projet et la crête pour éviter la submersion du remblai par les vagues. A partir de la connaissance de la vitesse ( $V_v$ ) et de la hauteur ( $h_v$ ) des vagues qui se forment, la formule empirique de Gaillard permet de calculer la hauteur de revanche sécuritaire des digues (Rolley, Kreitmann et al. 1977)

La revanche peut être évaluée par la formule de **DAVIS** :

$$R = 0.75 h_v + (V_v^2 / 2g) \quad \text{Eq.1.11}$$

Avec :  $h_v$ ,  $V_v$  : hauteur et vitesse de propagation des vagues (m) et (m/h) ;

$g$  : accélération de la pesanteur est égale à  $9.81 \text{ m/s}^2$ .

On peut évaluer directement la revanche par la formule simplifiée de **R. ROLLEY** :

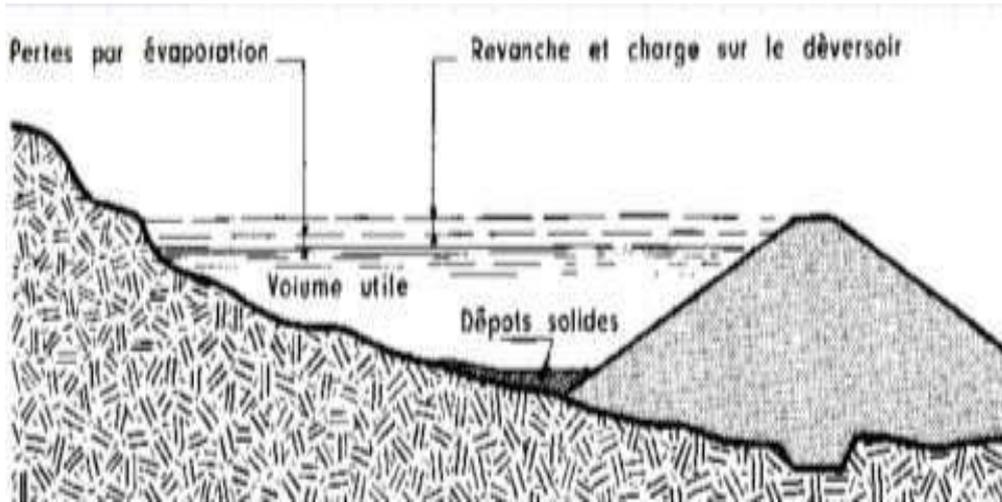
$$R = 1 + 0.3\sqrt{F} \quad \text{Eq.1.12}$$

La revanche doit en outre permettre de compenser le tassement du barrage après construction et qui est de l'ordre de 1% de la hauteur totale du barrage si l'ouvrage a été bien réalisé. Généralement une valeur minimale de 1.2 m à 1.5 m est adoptée pour des digues de moins de 10 m de hauteur et une valeur supérieure à 1.5 m pour les grands ouvrages.

### 1.6.2. Les volumes d'eau :

La retenue d'un barrage est constituée des volumes ci-dessous mentionnés :

- **Le volume mort** : situé au-dessous niveau vidangeable du barrage et rempli par des apports solides, ce volume peut réduire de volume total du barrage.
- **Le volume utile** : représente le volume exploitable situé au-dessus du volume mort.



**Figure 1.14 :** Schéma de répartition des tranches dans la retenue

**1.6.3. La Largeur en crête du barrage (bcr) :**

La largeur en crête bcr est en général déterminée par l’une des formules suivantes où H est la hauteur du remblai en mètres :

- Formule de T. Knapen :  $bcr = 1,65 H^{1/2}$  ;
- Formule de E. F. Preece :  $bcr = 1 + 1.1\sqrt{H}$
- Cemagref et Degoutte (1997) :  $bcr = 3,6 \sqrt[3]{H} - 3$
- Autres formules :  $bcr = 1/3 H$  (pour  $H > 9m$ ) ;

On prend la grande valeur donnée par ces formules. Et on fixe  $bcr = 3 m$  comme valeur minimale, afin de permettre la circulation des engins de terrassement pendant la réalisation et ultérieurement pour son entretien. Le compactage des dernières couches peut nécessiter une largeur supérieure.

La largeur en crête dépend aussi de l’utilisation de cette dernière (chemin, route). Pour les barrages zonés, elle dépend également du nombre de zones au niveau de la crête ; Les largeurs minimales suivantes sont proposées :

**Tableau 1.2 :** Largeur minimale en crête

$H^2\sqrt{V}$	<100	Entre 100 et 300	>300
$L_{minimum}$	3m	4m	5m

**1.6.4. La pente des talus :**

L'inclinaison des talus est exprimée par les termes "pente" ou "fruit". Dans le cas des barrages en remblai, le terme pente (inverse du fruit) est communément utilisé. La pente du talus qui est le rapport de la hauteur du talus sur sa projection horizontale est fixée par le calcul de stabilité. A titre indicatif, le tableau 1.3 donne quelques valeurs qui devront être vérifiées par une étude de stabilité mécanique du massif.

**Tableau 1.3 : Pente des talus pour prédimensionnement [1]**

Hauteur du barrage en m	Type de barrage	Pente amont	Pente aval
< 5	Homogène	1 :2.5	1 :2
	A zones	1 :2	1 :2
5 à 10	Homogène ,granularité étendue	1 :2	1 :2
	Homogène, à fort pourcentage d'argile	1 :2.5	1 :2.5
	A zones	1 :2	1 :2.5
10 à 20	Homogène, granularité étendue	1 :2.5	1 :2.5
	Homogène, à font pourcentage d'argile	1 :3	1 :2.5
	A zones	1 :2	1 :3.0

Pour les barrages de grande hauteur on établit **les bermes** avec un écartement vertical de **10-15m**. La largeur des bermes n'est pas inférieure à **1-2 m**. Si les bermes sont utilisées pour la voie de communication, leur largeur n'est pas inférieure à 3m.

Les bermes permettent de diminuer la pente moyenne des talus et d'améliorer la condition de la stabilité.

#### **1.6.5. La couche de protection des parements :**

La couche protectrice du revêtement joue un rôle crucial dans l'amélioration de la durabilité et de la longévité des matériaux de construction. La recherche s'est concentrée sur la mise au point de revêtements protecteurs pour divers matériaux, tels que le bois, le verre et les métaux, afin de minimiser les effets des intempéries et d'augmenter la résistance à la corrosion.

Des études ont montré que la formation de produits de corrosion sur les surfaces métalliques contribue à leur protection anticorrosive au fil du temps, comme l'ont observé les tests d'exposition en extérieur [4]. En outre, des études sur les modifications de la surface du bois ont visé à créer des revêtements transparents et durables dotés de propriétés hydrofuges afin de réduire la décoloration causée par les rayons UV et les facteurs biologiques, améliorant ainsi la fiabilité et la durée de vie des façades en bois. Comprendre la composition et la microstructure des couches protectrices, que ce soit sur le bois ou sur les métaux, est essentiel pour développer des stratégies efficaces visant à maintenir l'intégrité des matériaux de construction en milieu urbain.

➤ **Protection du parement amont :**

Les talus amont des barrages en remblai doivent être protégés contre l'action destructive des vagues. Les types de protections de surface habituels pour le talus amont sont, les rip rap et le sol-ciment. D'autres types de protection ont été utilisés : béton, béton



bitumineux, blocs de béton préfabriqués et (sur des structures petites et relativement peu importantes) bois et béton en sacs. (USBR 2012)

**Figure 1.15:** les méthodes de protection de la face amont (Google image)

La protection de la face amont commence normalement à la crête du barrage et s'étend jusqu'à une distance sûre en dessous de la surface de l'eau (environ 1.5m)

➤ **Protection du parement aval :**

Si le parement aval d'un barrage est constitué d'un remblai de roches, il n'est pas nécessaire de procéder à un traitement spécial de la surface du talus. Les parements avals des barrages homogènes ou des barrages avec des zones extérieures de sable et de gravier doivent être protégés contre l'érosion causée par le vent et le ruissellement de surface à l'aide d'une couche de roches, de galets ou de gazon. En raison de la difficulté d'obtenir une protection adéquate des talus avec un couvert végétale sur de nombreux barrage, en particulier dans les régions arides, La protection des talus à l'aide de galets ou de rochers est préférable et devrait être utilisée lorsque le coût n'est pas prohibitif. (USBR, 2012)



**Figure 1.16:** protection du talus aval avec des galets dans le barrage de Jordanelle, Utah, USA (USBR, 2012)



**Figure 1.17:** protection végétale du talus aval du barrage de Scoggins, Oregon (USBR, 2012)

➤ **Gabions pour Rip-Rap.**

On estime qu'une recherche supplémentaire dans les cours amont des oueds Maamora et Défila est nécessaire pour la localisation de blocs roulés pluridécimétriques susceptibles d'être utilisés pour les **parements** de l'ouvrage.

Dans une deuxième possibilité, ce matériau naturel peut être extrait par fragmentation, selon les tailles souhaitées, des massifs gréseux de la cuvette. Dès lors, la quantité disponible de ces matériaux pourra garantir une couverture totale des **parements**.



**Figure 1.18** : Photo imaginaire du barrage en fin de construction.

## 1.7. Système de protection contre les effets de l'eau (les Drains et les filtres) :

### 1.7.1. Rôle des drains et des filtres :

Du fait de la charge hydraulique à l'amont du barrage, l'eau s'infiltré progressivement dans le massif même du barrage et dans ses fondations, bien que le choix des matériaux de construction et de l'implantation de l'ouvrage ait été fait de manière à limiter les débits d'infiltration [2].

- **Un drain** : est un organe qui évacue les eaux prévenant d'une infiltration à travers un massif ou d'un ressuyage.
- **Un filtre** : est un organe destiné à bloquer la migration des particules fines éventuellement entraînés par la circulation de l'eau dans un massif. Filtre et drain sont le plus souvent associés, le filtre pouvant jouer lui-même le rôle de drain, surtout dans les petits ouvrages.

### 1.7.2. Méthode de protection contre l'érosion interne :

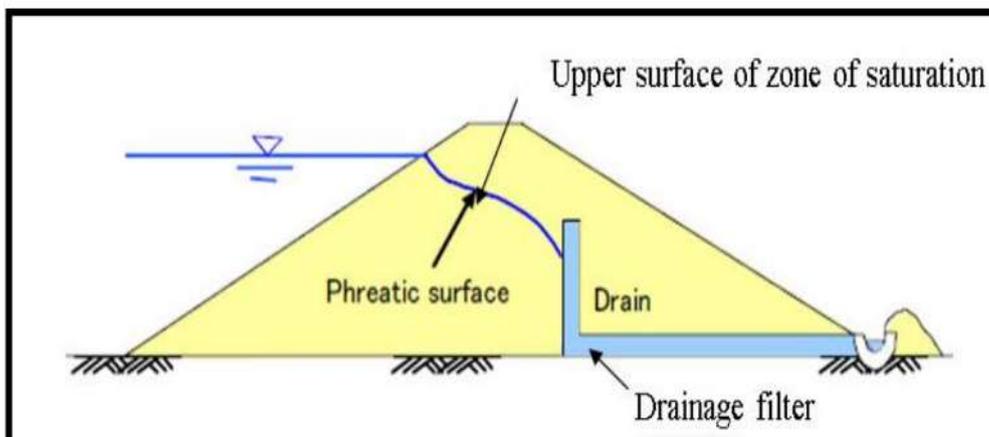
L'érosion interne est un phénomène dans lequel l'eau s'infiltré et s'écoule à travers le corps de la digue ou sa fondation, provoquant l'érosion et le déplacement des particules de sol. Si elle n'est pas contrôlée, l'érosion interne peut conduire à la rupture du barrage.

Voici quelque méthode pour contrôlée ce phénomène :

### 1.7.3. Les drains et les filtres :

Le drainage associé aux barrages a pour but de contrôler les infiltrations et d'empêcher l'accumulation de pressions interstitielle excessives. Il n'est pas pratique de construire une structure avec une barrière complètement imperméable dans la fondation ou la digue.

Dans ce cas, les ingénieurs peuvent réaliser un système de drainage pour permettre la collecte et le passage des eaux d'infiltration en toute sécurité. (USDA, 2016)



**Fig.1.19** : un barrage homogène avec drain dans la face aval (Kunitomo, 2000)

L'eau d'infiltration suivra toujours le chemin de moindre résistance. Il peut s'agir d'une fondation ou d'un remblai perméable. Les systèmes de drainage sont conçus pour intercepter les eaux d'infiltration avant qu'elle n'atteigne une sortie en aval. Les filtres sont des minces couches successives de matériaux perméables dont la grosseur des éléments augmente dans la direction de l'écoulement. Ces filtres doivent assurer une transition entre une couche à granulométrie donnée vers une couche à granulométrie plus grossière.

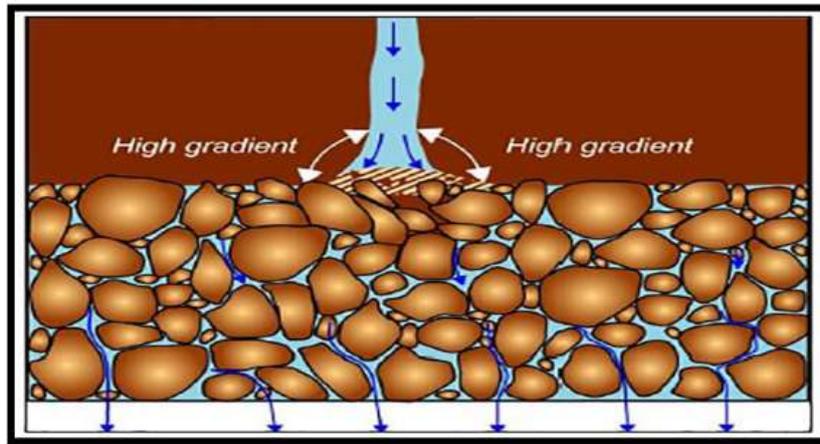


Fig. 1.20 : les drains filtrant retenir les matériaux fins et évacuer les débits et pressions d'eau

### 1.8. Les Facteurs influençant la conception et la réalisation des barrages en remblais :

La conception et la réalisation des barrages en remblai doit tenir compte de plusieurs aspects tels que :

- **La disponibilité des matériaux La construction :** un barrage en remblai nécessite la mise en place de grandes quantités de matériaux. Les zones d'emprunt devront donc se trouver le plus près possibles du lieu d'exécution pour optimiser les coûts de réalisation. La quantité et la qualité des matériaux localisés au niveau du site de l'ouvrage influencent fortement le type de barrage et le mode de construction.
- **Le type de fondation :** La topographie et la nature du terrain de fondation aura une influence sur la conception du barrage en terre.
  - Une fondation rocheuse perméable implique la nécessité d'injection pour remédier aux problèmes de perméabilité, de fissuration et de faille.
  - Un sol mou et perméable implique la nécessité d'utilisation de tapis d'étanchéité, de réaliser des talus de pente plus douce pour élargir le flux de filtration, réduire les débits et remédier aux problèmes de tassements

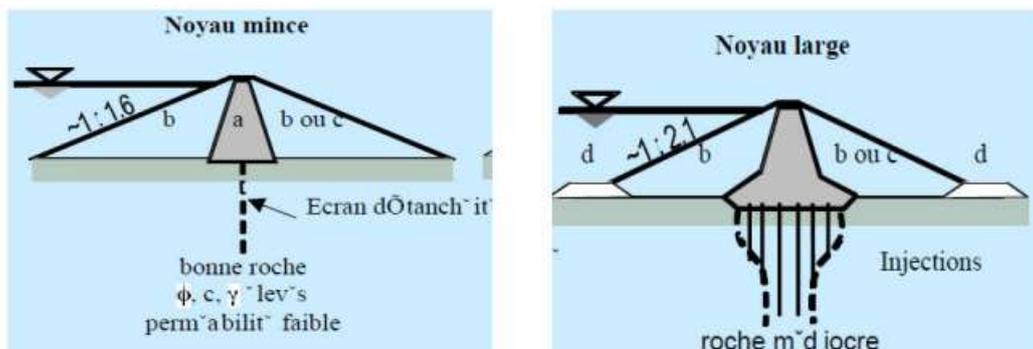
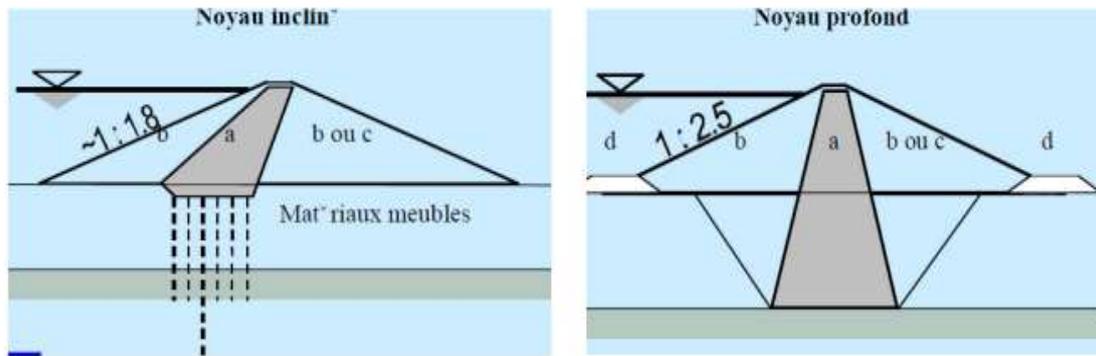


Figure 1.21 : Types de fondation de barrage en remblai sur rocher : ( a ) noyau ; (b, c, d) corps d'appui de qualité différente. [2]



**Figure 1.22** : Types de fondation de barrage en remblai **sur matériaux meubles** :  
(a) noyau ; (b, c) corps d'appui de qualité différente. [2]

### 1.9. Problématique d'alluvionnement des retenues et ses solutions : [1]

L'alluvionnement est un processus qui conduit au comblement de lacs par des sédiments et des étendues de terre qui tendent dans un stade final à remplacer la surface de l'eau.

Les bassins d'accumulation présentent une morphologie particulière en raison de leur point bas qui se situe presque toujours au niveau du barrage et, de plus, dans les environs des organes de décharge. En outre, l'alimentation d'une retenue peut être régularisée dans certaines limites, ce qui peut avoir une influence sur le niveau du plan d'eau. Pour la plupart des ouvrages, les organes de décharge permettent un abaissement presque total du niveau et une vidange complète de la retenue. Les particularités morphologiques et hydrologiques de ces bassins d'accumulation par rapport aux lacs naturels permettent de prendre davantage de mesures plus efficaces contre l'alluvionnement,

#### 1.9.1. Cause d'alluvionnement des retenues :

La cause de l'alluvionnement des retenues est en particulier due à l'apport de sédiments et de matériaux en suspension par les cours d'eau, dont leur dépôt est conditionné par l'écoulement (courant de turbidité).

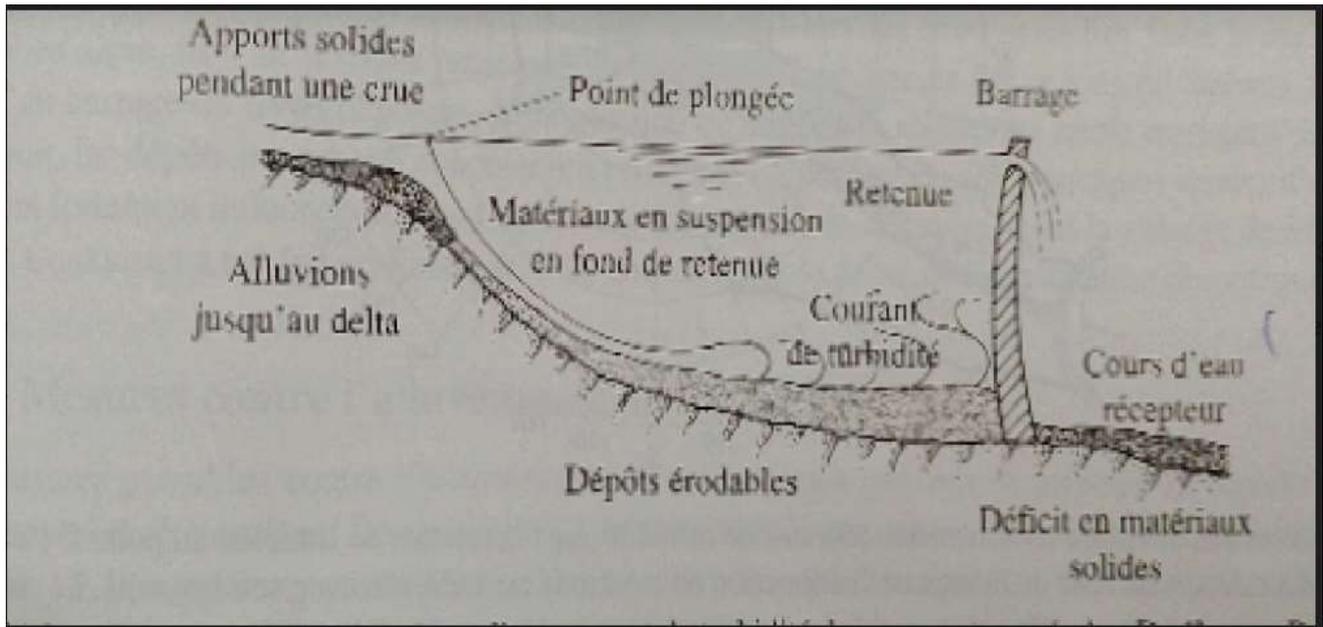
##### ➤ Erosion de surface dans les bassins versants :

L'apport en sédiments dans les retenues dépend pour l'essentiel des prédispositions du bassin versant à l'érosion. Dans le cadre d'une étude, 19 retenues suisses ont été analysées et la fraction annuelle de sédiments a été déterminée soit par des relevés du fond du lac soit par la mesure de quantités de sédiments évacués lors d'opérations de chasse (Beyer Portner, 1999 ; Beyer Portner, Schleiss, 2000).

##### ➤ Condition de l'écoulement (Courant de turbidité) :

La plus grande partie de matériaux solides transportés dans la retenue se compose normalement de matériaux en suspension dans une proportion de 80 à 90% pour les petites et moyennes retenues, pratiquement de 90 à 100% pour les grandes retenues. Les alluvions

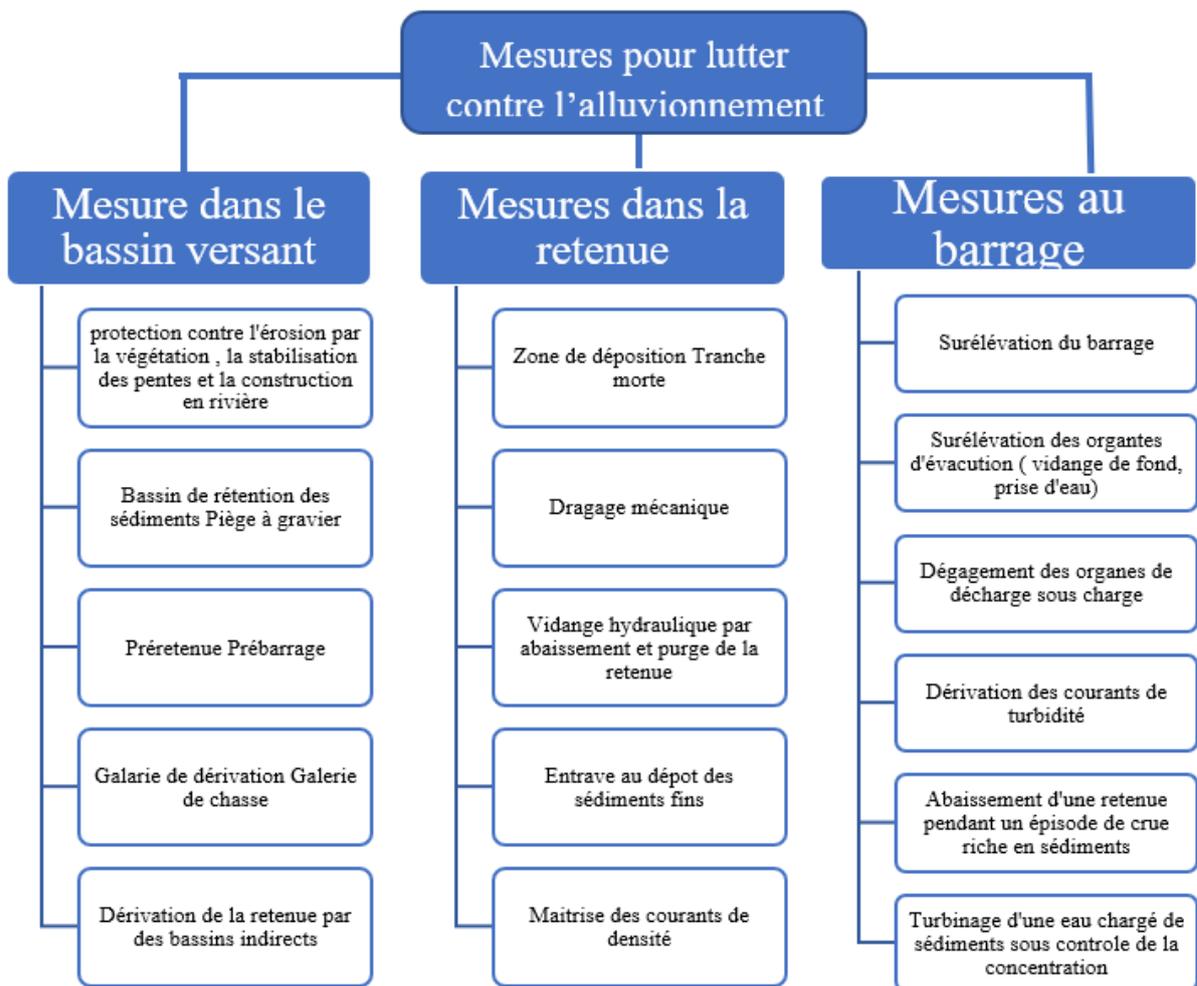
ont une importance secondaire. Des quantités considérables de matériaux en suspension sont principalement transportées par le cours d'eau pendant une crue. L'écoulement fortement chargé de sédiments fins provenant du bassin versant présente un poids unitaire plus élevé que celui de l'eau tranquille de la retenue. La masse d'eau trouble, qui coule dans la retenue, il s'en suit un courant d'eau dans la retenue, appelé courant de turbidité, qui est composé d'un mélange d'eau et de sédiments fins en suspension. Ce courant de turbidité peut physiquement être comparé à une avalanche poudreuse sur un versant. Le courant de turbidité se déplace avec une vitesse considérable le long du fond incliné du lac en direction du point le plus bas situé près du barrage (**fig. 1.23**).



**Figure 1.23 :** Représentation schématique d'un courant de turbidité dans une retenue (selon De Cesare, Boillat, 1998). [4]

### 1.9.2. Les mesures contre l'alluvionnement :

Les mesures possibles contre l'alluvionnement des retenues peuvent en principe se répartir en mesures préventives et rétroactives. Les premières permettent de lutter contre l'alluvionnement, la seconde à tout le moins de le supprimer partiellement. Par ailleurs, on peut distinguer les mesures prises dans le bassin versant, la retenue, de même qu'au barrage (fig. 24).



**Figure 1.24.** Vue d'ensemble des mesures préventives et rétroactives pour lutter contre l'alluvionnement (selon schleiss et oehy, 2002) [1].

### 1.9.2.1. Mesures dans le bassin versant :

La protection contre l'érosion dans le bassin versant constitue la plus efficace mesure de prévention. Dans les régions où les conditions climatiques le permettent, la végétation est un moyen de protéger les surfaces contre l'érosion. Durant ce siècle, les opérations de reboisement de bassins versants constitueront une tache principale plus particulièrement en Asie, où de nombreuses retenues sont menacées d'alluvionnement. Malheureusement, l'effet du reboisement pour atténuer l'alluvionnement ne se fait sentir qu'à long terme. Les mesures dans les bassins versants sont aussi nécessaires pour garantir des sols cultivables de valeur pour l'agriculture, de même que pour assurer la protection contre les crues, les laves torrentielles et les glissements de talus. Dans les bassins versants dénudés, comme les bassins versants alpins en haute altitude, seules des mesures techniques, telles la stabilisation des pentes, ainsi que celles de protection des lits et des rives des cours d'eau, permettent de limiter l'érosion.

### 1.9.2.2. Mesures dans la retenue :

Lorsque les sédiments arrivent dans la retenue, seules des mesures passives ou rétroactives sont envisageables pour supprimer ou limiter les effets négatifs de l'alluvionnement. Une méthode appliquée dans le monde pour sauvegarder le volume utile d'une retenue consiste à surdimensionner sa capacité totale, ce qui permet de prévoir une tranche pour assurer le dépôt des sédiments durant une certaine période, généralement fixée à 50 ans. Si cette zone n'est pas accessible, on parle de tranche morte.

L'alluvionnement peut être retardé ou empêché dans le cas où les dépôts sont régulièrement évacués. On a recours à une opération de dragage effectuée à lac plein ou abaissé depuis les rives ou un ponton flottant. Selon la granulométrie des sédiments à extraire et la profondeur, on peut procéder par un dragage par aspiration ou des moyens conventionnels.

Une application particulière d'évacuation hydraulique est l'aspiration des sédiments au moyen de conduites mobiles sur le fond du lac. Celles-ci sont munies d'orifices par lesquels les sédiments vont pénétrer après ouverture d'une vanne à l'extrémité de la conduite (SPSS-Slotter Pipe Sediment Sluice) (Jacobsen, T., 2000).

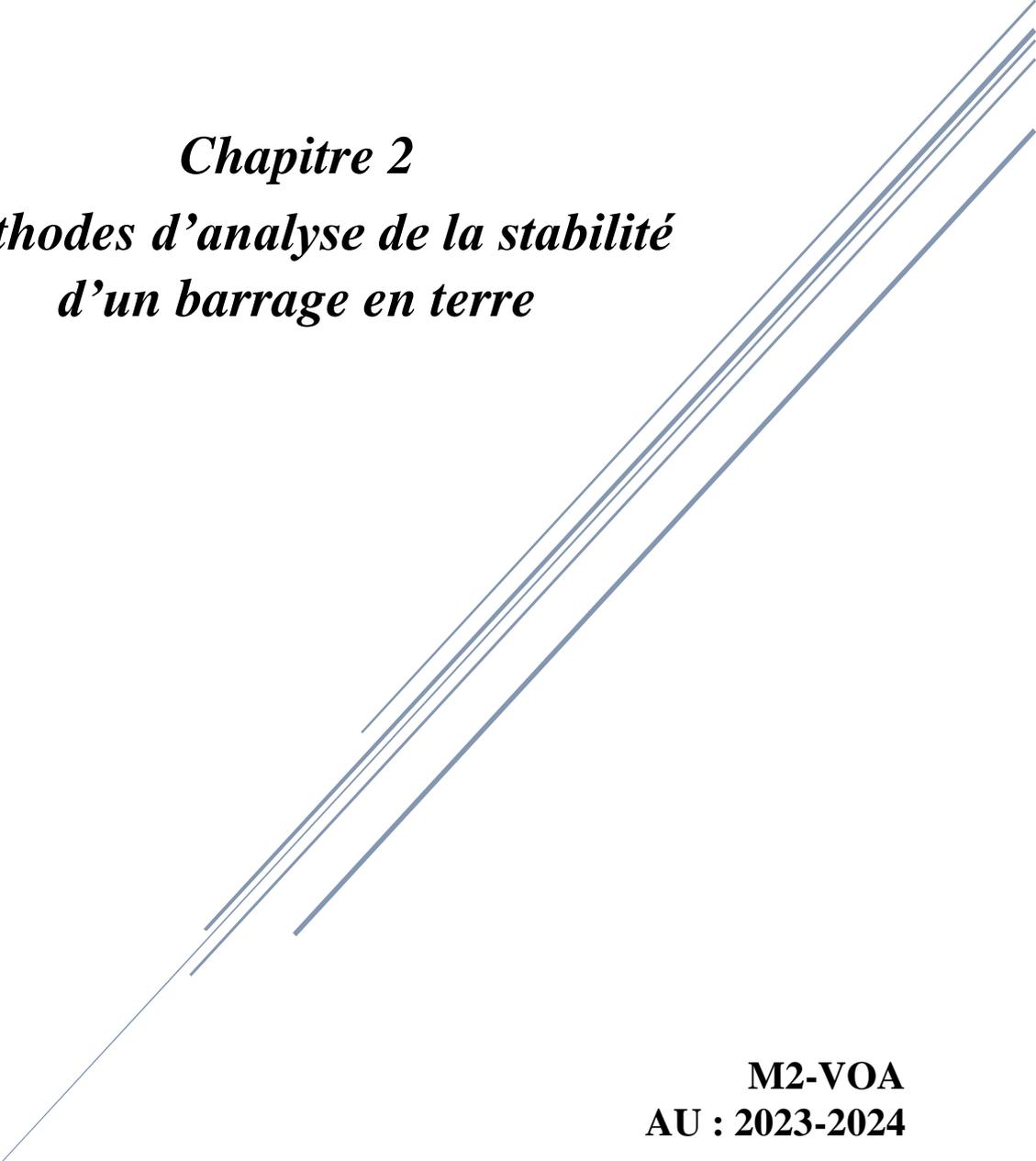
### 1.9.2.3. Mesures au barrage :

Si une grande partie du volume utile est déjà perdue, on peut le compenser en surélevant le barrage, pour autant que cette mesure constructive soit possible. Cette solution a été appliquée à plusieurs barrages en Afrique du Nord (Cornut, 1992).

Si, en premier lieu, seuls les organes d'évacuation sont touchés par l'alluvionnement et qu'une chasse efficace n'est pas réalisable, ces ouvrages doivent être surélevés pour garantir la poursuite de l'exploitation. La transformation de la vidange de fond et de la prise d'eau du barrage de Mauvoisin en est un exemple (Hug. Boillat, Schleiss, 2000; Schleiss, Feuz, Aemmer, Zünd. 1996).

[2] A.N.B. « dispositif d'auscultation » 1er trimestre 2001.aménagement du barrage KOUDIETE MEDAOUAR TIMGAD –BATNA-

[3] ALONSO, E. E., OLIVELLA, S. & PINYL, N. M. 2005. « A review of beliche dam. geotechnique, 55, 267–285. »



***Chapitre 2***  
***Méthodes d'analyse de la stabilité***  
***d'un barrage en terre***

**M2-VOA**  
**AU : 2023-2024**

## **Chapitre 2 :**

### **Méthodes d'analyse de la stabilité d'un barrage en terre**

#### **2.1. Introduction :**

La stabilité d'un barrage en remblai réside dans la stabilité aux glissements de ses talus pour toute sollicitation pouvant survenir. La détermination des conditions de stabilité fait appel aux méthodes de mécanique des sols basées sur l'étude de l'équilibre limite. La stabilité des pentes peut être augmentée en choisissant des matériaux plus performants qui permettent d'éviter la rupture des talus mais aussi assurer la stabilité de la fondation et éviter les déformations excessives. On se donne des pentes qui paraissent optimales, compte tenu de la nature des matériaux, et on vérifie par une étude de stabilité que le barrage présente une sécurité suffisante avec ces pentes. En général, le résultat sera une perte d'un volume d'eau important, entraînant des risques pour les personnes ou les biens à l'aval [1].

#### **2.2. Rupture de barrage :**

Une rupture de barrage est définie comme étant une destruction totale ou partielle de l'ouvrage, de ses appuis ou de ses fondations le rendant complètement inopérant. Les constructions hydrauliques peuvent subir des accidents de rupture plus ou moins graves. Le milieu naturel étant, d'une part, difficile à déterminer, les crues et les séismes qui sont des phénomènes aléatoires rendent difficile l'appréciation de leurs intensités extrêmes possibles sur la durée de vie des ouvrages. D'autre part, les connaissances et les matériaux intervenant dans la construction des ouvrages demeurent imparfaits, malgré les progrès technologiques rapides en matière de conception et de réalisation de ces ouvrages survenus ces dernières décennies. Pour toutes ces raisons, il est facile de comprendre comment il y a eu ce nombre important de ruptures d'ouvrages et admettre aussi qu'il y en aura d'autres dans le futur.

Le nombre de ruptures de barrage depuis les premières constructions se chiffre en milliers de cas. Le taux de rupture moyen annuel est d'environ 3 pour l'ensemble des barrages construits dans le monde, mais actuellement le nombre de ruptures va en diminuant (C. Marche, 2008). Quelques catastrophes ont causé des dommages considérables et provoqué la mort des centaines ou des milliers de personnes : le barrage voûte Malpasset (France, 1959), Le barrage de Molare (Italie, 1935), la retenue de Taum Sauk (États-Unis, 2005) (Ancey, 2012).

### 2.2.1. Causes de rupture des barrages :

Le phénomène de rupture de barrage correspond à une destruction partielle ou totale d'un barrage. Parmi toutes les causes de rupture les plus connues, on cite singulièrement celles-ci :

**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 "). En dépit des progrès réalisés dans les champs de la géotechnique, il n'est pas possible d'avoir 100% une structure étanche, toute infiltration excessive et non planifiée peut conduire à la rupture du barrage (T.V. Panthulu et al, 2000)
- ✓ 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.

### 2.2.2. Les conséquences de la rupture :

D'une façon générale les conséquences sont de trois ordres : humaines, économiques et environnementales. L'onde de submersion ainsi que l'inondation et les matériaux transportés, issus du barrage et de l'érosion intense de la vallée, peuvent occasionner des dommages considérables :

- **Sur les hommes** : noyade, ensevelissement, personnes blessées, isolées ou déplacées.
- **Sur les biens** : destructions et détériorations aux habitations, aux entreprises, aux ouvrages (ponts, routes, etc.), au bétail, aux cultures, paralysie des services publics, etc.
- **Sur l'environnement** : endommagement, destruction de la flore et de la faune, disparition du sol cultivable, pollutions diverses, dépôts de déchets, boues, débris, etc., voire accidents technologiques, dus à l'implantation d'industries dans la vallée (déchets toxiques, explosions par réaction avec l'eau, etc.).

### 2.2.3. Les types de rupture :

La rupture est liée à une évolution plus ou moins rapide d'une dégradation de l'ouvrage susceptible d'être détectée par la surveillance et l'auscultation. Les barrages en remblai peuvent être touchés par une rupture progressive, causée par un phénomène d'érosion externe ou interne.

L'érosion externe est engendrée par des circulations d'eau sur la crête de l'ouvrage. Le phénomène peut durer quelques minutes à quelques heures selon la taille des matériaux, leur cohésion, le revêtement de la crête et la hauteur de l'eau qui s'écoule au-dessus du barrage. L'érosion interne correspond à l'entraînement des matériaux au sein du corps de l'ouvrage ou de sa fondation.

Elle est provoquée par des percolations excessives à travers l'ouvrage. Le conduit de fuite s'agrandit par érosion jusqu'à provoquer l'effondrement de la structure. Les barrages en maçonnerie ou en béton sont menacés par une rupture instantanée partielle ou totale, produite par renversement ou par glissement d'un ou de plusieurs plots.

- a) Rupture par la submersion ;
- b) Rupture par l'érosion régressive ;
- c) Rupture par érosion interne (infiltration) ;
- d) Rupture par érosion externe.

#### ➤ Quelques ruptures graves des barrages :

Entre 1959 et 1987, 30 accidents de rupture de barrages ont été recensés dans le monde, faisant 18 000 victimes. Seuls les accidents ayant causé plus de 100 morts sont répertoriés dans le tableau ci-après

#### a) Exemple de la rupture par la submersion :

La figure suivante représente la rupture de barrage Swift (en remblai de hauteur < 30 m) par la submersion 1964 aux USA



**Figure 2.9 :** Photo du Barrage de Swift aux USA avant la rupture.



**Figure 2.10** : Etat final de la rupture du barrage de Swift.

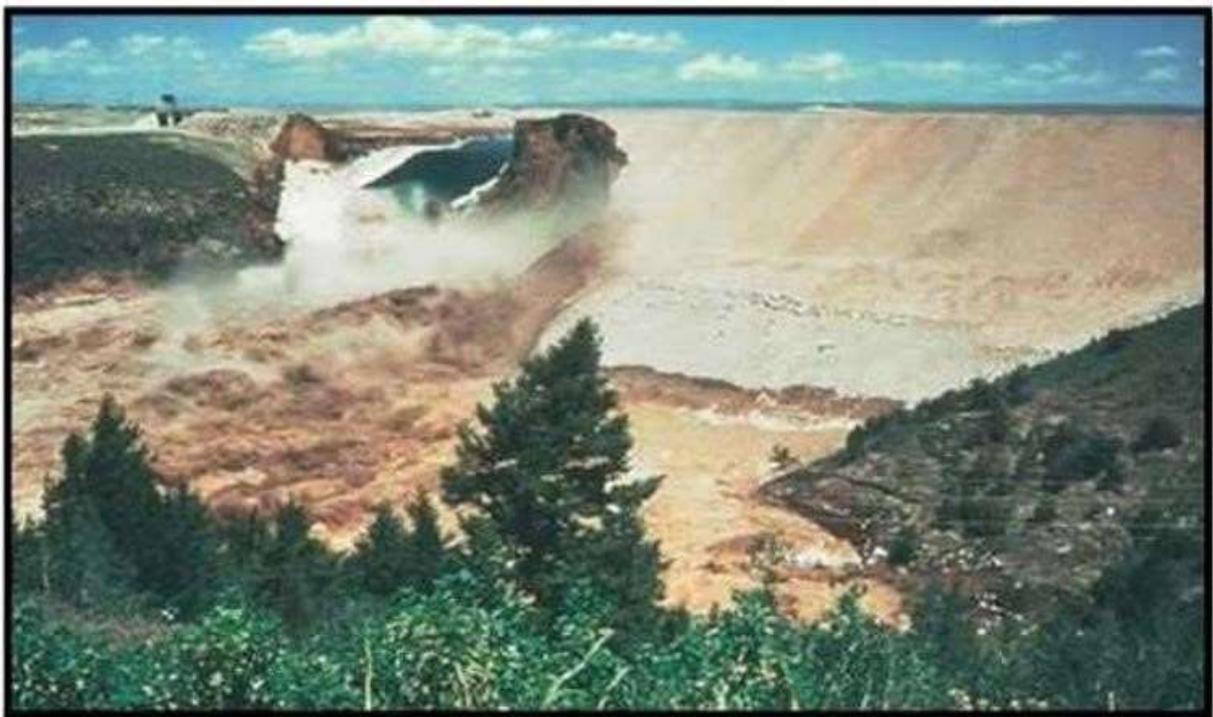
### **2.9.1. Exemple de rupture par l'érosion régressive (Barrage de Teton) :**

Plusieurs accidents provoqués par l'érosion, parmi les exemples les plus connus est le cas de la rupture du barrage de Teton. Ce barrage est situé sur la rivière de Teton (U.S.A). À une hauteur maximum de remblai de 93 mètres au-dessus de la rivière et la capacité de réservoir est de 356 millions de mètres cubes une fois rempli jusqu' au-dessus. La rupture du barrage de Teton pendant le remplissage initial du réservoir, 3 juin 1976 a tué quatorze personnes et a causé des centaines de millions de dollars dans des dégâts matériels en aval.

- Plusieurs petites infiltrations observées dans le mur de rive nord ;
- La première fuite principale coulait à environ 500 à 800 litres par seconde dans la rive droite de la roche ;
- Gros morceau de 6 mètres du barrage est tombé dans le tourbillon et dans des minutes le barrage entier s'est effondré (Panel indépendant, 1976), cité par



**Figure 2.11** : Photo de vue du barrage de Teton (rive nord proche de l'évacuateur).



**Figure 2.12** : Rupture du barrage de Teton.

**Tableau 2.2** : Résultats de simulation de coefficient de sécurité  $F_s$  :

d(m)	n=1.5	n=2	n=2.5	n=3
	$F_s$	$F_s$	$F_s$	$F_s$
6	1.16	1.16	1.173	1.174
7	1.16	1.173	1.173	1.18
9	1.17	1.174	1.173	1.18
14	1.17	1.174	1.175	1.18
28	1.17	1.174	1.179	1.189

Pente

#### 2.2.4. Calcul à la rupture

Les ruptures planes représentent un cas particulier très simple dans son principe. Pour les surfaces de rupture de forme quelconque, le calcul est beaucoup plus complexe. Pour évaluer la stabilité des talus par une méthode à l'équilibre limite, il existe des méthodes linéaires et non linéaires. **Les méthodes linéaires** sont des méthodes directes de calcul de  $F_s$  et les méthodes non linéaires nécessitent un processus itératif (A. Koudery, 2005).

#### 2.2.5. Les risques de rupture des barrages

Le risque « rupture de barrage » entre dans la catégorie des risques technologiques. Les causes ainsi que les mécanismes en jeu lors d'une rupture sont variables en fonction des caractéristiques propres au barrage.

### 2.3. Notion de coefficient de sécurité $F_s$ :

Le coefficient de sécurité est utilisé dans les calculs à la rupture. Il permet d'apprécier la marge de sécurité vis-à-vis de la rupture. Il existe plusieurs définitions possibles du coefficient de sécurité ; chacune présente des avantages et des inconvénients. Pour évaluer la stabilité d'une pente, l'ingénieur doit choisir entre plusieurs définitions du coefficient de sécurité, ce coefficient peut être un rapport de forces, de moments, de

grandeurs par rapport à une grandeur limite. Nous citons ci-dessous un certain nombre de ces définitions : (définition de Bishop)

$$F = \frac{\tau_{max}}{\tau} = \frac{\text{résistance au cisaillement maximale mobilisable}}{\text{résistance au cisaillement nécessaire à l'équilibre}} \quad \text{Eq.2.1}$$

Il faut noter qu'avec cette définition la valeur du coefficient de sécurité est une valeur ponctuelle qui va donc dépendre de la position du point M considéré le long de la surface testée.

$$F = \frac{\text{effort résistant}}{\text{effort moteur}} \quad \text{Eq.2.2}$$

Cette définition suppose que la surface testée est plane.

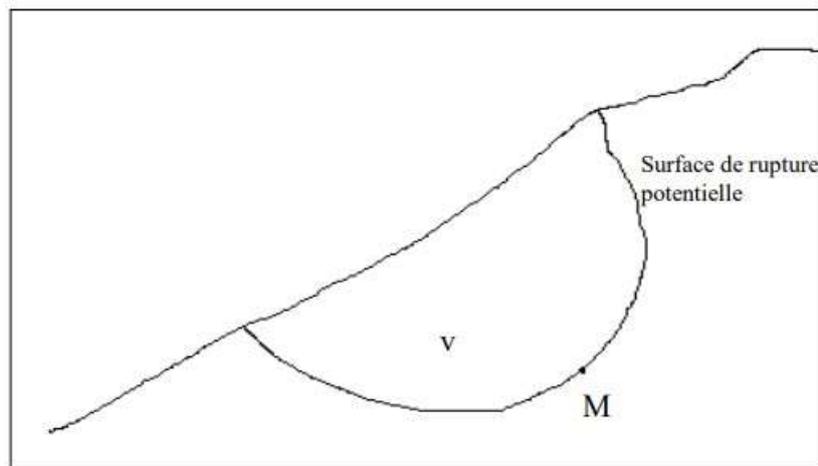
(Définition de Fröhlich) :

$$F = \frac{\text{moment résistant}}{\text{moment moteur}} \quad \text{Eq.2.3}$$

Cette définition suppose que la surface testée est circulaire (**ellipsoïdale en 3D**).

$$F = \frac{H_c}{H} = \frac{\text{hauteur critique}}{\text{hauteur réelle}} \quad \text{Eq.2.4}$$

Toutes ces définitions conduisent à des valeurs différentes pour une même géométrie, sauf dans le cas où l'on se trouve à la rupture ( $F=1$ ). La définition 1 est couramment employée. **FELLENIOUS** a proposé une définition voisine en considérant que l'équilibre du volume **V** (**figure 2.1**) est atteint lorsque le système des forces extérieures qui lui est appliqué mobilise les fractions  $\tan\phi/F$  et  $c/F$  des valeurs réelles du frottement et de la cohésion du milieu. Cette définition permet d'obtenir un coefficient de sécurité pour l'ensemble de la surface.



**Figure 2.1 :** Surface de rupture d'un talus

Cette définition a donc pour inconvénient de considérer que la rupture se produira simultanément en tout point, ce qui est fortement contestable dans le cas de sols fortement hétérogènes et n'est pas compatible avec la notion de "rupture progressive".

#### **2.4. Les méthodes analytiques d'analyse de stabilité des talus :**

Les méthodes habituellement utilisées sont basées sur une constatation d'expérience, à savoir que lorsqu'il y a glissement général de terrain, il y a séparation d'une masse de sol du reste du massif et glissement suivant une surface de rupture.

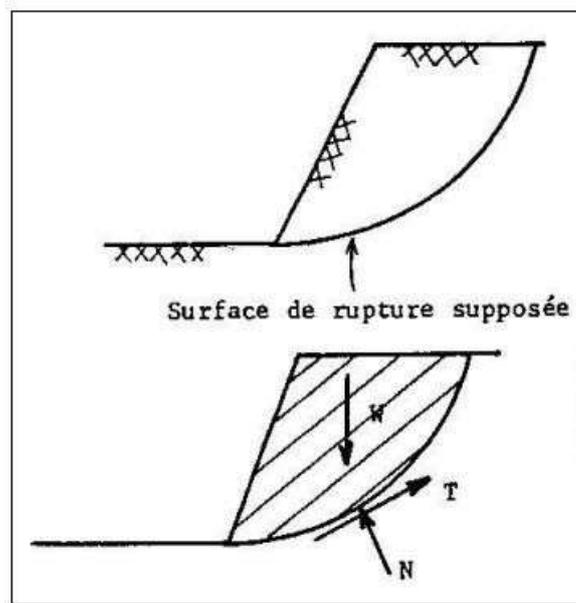
L'analyse de la stabilité des talus est traitée comme un problème d'équilibre limite.

On peut classer les méthodes d'analyse de la stabilité des talus schématiquement en 3 groupes (P. Lareal, 1980) :

##### **2.4.1 Les méthodes globales :**

Ces méthodes considèrent la totalité de la "masse libre" en faisant des hypothèses quant à la distribution des contraintes normales le long de la surface de rupture (figure 2.2). Exemples :

- Méthode du cercle de frottement (TAYLOR).
- Méthode de CAQUOT.
- Méthode de BIAREZ.



W : poids total.

N, T : Résultantes des contraintes le long de la surface de rupture.

**Figure 2.2 :** Surface de cisaillement d'un talus.

Ces méthodes sont utilisées seulement avec des surfaces de rupture circulaires, ou de simples lignes droites.

#### 2.4.2. Les méthodes des tranches :

La masse libre est divisée en de nombreuses tranches verticales et l'équilibre de chaque tranche est considéré.

Exemples :

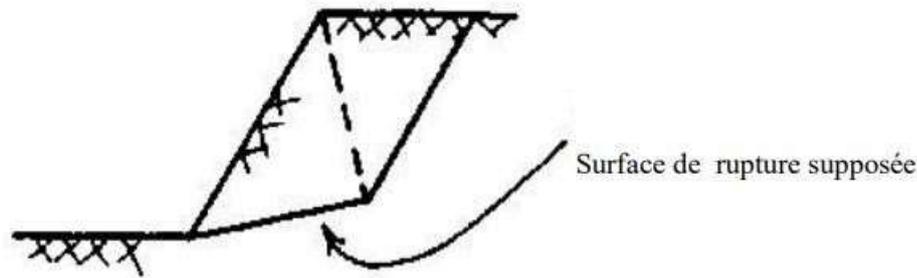
- ✓ Méthode suédoise du cercle **FELLENIUS**,
- ✓ Méthode de **BISHOP**,
- ✓ Méthode de **MORGENSTERN et PRICE**.

Ces méthodes considèrent l'équilibre d'une manière approchée (division en tranches) et sont applicables seulement aux surfaces de ruptures circulaires.

Cependant, le principe général de la méthode des tranches peut être utilisé pour d'autres formes de surfaces de rupture.

#### 2.4.3. La méthode des Coins :

Cette méthode est utilisée quand la surface de rupture peut être approchée de manière satisfaisante par 2 ou 3 lignes droites (**figure 2.3**).



**Figure 2.3 :** Surface de rupture approchée par 2 lignes droites.

Dans le cas de talus homogènes, pour des surfaces de rupture circulaires, les méthodes "globales" de **CAQUOT** ou **BIAREZ** semblent intéressantes.

Il semble qu'actuellement la méthode des tranches paraisse offrir la meilleure approche pour obtenir une solution précise pour n'importe quelle surface de rupture, ainsi que pour des sols stratifiés ou zonés (Sarma, par exemple).

## 2.5. Méthode des tranches de **BISHOP** et **FELLENIOUS** :

### 2.5.1. Exposé du problème :

Dans les deux cas (méthodes de Bishop et de Fellenius), on admet que la rupture a lieu suivant une surface de glissement en forme de cylindre, et qu'elle se produit instantanément le long de toute la surface.

On étudie donc l'équilibre des terres situées au-dessus de ce cercle, pour cela, on découpe le terrain en tranches et on calcule les forces pour chaque tranche, il faut alors, calculer par rapport au centre du cercle de glissement le moment des forces ayant tendance à entraîner le glissement et le moment des forces résistantes (cohésion, frottement interne) (G. Philipponnat & B. Hubert, 2000).

La méthode de calcul consiste à calculer la rupture pour tous les cercles possibles, le cercle qui représentera le minimum de coefficient de sécurité sera retenu comme la surface de rupture.

### 2.5.2 Hypothèses :

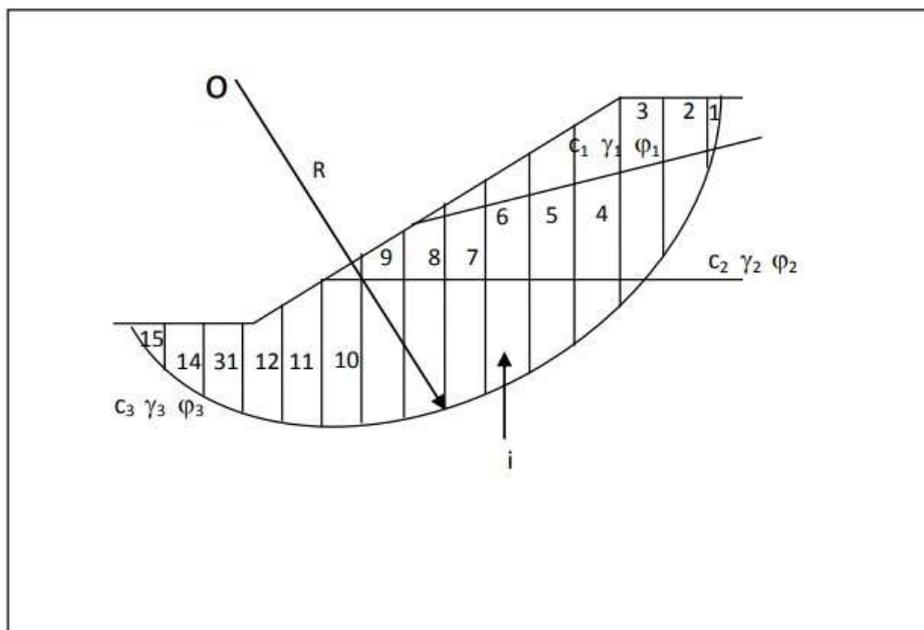
- Milieu hétérogène ;
- Circulation de l'eau (prise en compte des pressions interstitielles) ;
- On tient compte de l'interaction des tranches entre elles.

### 2.5.3 Etude de l'équilibre d'un talus par les méthodes de BISHOP et de FELLENIUS

L'exposé ci-dessous consiste à étudier la théorie de **FELLENIUS**, et la théorie de **BISHOP** généralisée, puis les hypothèses simplificatrices pour en déduire la théorie de **BISHOP** simplifiée.

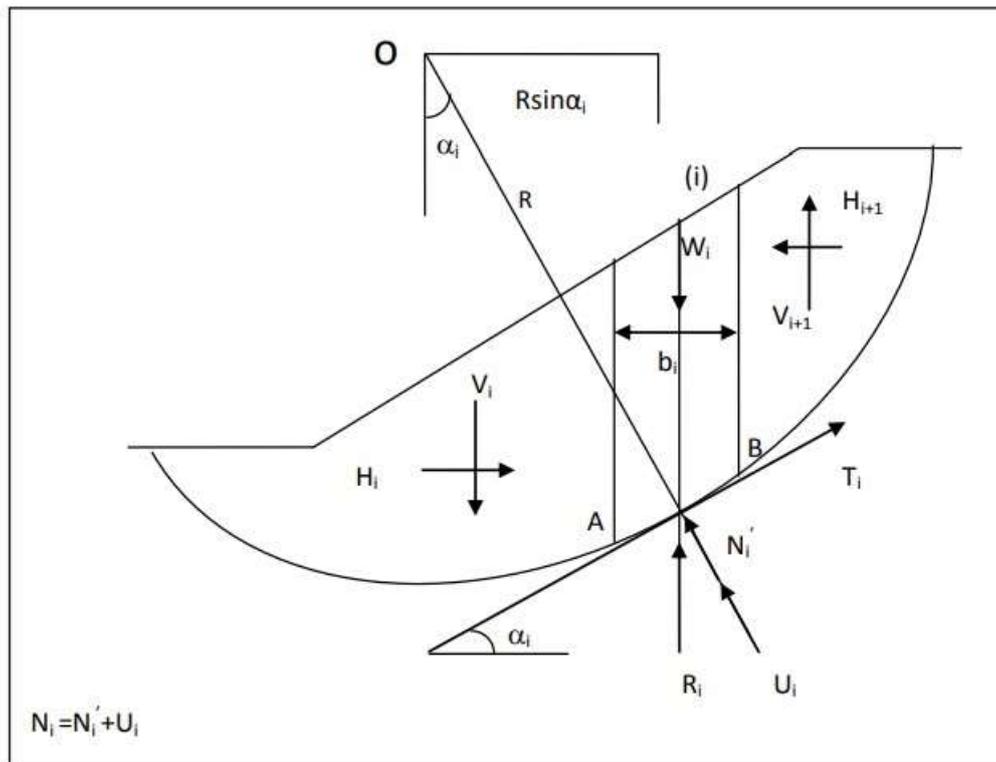
#### 2.5.3.1 Méthode des tranches de FELLENIUS

Considérons un talus recoupant un certain nombre de couches de sol de caractéristiques différentes :



**Figure 2.4 :** Découpage d'un talus en tranches élémentaires.

Si on veut étudier l'équilibre de l'une de ces tranches on prend par exemple la tranche (i), on aura :



**Figure 2.5** : Etude de l'équilibre d'une tranche (i)

Les forces qui s'exercent sur la tranche (i) sont :

- $W_i$  : le poids de la tranche.
- $R_i$  : la réaction du milieu sur l'arc de la tranche.
- $N_i$  : la composante normale.
- $T_i$  : la composante tangentielle.
- $N'_i$  : effort normal effectif.
- $U_i$  : la composante interstitielle due à l'eau.

Les réactions sur les faces verticales de la tranche (i) que l'on peut décomposer en réactions horizontales  $H_i$ ,  $H_{i+1}$  et en réactions verticales  $V_i$ ,  $V_{i+1}$ . Soit :

$$AB = li$$

$AB$  : Longueur de l'arc de la tranche.

$bi$  : la largeur de la tranche.

Avec  $\alpha_i$ , angle de la normale à l'arc avec la verticale.

- Au niveau de chaque tranche

Eq.2.5

$$F_s \frac{\int_s \tau_r ds}{\int_s \tau ds}$$

- Le coefficient de sécurité étant défini par :

Eq.2.6

$$\int_s \tau ds = \frac{1}{F_s} \int_s \tau_r ds = \int_s \frac{\tau_r}{F_s} ds = \int_s \left( \frac{c}{F_s} + \tau \frac{tg\phi}{F_s} \right)$$

On aura donc :

$$T = \frac{c \cdot l_i}{F_s} + N \frac{tg\phi}{F_s}$$

Eq.2.7

➤ **L'équation des moments par rapport au centre pour l'ensemble des tranches :**

- Le moment dû au poids "moment moteur" « Wi » :
- Le moment dû à la pression interstitielle « Ui » :
- Le moment dû à la force tangentielle « Ti » :

$$\sum_1^n RT_i = \sum_1^n R \left( \frac{c}{F_s} + N \frac{tg\phi}{F_s} \right)$$

Eq.2.8

Le moment dû à la force normale inter granulaire « N' » :

$$M(O(N)) = 0$$

Eq.2.9

Pour simplifier le calcul **FELLENIOUS** admet l'hypothèse suivante :

$$H_i - h_{i+1} = 0$$

Eq.2.10

$$V_i - V_{i+1} = 0$$

Eq.2.11

➤ **Equilibre des moments**

En simplifiant par (R) et en remplaçant ( $N_i$ ) par sa valeur : On obtient :

$$F_s = \frac{\sum_1^n [c_i l_i + (W_i \cos \alpha_i - U_i l_i) \operatorname{tg} \phi']}{\sum_1^n W_i \sin \alpha_i} \quad \text{Eq.2.12}$$

Où :

$$F_s = \frac{1}{\sum_1^n W_i \sin \alpha_i} \sum_1^n \left[ \frac{[c_i b_i + (W_i \cos \alpha_i^2 - U_i b_i)]}{\cos \alpha_i} \right] \quad \text{Eq.2.13}$$

L'équation (2.13) ou (2.14) est l'expression du coefficient de **FELLENIUS**.

### 2.5.3.2 Méthode des tranches de BISHOP

Les composantes **V<sub>n</sub>**, **V<sub>n+1</sub>**, **H<sub>n</sub>**, **H<sub>n+1</sub>** interviennent dans les efforts appliqués sur (i) (figure 2.5).

• L'équilibre des forces verticales :

$$W_i + (\Delta V_i - N_i + U_i l_i) \cos \alpha_i - \left( \frac{c_i}{F_s} l_i + N_i' \frac{\operatorname{tg} \phi'}{F_s} \right) \sin \alpha_i = 0 \quad \text{Eq.2.14}$$

$$N_i' \left( \cos \alpha_i + \frac{\operatorname{tg} \phi' \sin \alpha_i}{F_s} \right) = W_i + \Delta V_i - U_i l_i \cos \alpha_i - \frac{c_i l_i}{F_s} \sin \alpha_i \quad \text{Eq.2.15}$$

$$N_i' = \frac{W_i + \Delta V_i - U_i l_i \cos \alpha_i - \frac{c_i l_i}{F_s} \sin \alpha_i}{\cos \alpha_i + \frac{\operatorname{tg} \phi' \sin \alpha_i}{F_s}} \quad \text{Eq.2.16}$$

- L'équilibre des moments ;
- Le moment des forces motrices ;

- Le moment des forces résistantes s'opposant au mouvement :

$$\sum_1^n R \left( \frac{c_i l_i}{F_s} + N'_i \frac{tg \phi'}{F_s} \right) \quad \text{Eq.2.17}$$

La formule (2.22) s'appelle la formule **de BISHOP** exacte.

➤ Pour déterminer "FS" il faut :

- Procéder par itérations successives car "FS" figure aux deux membres de l'équation (2.22)
- Définir  $V_i$ , pour cela il faut faire une hypothèse supplémentaire.

### 2.5.3.3 Méthode de BISHOP simplifié :

A partir de l'équation (2.22) et en faisant l'hypothèse, l'équation (2.22) devient :

$$F_s = \frac{1}{\sum_1^n W_i \sin \alpha_i} \sum_1^n \frac{C_i' l_i \cos \alpha_i + (W_i - U_i l_i \cos \alpha_i) tg \phi_i'}{\cos \alpha_i + \frac{1}{F_s} tg \phi_i' \sin \alpha_i}$$

$$F_s = \frac{1}{\sum_1^n W_i \sin \alpha_i} \sum_1^n \frac{C_i' b_i + (W_i - U_i b_i) tg \phi_i'}{\cos \alpha_i + \frac{1}{F_s} tg \phi_i' \sin \alpha_i}$$

Avec,

Dans le cas d'un séisme :

$$F_s = \frac{1}{\sum_1^n W_i \sin \alpha_i + \frac{a}{R} \sum_1^n W_i d_i} \sum_1^n \frac{C_i' b_i + (W_i - U_i b_i) tg \phi_i'}{\cos \alpha_i + \frac{1}{F_s} tg \phi_i' \sin \alpha_i}$$

Avec,

$a$  : coefficient de sismicité.

**D** : bras de levier entre le centre de glissement et le centre de gravité de la Tranche considérée.

L'expression de **FS** n'est pas explicite. On ne peut donc pas calculer **FS** directement. On utilisera donc une méthode implicite de la forme  $F_{m+1} = f(F_m)$ .

La valeur de **FS** de départ peut être prise égale à  $F_{s0}$  la valeur trouvée par la méthode de **FELLENIOUS**. La convergence est en général assez rapide. On s'arrêtera lorsque  $(F_{m+1} - F_m)$  est inférieur à un seuil fixé à l'avance.

La méthode de Bishop est plus précise que celle de Fellenius, mais elle nécessite trois à quatre fois plus de calcul (trois itérations) ; les coefficients de sécurité obtenus sont en général un peu plus élevés. Le plus souvent, pour éviter d'alourdir exagérément la masse de calcul, on détermine le cercle le plus critique par la méthode de Fellenius et on vérifie que la valeur du coefficient de sécurité calculé par la méthode de Bishop est supérieure à celle du coefficient calculé par la méthode de Fellenius. Si ce n'est pas le cas, il faut reprendre la recherche du cercle selon la méthode de Bishop (Philipponnat G. & Hubert B, 2000).

## 2.6. Les méthodes numériques :

Dans le domaine de mécanique des fluides, la plupart des problèmes rencontrés sont traités de point de vue macroscopique par des équations différentielles. Pour certains cas, la modélisation analytique n'est plus possible que pour des problèmes simples. Il est donc nécessaire d'utiliser des méthodes numériques. Aujourd'hui ces méthodes ont connu un développement considérable lié à la croissance des performances des ordinateurs, elles sont actuellement utilisées comme des outils d'étude des écoulements dans de nombreux domaines industriels : industrie pétrolière, aéronautique, nucléaire, etc. Les méthodes numériques permettent, en effet la résolution des grands problèmes rencontrés dans les cas pratiques dans un temps raisonnable et offrant une très grande souplesse d'emploi. Parmi les méthodes numériques utilisées on trouve :

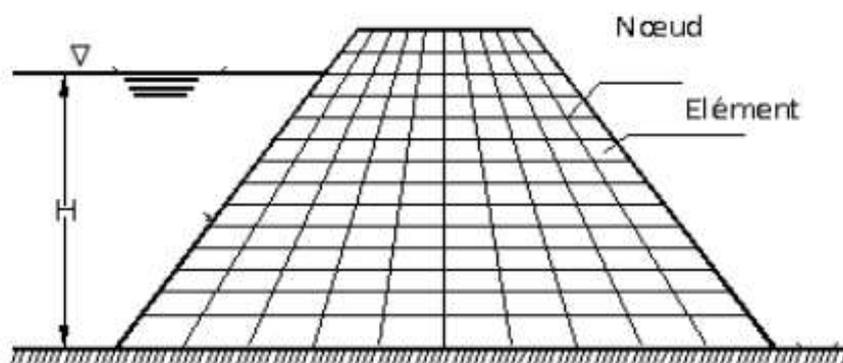
- **Méthode des éléments finis,**
- **Méthode des différences finies.**

### 2.6.1. La méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finie (**MEF**) a été utilisée pour la première fois en 1946 pour la résolution des équations d'équilibre en élasticité ou en élastoplasticité. Il a été démontré ensuite que cette méthode pouvait aussi être utilisée pour résoudre des

problèmes physiques régis par des systèmes d'équation aux dérivées partielles comme par exemple celui de répartition de la charge ou des débits dans les écoulements en milieu poreux. Le principe de cette méthode consiste à remplacer la structure physique à étudier par une représentation schématique de mêmes dimensions, soumise aux mêmes conditions aux limites et formée par un nombre fini d'éléments, lié entre eux par des nœuds, qui représente un maillage. La méthode des éléments finis est une méthode d'interpolation, qui est très puissante, puisqu'elle permet de simuler le comportement d'un milieu continu soumis à des sollicitations externes connues et/ou à l'action de gravité. Elle utilise des modèles rhéologiques qui relient les contraintes aux déformations. Elle permet notamment de déterminer les efforts et les déformations dans un massif quelconque, de localiser aisément les zones soumises à de fortes contraintes, les zones soumises à des fortes déformations, et les zones en rupture et d'effectuer aussi les calculs d'écoulement. L'approche par éléments finis comprend deux principales étapes :

- La première se fait en décomposant le domaine matériel à étudier (milieu continu) en une série de sous domaines de formes géométriques simples appelés éléments. Sur chaque élément le Comportement local est représenté par une fonction simple définie analytiquement de manière unique en fonction des coordonnées des nœuds géométriques de cet élément.
- La deuxième étape est une autre discrétisation qui consiste à transformer les équations aux dérivées partielles en équations algébriques en utilisant une approximation simple des variables inconnues. L'étape suivante est de faire un traitement élément par élément de l'équation. La solution est obtenue sous forme d'une équation générale linéaire ou non du système global formé par l'assemblage des équations algébriques obtenues sur tous les éléments constituant le domaine géométrique.



**Fig.2.6** : Division d'un barrage en éléments finis

### ➤ Démarche éléments finis

- Les principales étapes de construction d'un modèle éléments finis, sont les suivantes :
- Discrétisation du milieu continu en sous domaines ;
- Construction de l'approximation nodale par sous domaine
- Calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème ;
- Assemblage des matrices élémentaires ;
- Prise en compte des conditions aux limites ;
- Résolution du système d'équations.

#### 2.6.2. La méthode des différences finies (MDF) :

La méthode des différences finies (MDF) est la technique numérique la plus ancienne qui permet la résolution numérique des équations aux dérivées partielles, elle était largement utilisée avant le développement de la méthode des éléments finis. Le principe de cette méthode Consiste à subdiviser le domaine à étudier en un nombre déterminé de nœuds, pour chaque nœud, les dérivées sont remplacées par une fonction algébrique. La fonction recherchée est représentée par un développement limité en série de Taylor. La résolution de ce système d'équations permet d'obtenir la distribution de la fonction étudiée dans le domaine d'étude. Cette méthode convient pour les géométries simples, mais elle est très difficile à appliquer aux objets à géométrie complexe à cause de la rigidité du maillage. D'autre part, elle prend difficilement en compte des conditions aux limites du type Neumann.

### 2.7. Conditions d'analyse de la stabilité d'un barrage en terre :

La stabilité des talus d'un barrage en remblai doit être vérifiée aux différentes phases de la construction et de la vie de l'ouvrage. On distingue généralement trois classes de conditions pour lesquelles la stabilité d'un barrage en remblai doit être vérifiée.

#### 2.7.1. Fin de construction :

L'analyse de la stabilité pour cette condition sert à vérifier que le barrage peut être construit jusqu'à sa hauteur finale sans rupture. Il n'y a pas encore d'action de la retenue, mais les pressions interstitielles sont élevées car les surpressions dues à la construction ne se sont pas encore dissipées. La résistance est fonction de la contrainte effective  $\sigma'$  et elle devient de plus en plus faible avec l'augmentation de la pression interstitielle  $u$  ( $\sigma' = \sigma - u$ ). Dans ce cas, il peut se produire un glissement du talus à cause de la

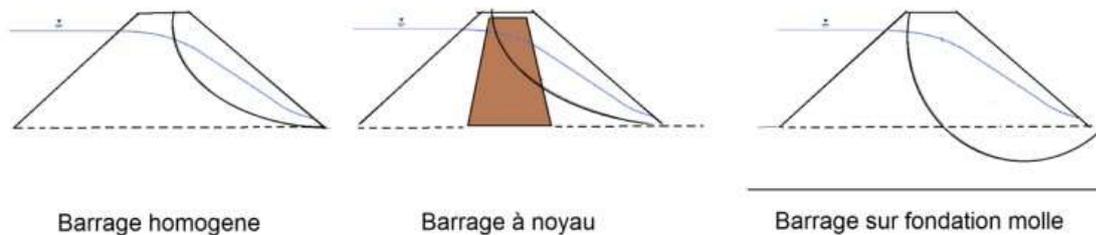
diminution de la résistance au cisaillement. Il est recommandé d'analyser le talus en aval.

### 2.7.2. Période d'exploitation :

L'analyse de la stabilité sert dans ce cas à vérifier que le barrage est stable après remplissage du réservoir et une fois que le réseau d'écoulement s'est établi à travers le barrage.

Dans le secteur amont du barrage, la contrainte effective (et donc la résistance) est réduite à cause de la pression interstitielle. Cette diminution de la stabilité, associée à la réduction de  $\sigma'$  est cependant compensée par la pression du réservoir qui tend à s'opposer au glissement du talus amont.

Dans le secteur aval du barrage, en raison de l'écoulement dans le massif une surface de suintement peut apparaître sur ce talus. La poussée d'écoulement qui s'exerce sur les grains solides a tendance à le déstabiliser, un drainage du talus aval est généralement prévu. Lorsque la retenue est pleine, l'écoulement est donc défavorable à la stabilité du talus aval. Les caractéristiques mécaniques du sol  $C$  et  $\Phi$ , quel que soit la condition de perméabilité du matériau de construction, peuvent être obtenus à partir de l'essai de résistance au cisaillement à long terme, sur consolidé, saturé et drainé.



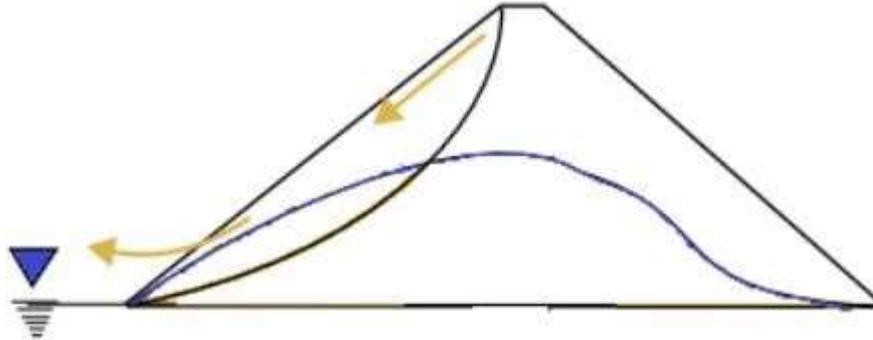
**Figure 2.7 :** Surface de rupture les plus critiques en fonction du type de barrage en terre

### 2.7.3. Vidange rapide :

La condition 'vidange rapide' est rencontrée lorsque le niveau d'eau diminue brusquement au-dessous du niveau normal de la retenue (Figure 31)

. Dans ce cas les pressions d'eau dans le corps de l'ouvrage ne sont pas dissipées, alors que la pression d'eau extérieure a disparu. Le talus amont se trouve dans une situation plus défavorable qu'en condition normale d'exploitation. C'est donc ce

secteur amont du barrage qui est affecté par la condition 'vidange rapide', on conserve la pression et on enlève l'effet stabilisateur du réservoir.



**Figure 2.8 :** Glissement du parement amont sous l'effet de vidange rapide

### 2.8. Facteurs de sécurité minimaux :

Selon les normes **DIN** les facteurs de sécurité minimaux utilisés dans les barrages en terre sont dans les :

- Conditions normales (lac plein à niveau normal) **FS**≥**1.4** ;
- Conditions spéciales sans séisme (lac plein à niveau exceptionnelles, vidange rapide) **FS**≥**1.3** ;
- Conditions exceptionnelles avec séisme (lac plein à niveau normal, vidange rapide, lac vide) **FS**≥**1.2**

On note qu'à l'aide d'outils informatiques performants les surfaces de glissements critiques sont trouvées rapidement. Un exemple est donné dans l'application suivante élaborée à l'aide **du logiciel PLAXIS**.

Seed suggère les recommandations pratiques suivantes pour éviter les effets néfastes des séismes, sur la base d'une analyse des ruptures des barrages, et certains critères de leur comportement défectueux :

## Références bibliographiques :

- [1] **MARCHE .C ETVERZENI.G.** « barrage crues de rupture et protection civile ». DEUXIEME EDITION PRIX ROBERVAL 2004.
- [2] **N. Lekouaghet** ,2023, cours barrages, M2VOA, Université 8 mai 145 Guelma.
- [3] **BLONDEAU.F.** « les méthodes d'analyse de stabilité ». BULL. LABO. P. ET CH, SPECIAL, MARS 1976.
- [4] **DEGOUTT. G. (2003).** « Les mécanismes de rupture des digues ». GRENOBLE : ENGREF, FORMATION CONTINUE, SUPPORT D'INTERVENTION, P 32.
- [5] **Bouzid, T. (2010).** Les barrages et la politique hydraulique en Algérie : état, diagnostic et perspectives d'un aménagement durable. These de doctorat, Université de Mentouri– Constantine.
- [6] **Degoutte, G. and P. Royat (1999).** Aide-mémoire de mécanique des sols, ENGREF
- [7] Pris à partir de profil en long l'axe du barrage en terre hétérogènes
- [8] **Patrick le Delliou (2003)** : « Les Bauages : conception et maintenance ». Ed. ENTPE, PRESSES universitaires Dlyon.270 p
- [9] **Toumi. A, Remini B.** ' *Les fuites à travers les rives du barrage de Foum-ElGherza, Biskra, Algérie* ', « revue vecteur environnement, Canada, novembre, 2003. PP67-71.
- [10] *Agence Nationale des barrages et transferts (A.N.B.T), service d'exploitation du barrage de Hammam Grouz (B.H.G), « Mesures hydrologiques et d'auscultation du barrage de Hammam Grouz 1999-2006 », 2007.*
- [11] **Ancey Christophe.** Note de cours : Hydraulique à surface libre.LHE, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Ecublens, CH-1015 Lausanne, 2012.
- [12] **ANCOLD.** Guidelines for design of dams for earthquake. Australian National Comminittee on Large dams, Melbourne, 1998.
- [13] **Arab R, Gendrin P&Faure Y.H.** Drainage sous remblai, géocomposite Somtube.Revue Travaux, Paris, 2002, pp.23-26.
- [14] **Femmam, H. (2014).** Analyse numérique de l'influence des pressions interstitielles sur la stabilité des talus. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider Biskra.
- [15] **Griffiths, D. V., & Lane, P. A. (1999).** Slope stabilité analysis by finite éléments. Géotechniques, 49(3), 387-403.

- [16] **Femmam, H. (2014).** Analyse numérique de l'influence des pressions interstitielles sur la stabilité des talus. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider Biskra.
- [17] Heragmi.A, 2009. CHOIX ET CONCEPTION DE L'ORGANE DE L'ETANCHEITE DES BARRAGES EN TERRE BARRAGE ELAGREM JIJEL. Diplôme de magister Annaba, 94p.
- [18] Rolley.R et als, 1977. TECHNIQUE DES BARRAGES EN AMENAGEMENT RURAL ;
- [19] **Almaça C. (1970b.)** : Sur les barbeaux (genres et sous-genre Barbus) de l'Afrique du Nord. Bull. Mus. Natl. Hist. Nat. Paris. 42 : 141-158.
- [20] **Almaça C. (1972)** : Sur la systématique des barbeaux (genre et sous genre Barbus) de la péninsule Ibérique et de l'Afrique du nord. Arch. Mus. Boc. Série 2(3) :319-346. (ad de mémoire
- [21] Toumi. A, Remini B. ' Les fuites à travers les rives du barrage de Foum-El-Gherza, Biskra, Algérie', « revue vecteur environnement, Canada, novembre, 2003. PP67-71.
- [22] Agence Nationale des barrages et transferts (A.N.B.T), service d'exploitation du barrage de Hammam Grouz (B.H.G), « Mesures hydrologiques et d'auscultation du barrage de Hammam Grouz 1999-2006 », 2007
- [23] REMINI B., KETTAB A., HMAT H. 1995-. Envasement du barrage d'IGHIL EMDA (Algérie). Revue Internationale de l'eau : La Houille Blanche no 2/3, pp.23-28

### NETO-graphie :

Wikipédia (<https://fr.wikipedia.org/wiki/Barrage>)

- [a] CHADI A. -1990- (*L'envasement des retenues de barrages*). Séminaire : *Stratégie de gestion des eaux. Horizon 2010*. Alger 28- 29 et 30 Mai.
- [b] HADJI.T. et CHADI. A. -1991- *Quelques aspects sur l'envasement des retenues Algériennes. Colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages. Alger les 1'2 et 3 Décembre*
- [c] REMINI B., KETTAB A., HMAT H. 1995-. *Envasement du barrage d'IGHIL EMDA (Algérie)*.
- [d] *Revue Internationale de l'eau : La Houille Blanche no 2/3, pp.23-28*
- [e] BELHADJ. *Mémoire magister, 2006, université de Batna*

[f] Benaïcha, A, « *Quantification des transports solides et de l'envasement du barrage de Foug El Gherza (Biskra)* ». 2010.

## *Chapitre 3 : présentation de la zone d'étude*

**M2-VOA  
AU : 2023-2024**

## Chapitre 3 : présentation de la zone d'étude

### 3.1. Introduction :

L'Algérie par son climat se trouve confrontée à une rareté et à une distribution irrégulière des pluies dans le temps et dans l'espace. Néanmoins ces ressources en eau, aussi bien de surface que souterraines, constituent l'une des principales richesses sur lesquelles repose la prospérité de ce pays dans l'avenir, ainsi que la réussite de son développement économique, agricole et social.

Donc l'insuffisance de l'eau nous oblige à protéger toutes les ressources disponibles contre toutes pertes et à l'utiliser d'une manière rationnelle et scientifique, et ce, pour satisfaire les besoins des différents secteurs (AEP, l'industrie, l'irrigation).

Par ailleurs pour pallier au déficit observé dans l'exploitation des eaux souterraines considérées comme potables, la mobilisation des eaux superficielles par la construction de barrages et de retenues collinaires, s'avère indispensable. Cependant la durée de vie de ces infrastructures de stockage et leur exploitation peut être réduite principalement par l'érosion climatique, l'évaporation et l'infiltration.

Dans ce chapitre nous allons montrer la zone d'étude des barrages au quelle nous ferons notre mémoire, il s'agit des barrages de Zit-El-Emba, Beni-Haroun, Zardezas, et HammamGrouz.

### 3.2. Présentation du barrage de Zit-El-Emba :

La figure 3.1 montre une photo récente du barrage de Zit-El-Emba.



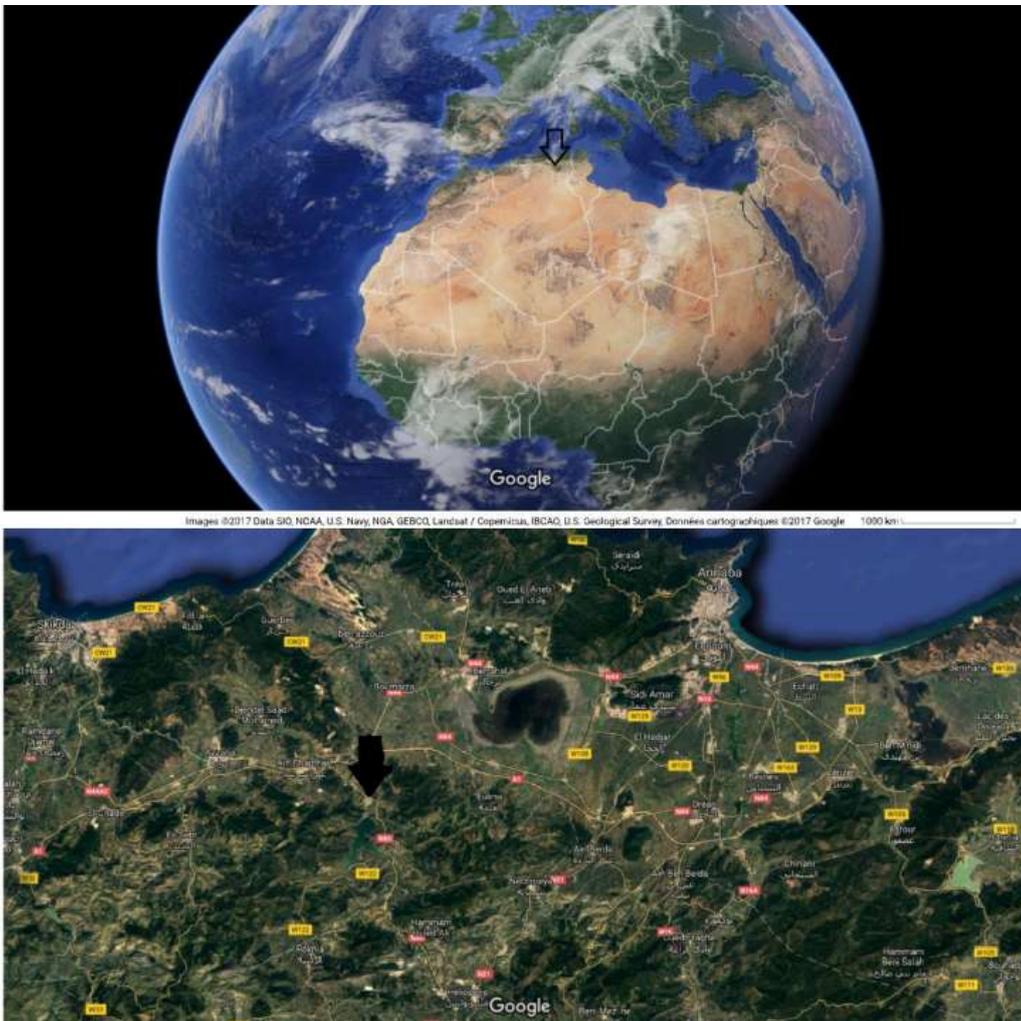
**Fig.3.1.** Photo du barrage de Zit-El-Emba

### 3.2.1. Situation Géographique :

Le barrage de Zit-El-Emba est située au nord est Algérien dans la commune de Bekkouche Lakhdar wilaya de Skikda. Cette dernière se situe sur la frange tellienne de l'est d'Algérie.

Elle est limiter :

- Au Nord par la mer méditerranéenne.
- Au Sud par la wilaya de Constantine.
- A l'Est par la wilaya d'Annaba.
- A l'Ouest par la wilaya de Jijel.



**Fig. 3.2.** Photo par satellite de l'emplacement du barrage de Zit-El-Emba

### 3.2.2. Situation du barrage de Zit El Emba Le barrage de Zit El Emba :

Est situé au Sud Est de la wilaya de Skikda, elle est délimitée :

- Au Nord par la commune de Ben-Azouz (wilaya de Skikda).
- Au Sud par la commune de Berknia et Bouati-Mahmoud (wilaya de Guelma)
- A l'Est par la commune de Berrahal et Eulma (wilaya d'Annaba)
- A l'Ouest par la commune de Ain Charchar et Es-Sebt (wilaya de Skikda).

Ces coordonnées géographiques sont :

$$X= 883.50, Y=207.50, Z=80.50.$$

### 3.2.3 Destination et rôle du barrage :

- Régularisation de l'écoulement sur plusieurs années
- AEP des communes Azzaba, Djendel.Ain, cherchar + renforcement AEP Skikda ville. 33000 m<sup>3</sup>/jour.
- Irrigation par réseaux (ONIDE).
- Irrigation des terres adjacents au barrage : 2500 ha : 3.5 hm<sup>3</sup> /an.
- Irrigation par lâchers : Ben Azzouz –Marsa Oued El Kebir – Boumaiza –El Hamma 6.0 hm<sup>3</sup> /an.

### 3.2.4. Relief :

La région fait partie de l'Atlas tellien. Le relief est constitué de plaines et de vallées fertiles irriguées par des cours d'eaux, de collines à pentes régulières, de montagnes (Djebel Elgrar 1078 m, Djebel Bouaslouge 879 m etc..) et d'Oueds. Les principaux Oueds sont Oued El Hammam et Emchekel affluents de l'Oued Kebir.

### 3.2.5. Sol :

La commune de Bekkouche Lakhdar a en général un sol de texture argilo limoneuse.



**Fig. 3.3** : photo satellite du sol de la région d'étude (Zit El Emba)

### 3.3. Hydro climatologie :

#### 3.3.1. Aspect du climat :

Le climat est de type méditerranéen, il est caractérisé par des hivers doux pluvieux et des étés chauds et secs.

#### 3.3.2. Les précipitations :

La pluie est un facteur climatique très important qui conditionne l'écoulement saisonnier et influence directement le régime des cours d'eau ainsi que celui des nappes aquifères. La région d'étude est considérée parmi les régions les plus arrosées avec une moyenne annuelle de l'ordre de 700 mm. Elles sont relativement importantes, variables et irrégulières d'une année à une autre.

##### • Pluies moyennes mensuelles

Le mois le plus pluvieux est le mois de décembre. Sa pluviométrie peut atteindre parfois les 123 mm.

**Tableau 3.1 :** Précipitations moyennes mensuelles :

MOIS	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	ToT
Pluie moyenne mensuelle	32	64	91	123	104	87	82	57	57	14	4	9	724

##### • Pluies moyennes annuelles :

Elles sont assez importantes, elles varient entre 491 mm et 1080 mm La moyenne annuelle de 15 ans d'observation égale 708.44 mm

**Tableau 3.2 :** Pluies annuelles de 15 ans.

Année	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Pluies moyenne	491	786	963	626.10	739.40	596.80	883.40	769.40	1080.40	715.60
Année	2012	2013	2014	2015	.	Moyen	.	.	.	.
Pluies moyenne	738	669	811.8	760	.	708.44	.	.	.	.

#### 3.3.3 Température :

La température moyenne saisonnière varie entre 10°C en hiver et 24,52°C en été. Par contre la moyenne annuelle et de l'ordre de 17.06 °C.

**Tableau 3.3:** Température moyennes mensuelles de 20 ans.

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout
Température	22.6	18.82	14.8	11.7	10.89	11.35	12.3	14.4	17.7	21.1	24.1	24.74

### 3.3.4. L'humidité et vent :

L'humidité est plus élevée en hiver qu'en été, le taux d'humidité moyen au cours de l'année est de 70%.

Le vent est un facteur important du climat, il influe sur la température, l'humidité et l'évaporation. La direction, la fréquence et la vitesse des vents sont variables au cours de l'année. En générale, la connaissance de la vitesse et de la direction des vents est primordiale pour la mise en place d'un ouvrage quelconque. Les vents dominants dans la région sont ceux du Nord-Ouest avec une vitesse assez constante au cours de l'année, entre 1.9 et 2.5 m/s, avec un maximum en hiver et un minimum en été

### 3.4. Milieux physiques :

#### 3.4.1. Délimitation du bassin versant :

La superficie du bassin versant du barrage Zit-El Emba est de 485 km<sup>2</sup>. Le bassin a une forme compacte triangulaire et comprend la branche Est de l'Oued Hammam (2/5) de la superficie générale, et la branche Ouest de l'Oued Mouguer (3/5) de la superficie générale. La digue est implantée sur les terrains de la wilaya de Skikda et la majeure partie des eaux sont stockées sur les terrains de la wilaya de Guelma.

Les côtes de prise d'eau varient de 1200 m en tête jusqu'à 50 m dans le site de l'aménagement. Quoique la majeure partie du bassin (68%) est située entre les côtes 600–200 m, la hauteur moyenne du bassin est de 376 m, son réseau hydrographique est bien développé. La vallée du fleuve est trapézoïdale, les versants de la vallée sont abrupts, envahis de buissons, en grande partie en herbes.

Le climat du bassin est conditionné par sa situation géographique, l'influence de la mer d'une part et du relief d'autre part.



**Fig. 3.4** : L'extrait de la carte topographique d'Algérie 2016

### 3.5. Présentation de la wilaya de Skikda :

La Wilaya de Skikda est située au Nord-est de l'Algérie, elle s'étend sur une superficie de 4137,68 Km<sup>2</sup>. Elle dispose de 130 km de côtes qui s'étalent de la Marsa à l'Est jusqu'à Oued Z'hour aux fins fonds du massif de Collo à l'Ouest. Elle est limitrophe avec les Wilayas d'Annaba, Guelma, Constantine et Jijel.

La Wilaya de Skikda est érigée lors du découpage administratif de 1974. Elle comprend Treize Dairas regroupant Trente-huit communes avec une population avoisinant les 804697 habitants [4].



**Figure 3.5** : Situation géographique de la Wilaya de Skikda [5].

### 3.6. Présentation du site d'étude (Barrage de Zit-Emba) :

La commune de Bekkouche Lakhdar est située au Sud de la wilaya de Skikda, elle est délimitée :

- Au Nord par la commune de Ben Azouz (Wilaya de Skikda) ;
  - Au Sud par la commune de Berkina et Bouati Mahmoud
  - A L'Est par la commune de Barrahal et Eulma (Wilaya d'Annaba) ;
  - A L'Ouest par la commune d'Ain Charchar et Es-Sebt (Wilaya de Skikda)
- (Belgadj, 2006) (Fig. 3).



**Figure 3.6** : Carte géographique des communes de la Wilaya de Skikda [6] .

Le barrage de Zit -Emba est situé sur l'Oued Hammam dans la partie Nord-est de l'Algérie à 2 km de la localité de Bekkouche Lakhdar dans la Wilaya de Skikda. La partie aval de la cuvette de la retenue se trouve dans la wilaya de Skikda, les parties centrale et amont sont dans la wilaya de Guelma ( Harrat & Achour, 2011) .

Ce barrage est destiné à l'alimentation en eau potable de Skikda et l'irrigation de la plaine Ben-Azzouz et Azzaba et des zones avoisinantes

Le tableau 4.5 représente les caractéristiques techniques de barrage Zit-Emba :

**Tableau 3.4 :** Caractéristiques techniques de barrage de Zit-Emba (ANBT).

<b>Année de construction</b>	1989
<b>Année de Mise en eau</b>	2002
<b>Capacité</b>	117,39 hm <sup>3</sup>
<b>Capacité dernier levé (2004)</b>	116,59 hm <sup>3</sup>
<b>Apport moyen annuel</b>	50,00 hm <sup>3</sup> /an
<b>Envasement annuel</b>	0,24 hm <sup>3</sup> /an
<b>Surface du bassin versant</b>	485,00 km <sup>2</sup>
<b>Hauteur</b>	55,00 m
<b>Longueur</b>	688,00 m
<b>Côte retenue Normale (R.N)</b>	86,00 m
<b>Côte Plus Hautes Eaux (P.H.E)</b>	91,00 m
<b>Déversoir à seuil libre</b>	1094,00 m <sup>3</sup> /s

### 3.7. Cadre géologique de la région d'étude :

La région de Skikda fait partie de l'ensemble géologique du Tell d'Algérie Nord-orientale. Cet ensemble qui s'étend de la région de Constantine à la frontière Algéro-Tunisienne. Sa structure est trop complexe, elle est due essentiellement à des mouvements tectoniques tertiaires. La région concernée par cette étude s'étend sur de grandes surfaces représentées sur les cartes géologiques au 1/50000 de Hammam Meskhoutine, Guelma, Ain Berda (Penthièvre) et Azzaba (Jemmapes) (Vila ; 1980 ; Lahondère, 1987).

### 3.8. Etude Climatique :

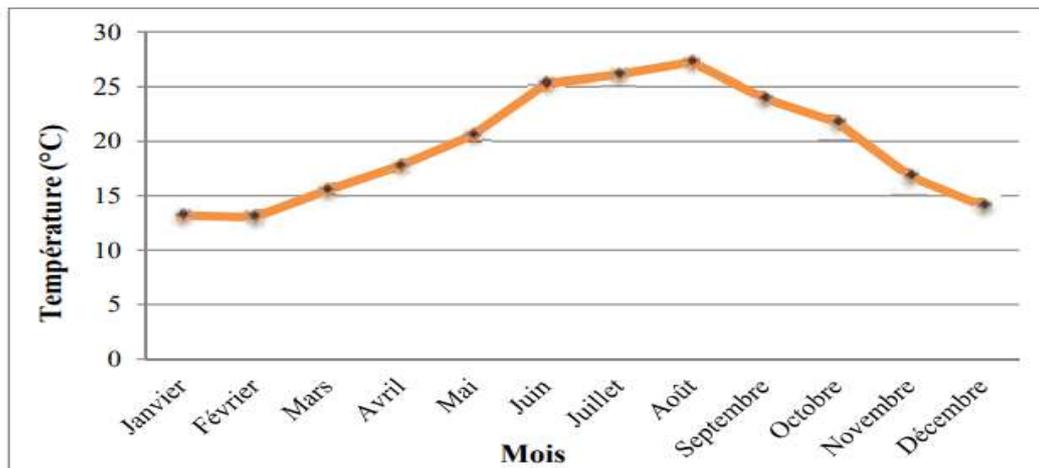
Le climat des régions d'étude est du type méditerranéen pluvieux en hiver et sec en été. Pour l'étude climatique et vu l'inexistence des stations météorologiques, les données viennent de la station météorologique de Skikda. La période observée s'étend de 1997 à 2012).

#### 3.8.1 La température :

La température est un facteur régissant le phénomène d'évapotranspiration et donc le déficit d'écoulement annuel et saisonnier. Sur une période s'étalant de 1997 à 2012, nous constatons qu'à l'échelle mensuelle, le mois le plus froid à Skikda est le mois de février avec une température de 13,02 °C et le mois le plus chaud est le mois d'août avec une température de 27,21 °C (Chaoui, 2007) (Tab 3.5 et Fig.3.7).

**Tableau 3.5** : Températures moyennes mensuelles en °C (1997-2012).

Station	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Dec
Skikda	13,16	13,02	15,51	17,74	20,58	25,25	26,08	27,21	23,94	21,73	16,76	14,06

**Figure 3.7:** Variation de la température moyenne mensuelle : station de Skikda (1997-2012).

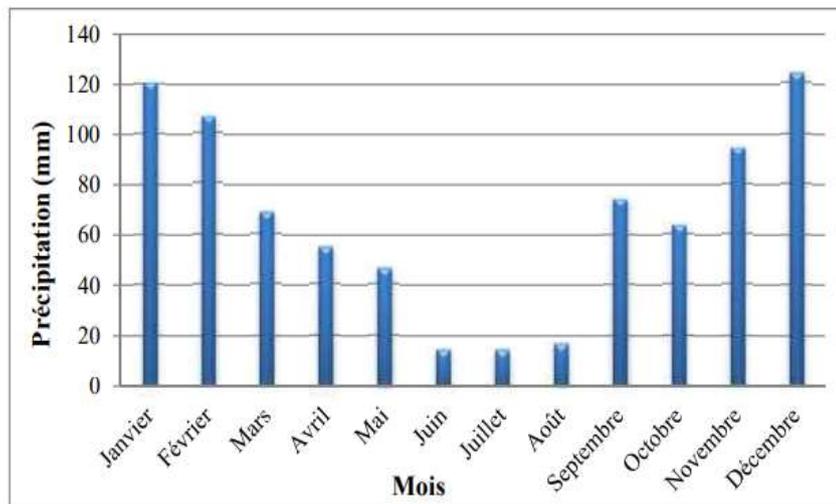
### 3.8.2 Les précipitations :

Les précipitations constituent l'unique « entrée » des principaux systèmes hydrologiques continentaux qui sont les bassins versants, comme elles constituent un paramètre hydro- climatologique d'une grande importance dans leur fonctionnement (Bounouira, 2007).

D'après les données de la station météorologique de Skikda concernant la période 1997- 2012, le mois le plus pluvieux est le mois de décembre avec un taux de précipitation de 123,84 mm. Alors que juillet représente le mois le plus sec des précipitations atteignant les 13,61 mm (**Tab 3.6, Fig 3.8**).

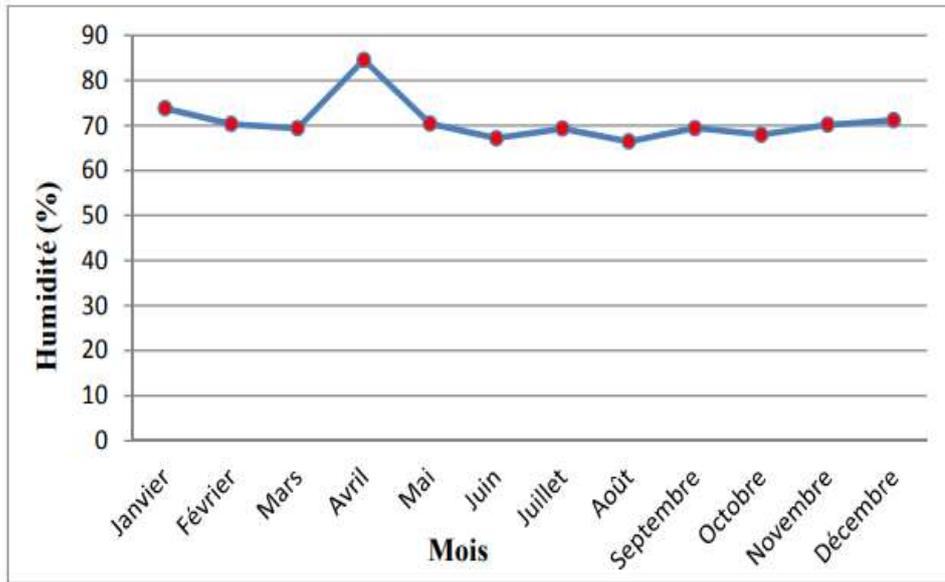
**Tableau 3.6 :** Précipitations moyennes mensuelles en mm (1997-2012).

Station	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juit	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
Skikda	120,55	106,78	68,43	54,76	45,98	13,74	13,61	16,53	73,93	63,77	94,08	123,84

**Figure 3.8:** Variation des précipitations moyennes mensuelles : station de Skikda (1997-2012)

### 3.8.3 L'humidité relative :

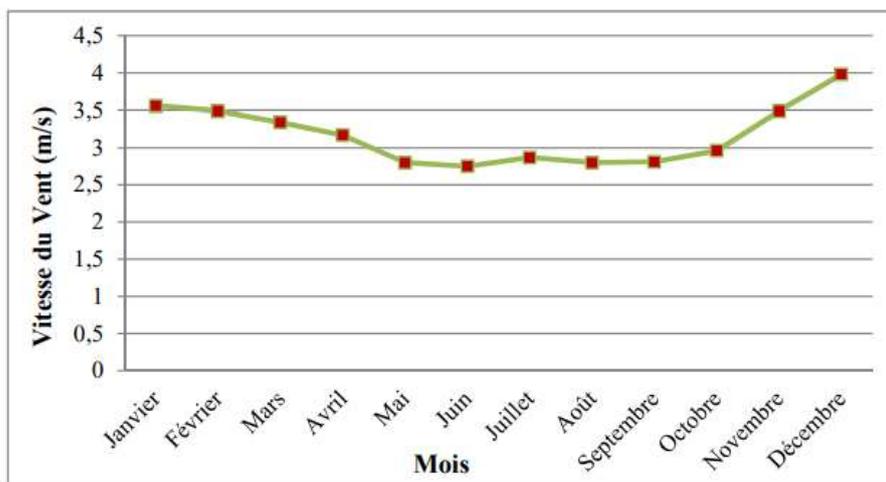
L'humidité relative, appelée aussi le degré hygrométrique est une caractéristique quantitative de l'humidité de l'air, mesure le rapport en pourcentage de la pression partielle de vapeur d'eau contenue dans l'air à la pression de vapeur saturante qu'elle y aurait si elle se trouvait à l'état de saturation à la même température (Mostarih, 2006). De point de vue mensuel, l'humidité atteint un maximum de 84,53 % le mois d'avril et un minimum de 66,43% le mois d'aout (**Fig 3.9**).



**Figure 3.9:** Variation de l'humidité moyenne mensuelle : station de Skikda (1997-2012)

### 3.8.4 Le vent :

Le vent est un élément important jouant un rôle déterminant de l'érosion, de transport et d'accumulation, ainsi que l'ensablement. La vitesse moyenne du vent, enregistrée à Skikda, fluctue dans un intervalle de 1,4 à 1,91 m/s.



**Figure 3.10 :** Variation de la vitesse moyenne mensuelle du vent : station de Skikda (1997-2012).

### 3.9. Exploitation de Site :

#### • Agriculture et irrigation :

Les terres qui entourent la retenue sont exploitées par les agriculteurs pour la culture maraichère (pomme de terre, céréales, tomate ..... ) surtout pendant les périodes estivales et printanière ou la majorité des systèmes aquatiques de la région sont à sec.

#### • La pêche :

La pêche dans le barrage est devenue une activité quotidienne à cause de sa richesse en poissons, surtout les espèces de carpes (Royales.....) et de barbeau (Barbus callensis....)

#### • L'Alimentation en eau potable :

L'Alimentation en eau potable de Azzaba et zones environnantes à partir du système barrage Zit Emba, soit :

\*Communes : Azzaba, Ain Charchar, Djendel, Es Sebt et Laghdir.

\*Population : 75 000 hab.

\*Débit : 26 000 m<sup>3</sup>/j.

\*Date de mise en service : Janvier 2009.



**Fig. 3.11** : Photo prise de la rive gauche représentant une vue générale du barrage Zit-El-Emba

Pour mettre en évidence la variation de la surface d'eau dans le lac du barrage de Zit-El-Emba, nous allons tracer la surface d'eau en fonction de la cote d'eau dans le barrage.

### **3.10. Dispositifs de protection contre l'érosion interne :**

#### **3.10.1. Le drain**

C'est un organe qui est destiné à évacuer les eaux infiltrées à travers le massif. Il est constitué soit de gravier perméable, de tuyau en béton poreux ou en plastique perforé, ces derniers sont entourés d'une couche de gravier. Ils existent plusieurs types de drains à savoir le drain horizontal, le drain vertical et, le drain à tapis filtrant. Les systèmes de drainage sont constitués des matériaux ayant une forte perméabilité ( $K = 10^{-4}$  m/s). De ce fait la circulation des eaux d'entraîner des particules adéquates. Pour maîtriser ces phénomènes on renforce le drain par un filtre.



**Fig. 3.12 :** (PON) à manomètre dans la galerie du barrage de Zit El Emba d'un drain.

### 3.10.2. Le filtre :

Il est destiné à retenir les fines particules entraînées par les filets d'eau, circulant dans le massif il est constitué de couches successives de matériaux perméables de granulométrie de plus en plus étroite, pour empêcher le passage des particules les plus fines du massif ainsi, chaque couche du filtre doit jouer le rôle de filtre pour la couche précédente dans le sens de l'écoulement de l'eau.

Pour éviter le colmatage et la dégradation du filtre, il est conseillé d'utiliser des sables dont le coefficient d'uniformité est  $D_{60} / D_{10} < 2$   $D_{60}$  : pourcentage des grains de diamètres  $< 60$  mm  $D_{10}$  : pourcentage des grains de diamètres  $< 10$  mm.

Par ailleurs un filtre ne doit pas se dégrader par entraînement ni se colmater. Pour cela, on réalise un filtre d'une composition granulométrique telle que :

- Les particules les plus fines du barrage seraient retenues, si non elles étaient entraînées hors de l'ouvrage.
- Les fines particules qu'il contient soient retenues à l'intérieur des vides existants entre les particules les plus importantes.

### 3.11. Disposition des drains et des filtres dans un barrage en terre :

#### 3.11.1. Drain tapis filtrant

Souvent ce type de drains est placé à l'aval de massif. Son rôle est d'intercepter les infiltrations dans le massif, c'est-à-dire de rabattre la phréatique d'une part et d'autre part pour évacuer le débit de fuite qui s'infiltré à travers le massif. Ce type de drain s'étend sur 1/4 ou 1/3 de l'emprise de barrage. On note aussi que ce type de drain est efficace que dans les massifs isotropes pour lesquels la conductivité verticale est égal à la conductivité horizontale ( $k_v = k_h$ ).

Par ailleurs dans le cas d'un massif anisotrope, le drain tapis n'est pas efficace. En revanche, le drain tapis peut être bâti sur deux types de fondations :

- Fondations perméables
- Fondations imperméables

Puisque les eaux infiltrées sont interceptées par le massif des fondations, donc il entraîne des éléments fins qui constituent l'ouvrage, d'où la nécessité de protéger par un filtre inverse.

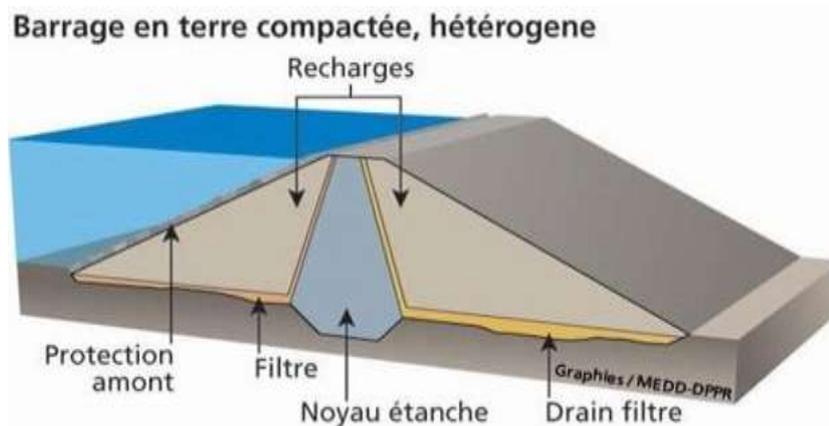


Fig. 3.13 : Drain tapis filtrant

#### 3.11.2. Drain vertical

Le drain vertical placé au centre de la digue constitue une solution plus efficace pour intercepter les eaux d'infiltration. Un tel drain est constitué d'un rideau d'une largeur minimale de 1m en matériau grossier (gravier et sables) dont la granularité est choisie de manière à ce que les conditions de filtre soient réalisées.

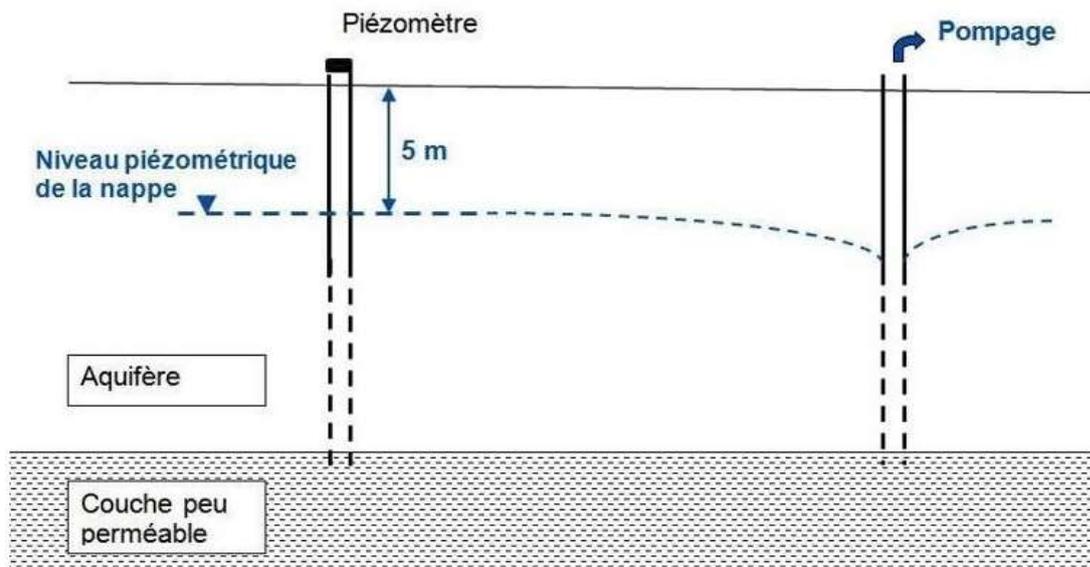
Ce rideau peut être mis en œuvre par déversement du matériau convenable dans une tranchée d'une profondeur de 1.5 à 2m recreusée dans le massif comparé, au fur et à mesure de l'avancement du terrassement du barrage. Il peut remonter pratiquement jusqu'à la cote moyenne du plan d'eau dans la retenue.

### 3.12. Etude piézométrique dans le barrage de Zit El Emba :

Afin de connaître l'état de la ressource en eau en termes de quantité, il est indispensable de surveiller la profondeur de la surface des nappes (niveau piézométrique), les mesures sont réalisées dans des forages, puits ou piézomètres.

La piézométrie est la mesure de profondeur de la surface de la nappe d'eau souterraine. Elle est exprimée soit par rapport au sol en m, soit par rapport à l'altitude zéro du niveau de la mer en m NGF (Nivellement Général Français).

La surface de la nappe correspond au niveau piézométrique. En cas de pompage de l'eau d'un forage, le niveau de la nappe s'abaisse en formant un cône de rabattement. L'illustration suivante montre l'exemple d'une nappe située à 5 m de profondeur, et schématise l'influence d'un pompage.



**Fig. 3.14:** Représentation schématique de la piézométrie



**Fig. 3.15 :** Photo d'un piézomètre dans le barrage de Zit El Emba

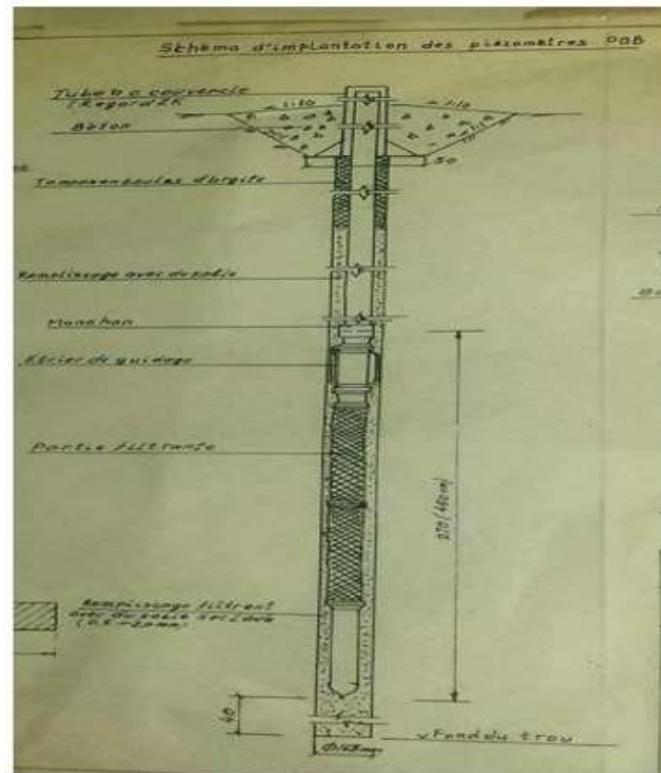
Les courbes de niveau ou iso-pièzes donnent des indications sur le sens des écoulements et leur vitesse. L'analyse des fluctuations des niveaux piézométriques permet de déterminer des cycles de recharge et de vidange de la nappe, hautes eaux et basses eaux, à des échelles de temps annuelles ou pluriannuelles.

La piézométrie est indispensable à la compréhension du comportement d'un aquifère, à sa caractérisation, à l'évaluation de ses capacités. Elle permet également de déceler des interactions entre exploitation de différents ouvrages. Des piézométries peuvent être mesurées à différentes échelles : d'un ouvrage à plusieurs nappes, suivant les objectifs poursuivis.

### **3.13. Types de piézomètres :**

#### **a) Piézomètre ouvert**

Les piézomètres « ouverts » sont des tubes qui permettent depuis la surface d'accéder à l'eau d'une nappe phréatique. Ils permettent d'en relever le niveau piézométrique à l'aide d'une sonde poids .



**Fig. 3.16 :** Schéma du piézomètre ouvert (ANBT)

### b) Autres types

Il existe des systèmes plus sophistiqués utilisant un capteur de pression en bout de tube.

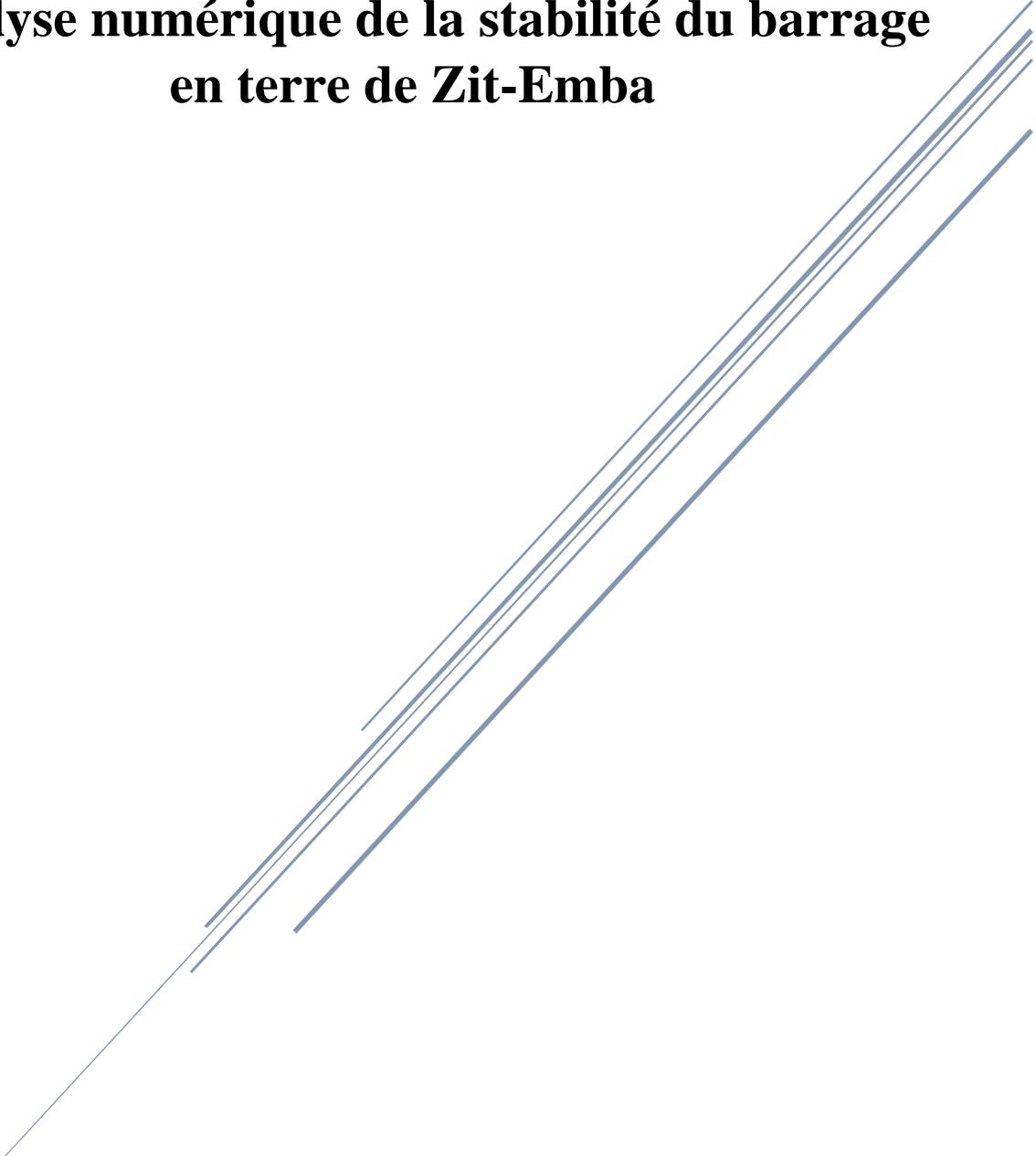
### c) Tube à prélèvement

On fore souvent des tubes analogues aux piézomètres (quoique d'un diamètre un peu différent) afin de réaliser des prélèvements d'eau dans la nappe, pour en analyser la composition. Cela est souvent le cas après une pollution où la qualité de l'eau de la nappe doit être surveillée, parfois durant plusieurs années. Dans ce dernier cas, il vaut mieux parler de « tube à prélèvement » pour éviter tout malentendu, car de tels forages ne sont pas alors destinés à mesurer la charge hydraulique (qui seule justifie le radical « piézo- »).



## **Chapitre 4**

# **Analyse numérique de la stabilité du barrage en terre de Zit-Emba**



**M2-VOA  
AU/2023-2024**

## **Chapitre 4 : Analyse numérique de la stabilité du barrage en terre de Zite- El Emba**

### **4.1. Présentation du logiciel Plaxis :**

Le logiciel PLAXIS est un programme d'éléments finis conçu au départ pour les problèmes en deux dimensions (2D) puis étendu à ceux de trois dimensions (3D) spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour plusieurs modes d'applications géotechniques. Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle plan ou axisymétrique. Le modèle 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. Le code éléments finis Plaxis représente certainement un optimum actuel sur le plan scientifique et pratique. Scientifiquement, c'est un outil d'analyse non linéaire en élasto-plasticité, avec prise en compte des pressions interstitielles, doté des méthodes de résolution, éprouvés..., L'ensemble des options simplifiées (initialisation des contraintes, pressions interstitielles) permettent d'aller au but (prévoir le comportement d'un ouvrage). Le système d'options du code plaxis commencent par :

- Le Maillage ;
- Les conditions aux limites en déplacement ;
- Les contraintes initiales dues au poids des terres ;
- Les pressions interstitielles ;
- Le coefficient de sécurité.

### **4.2. Fonction et domaine d'application :**

PLAXIS est un programme d'élément finis en deux dimensions spécialement conçues pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différent type d'applications géotechniques. Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle plan ou axisymétrique.

### **4.3. Les modèles des matériaux :**

PLAXIS propose différents modèles qui permettent de simuler le comportement d'un sol. Les modèles sont les suivants :

#### 4.3.1. Modèle élastique linéaire :

Ce modèle représente la loi de Hooke pour l'élasticité linéaire et isotrope :

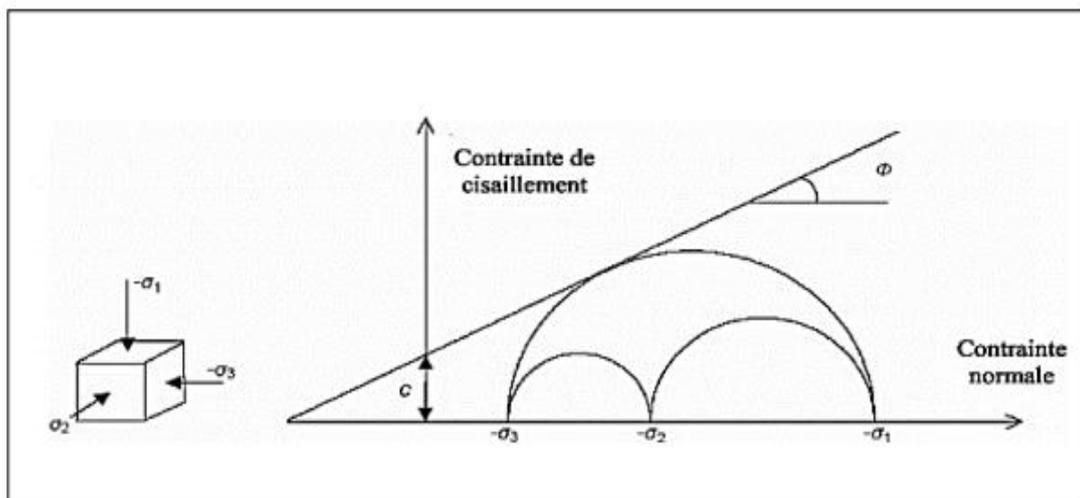
$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{Eq.4.1}$$

#### 4.3.2. Modèle de Mohr-Coulomb :

Le comportement de Mohr-Coulomb présente un comportement élastique parfaitement plastique sans écouissage. Il a une grande utilisation dans la géotechnique vu les résultats obtenus dans les calculs. Dans le plan de Mohr, la droite intrinsèque est représentée par :

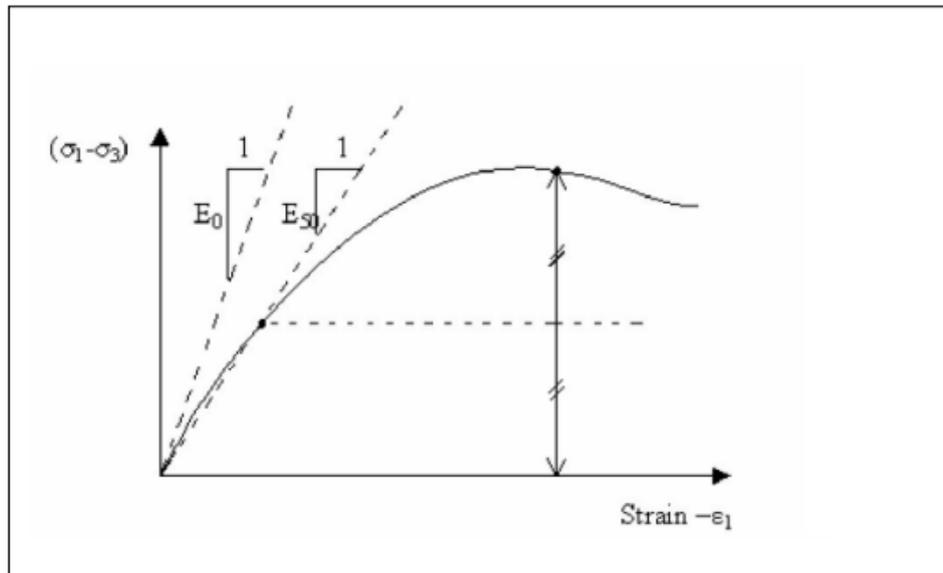
$$\tau = \sigma \tan \nu + c \quad \text{Où } \sigma \text{ et } \tau \quad \text{Eq.4.2}$$

Sont respectivement les contraintes normales et de cisaillement, et  $c$  et  $\nu$  respectivement la cohésion et l'angle de frottement du matériau (**figure 4.1**)



**Figure 4.1:** Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb.

Le critère de Coulomb à trois dimensions suppose que la contrainte intermédiaire n'intervient pas. La forme du critère est celle d'une pyramide irrégulière construite autour de la trisectrice. (Berkane A., 2017., p71-72)



**Figure 4.2 :** Pyramide de Mohr-Coulomb tracée pour  $c=0$

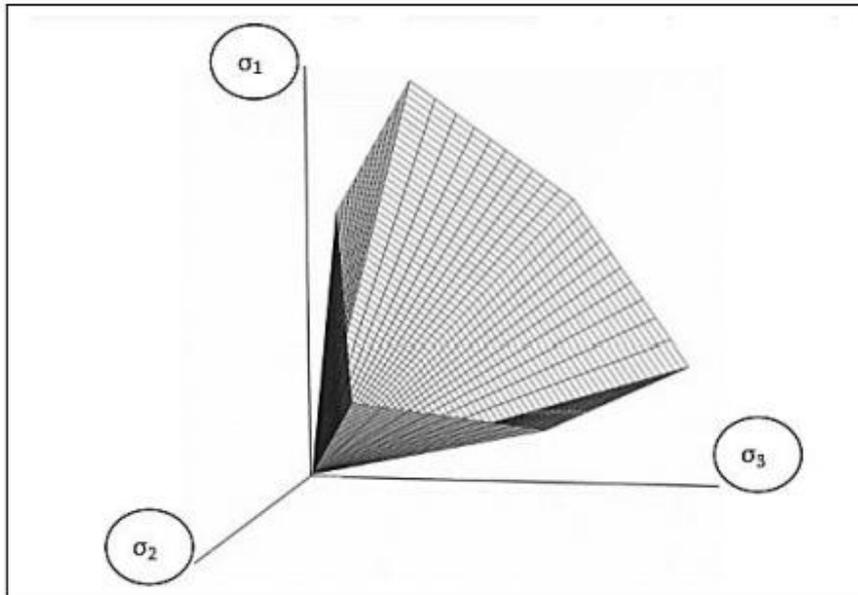
Ce modèle bien connu est utilisé généralement comme une première approximation du comportement d'un sol. Ce modèle comporte cinq paramètres :

- Le module d'Young,  $E$  ;
- Le coefficient de Poisson,  $\nu$  ;
- A cohésion,  $c$  ;
- L'angle de frottement,  $\varphi$  ;
- L'angle de dilatance  $\psi$ . Ce modèle est régi par une loi élastique parfaitement plastique. Elle est utilisée pour décrire approximativement le comportement des sols grenus (sables) et des sols fins à long terme (argile et limon).

Dans l'espace des contraintes principales effectives  $\sigma'_1$ ,  $\sigma'_2$  et  $\sigma'_3$  la surface est définie par une fonction de charge  $F$ , qui est une pyramide de section hexagonale ayant pour axe la droite d'équation  $\sigma'_1 = \sigma'_2 = \sigma'_3$  telle que c'est donnée sur la figure. La fonction de charge est la suivante :

$$F(\sigma_{i,j}) = -(\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin \varphi' - 2c \cos \varphi = 0 \quad \text{Eq.4.3}$$

$\sigma'_1$ ,  $\sigma'_3$  représentent les contraintes principales extrêmes, telle que :  $\sigma'_1 \geq \sigma'_2 \geq \sigma'_3$



**Figure 4.3 :** Surface de rupture dans l'espace des contraintes principales.

Le potentiel plastique est fonction des contraintes principales extrêmes, il est donné par la formule suivante :

$$G(\sigma_{ij}) = -(\sigma_1' + \sigma_3') \sin \psi \quad \text{Eq.4.4}$$

Les déformations plastiques vérifient la relation suivante :

$$\frac{d\varepsilon_{vol}^p}{d\varepsilon_a^p} = \frac{-2 \sin \tau \psi}{1 - \sin \psi} \quad \text{Eq.4.5}$$

La quantité  $\psi$   $\psi = 1 - \sin 2\psi$  – caractérise la variation volumique au cours de la phase plastique, c'est pour cette raison que  $\psi$  est appelé la dilatance.

#### 4.4. Type de comportement des matériaux :

En principe, dans PLAXIS, tous les paramètres de modélisation sont censés représenter les caractéristiques effectives du sol, c'est-à-dire la relation entre les contraintes et les déformations pour le squelette solide. Une caractéristique importante des sols est la présence d'eau interstitielle. Les pressions interstitielles influencent significativement la réponse du sol. Pour permettre la prise en compte des interactions squelette solide-eau dans la réponse du sol, PLAXIS offre le choix entre trois types de comportements pour chaque modèle de sol : (Lillouch S., Benhamma B., 19-06-2012., p112-115)

- Comportement drainé : c'est le cas des sols secs ou avec une forte perméabilité
- Comportement non drainé : c'est le cas des sols fins qui ont une faible perméabilité ;
- Comportement non poreux : applicable à la modélisation des bétons et des roches.

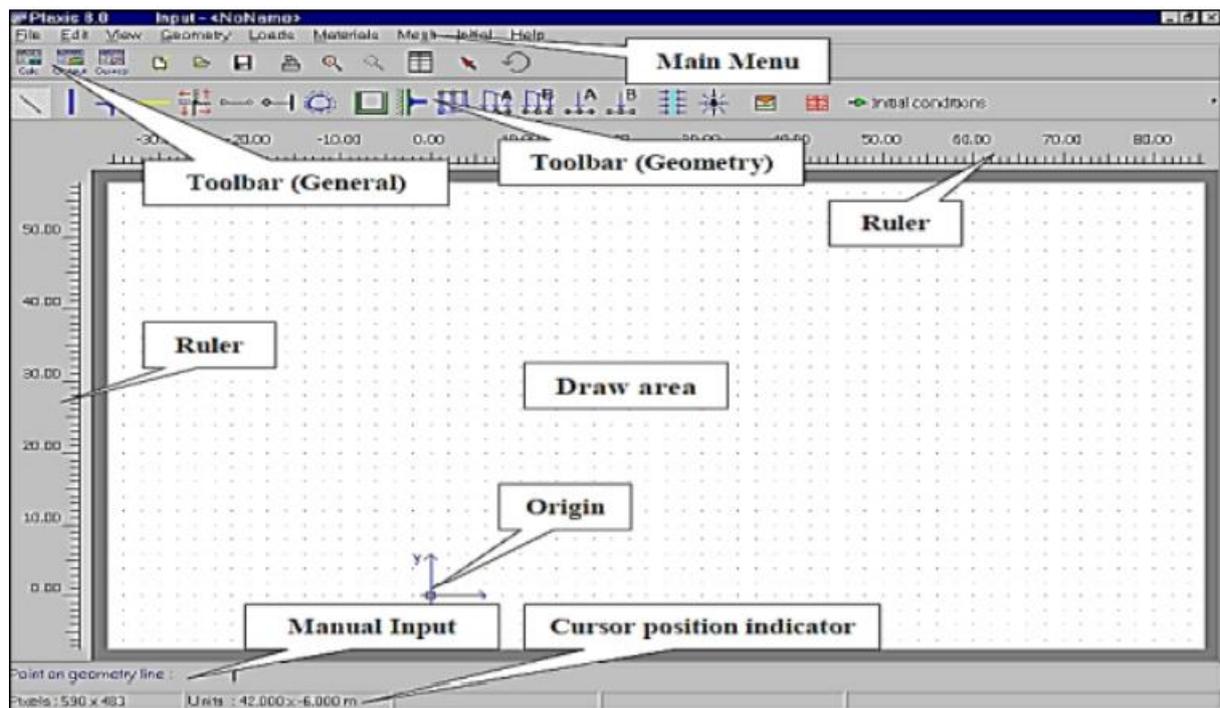
#### 4.5. Etape de modélisation :

Plaxis utilise une interface composée de quatre sous programmes

- Input ;
- Calculations ;
- Output ;
- Curves.

##### 4.5.1. Plaxis-Input (données) :

Le sous-programme contient toutes facilités nécessaires à la création et modifications des modèles géométriques, à l'engendrement des maillages des éléments finis et à la définition des conditions initiales



**Figure 4.4** : Fenêtre principale du programme d'entrée des données (Input) (mode de création géométrique) [11]

#### 4.5.2. Plaxis-Calculations (calcul) :

Le sous-programme de calculs contient les facilités utiles à la définition des phases et au commencement de la procédure de calcul des éléments finis

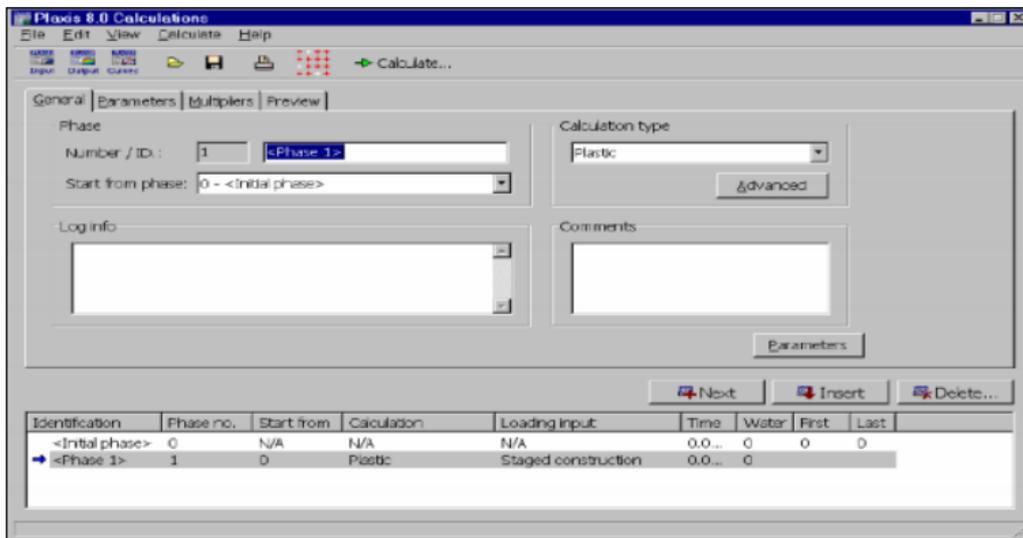


Figure 4.5 : Fenêtre principale du programme de calcul [11]

#### 4.5.3. Plaxis-Output (résultats) :

Contient les facilités pour la visualisation des résultats de la phase de calcul, comme les déplacements au niveau des nœuds, les contraintes les forces au niveau des éléments structuraux, etc.

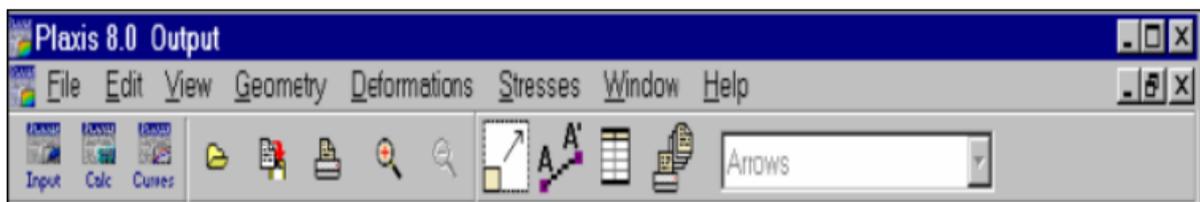


Figure 4.6 : Barre d'outils de la fenêtre principale du programme Output [11]

#### 4.5.4. Plaxis-Curves (courbe) :

Le sous-programme Curve sert à la construction des courbes de chargement  $\dot{R}$  déplacement, des chemins de contraintes, en plus de divers autres diagrammes. La réalisation d'une modélisation avec Plaxis se traduit en général, par l'enchaînement des étapes suivantes (Fig.4.7) : Utilisation du préprocesseur « Plaxis Input », pour la génération des données (maillage, jeu des données et contraintes initiales). Lancement du code de calcul éléments finis « Plaxis Calculate », pour effectuer la résolution numérique du problème étudié. Utilisation de post-processeur « Plaxis Output », pour l'interprétation des résultats sur écran graphique. Utilisation de post-processeur « Plaxis Curve », pour l'interprétation des courbes.

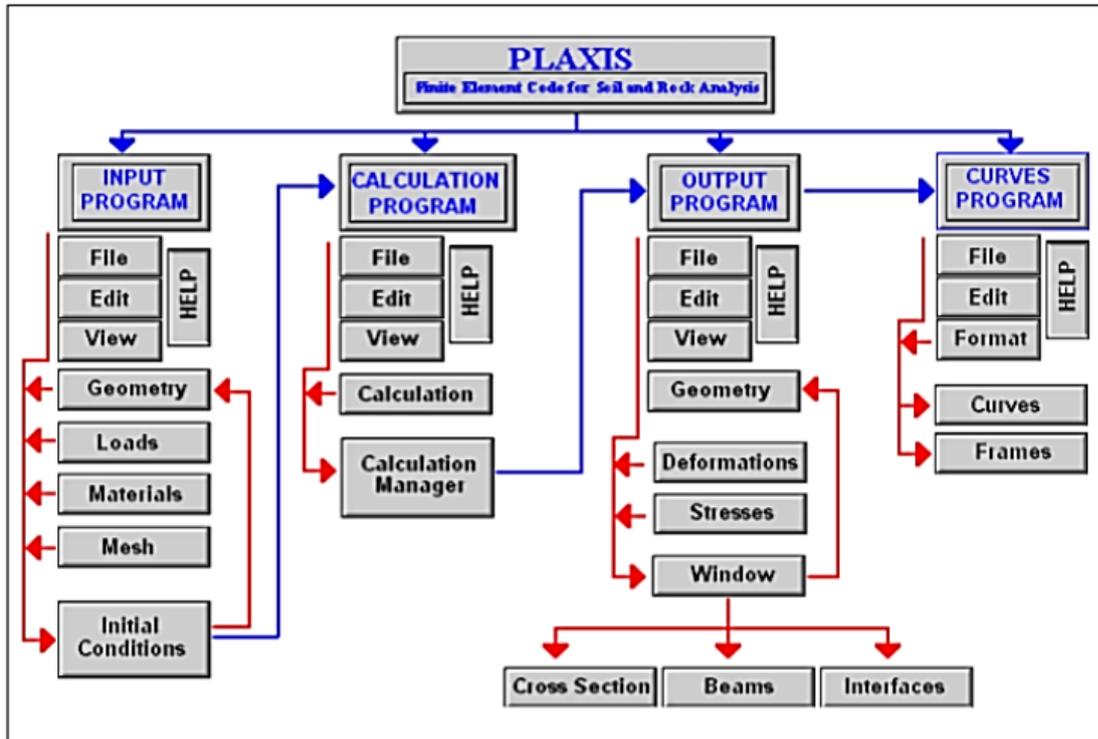


Figure 4.7 : Organigramme de la structure du Plaxis code.

#### 4.6. La démarche de modélisation avec Plaxis :

Nous présenterons ici le cheminement et les principales étapes d'un calcul sous Plaxis

##### 4.6.1. La géométrie :

La première étape sous Plaxis est la définition de la géométrie. Un certain nombre de propriétés sont disponibles :

- Les lignes géométriques qui sont là pour dessiner l'organisation du sol.
- L'outil << plates >> permet de dessiner et de définir des structures élancées qui possèdent une résistance en traction, compression et une résistance en flexion, Cet outil est principalement utilisé pour modéliser des murs, des poutres, des coquilles, des plaques pour modéliser les murs et les zones rigides.
- << Anchor >> qui sert à modéliser les liaisons entre les éléments. Ce sont des ressorts, qu'on utilise pour modéliser les batardeaux ou plus exactement la liaison entre les différents éléments d'un batardeau.
- L'outil << Géogrid >> sert à dessiner des structures élancées avec une résistance en compression ou en traction mais qui ne possèdent aucune résistance de flexion. Cet outil est généralement utilisé pour modéliser les géogrilles et ancrages.

#### **4.6.2. Les conditions aux limites :**

Une fois la géométrie définie, il faut entrer les conditions limites, c'est-à-dire les déplacements et les contraintes imposées aux limites extérieures de la géométrie. Si aucune condition limite n'est fixée sur un tronçon, par défaut le logiciel considère que l'élément n'est soumis à aucune force extérieure et est libre de se déplacer dans toutes les directions.

#### **4.6.3. La définition des paramètres des matériaux**

Ensuite, il convient de définir les différentes propriétés des différents matériaux selon son type (sol et interface, plaque, ancrage, ...), le modèle de comportement et les différents paramètres permettant de le définir. Pour les sols, en plus de la définition des caractéristiques mécaniques, leurs interfaces avec les autres types d'éléments peuvent être paramétrés, il faut également définir le comportement hydraulique du sol (drainer, non-drainer, ...).

#### **4.6.4. Le maillage**

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

#### **4.6.5. Les phases de calculs**

Après avoir effectué l'ensemble de ces paramétrages on peut accéder aux calculs par le bouton "calculation". L'interface "input" de Plaxis se ferme et laisse la place à une nouvelle interface : "calculation". Une phase0 est déjà calculée, cette phase correspond à l'état initial de la structure. Cette interface permet de définir le phasage de la modélisation de la construction.

#### **4.6.6. La visualisation des Résultats**

Le code Plaxis contient plusieurs outils pour visualiser et analyser les résultats concernant le sol soit en déformations (maillage déformé, déplacements et déformations totaux) soit en contraintes (contraintes effectives, totales, les pressions interstitielles).

### **4.7. Partie input de l'application sur barrage de Zite-El Emba :**

Dans ce chapitre l'exemple étudié est une représentation simplifiée de la géométrie du barrage en terre de Zite-El Emba. Il a été construit au-dessus d'une couche de fondation.

L'objectif de ce chapitre est d'analyser le comportement du barrage de Zite- El Emba à l'aide du code de calcul numérique Plaxis 8.2. Et cela dans le but de vérifier la stabilité du barrage sous différentes situations géostatiques (barrage vide, barrage remplie d'eau et pendant la vidange rapide du barrage).

**4.7.1. Caractéristiques géotechniques des sols utilisés dans le calcul numérique :**

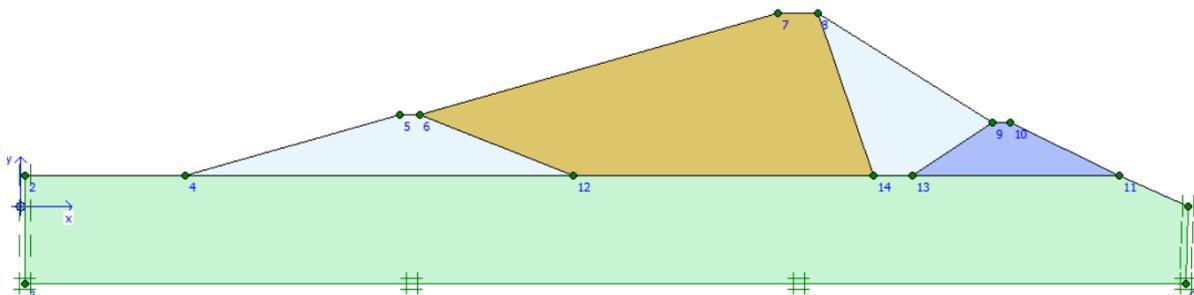
Le barrage est essentiellement constitué de plusieurs matériaux. Les caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux utilisés sont :

**Tableau 4.1 :** Caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux utilisés

Paramètres	Nom	Fondation	Noyau	Recharge	Enrochement
Modèle type	Model	M.C	M.C	M.C	M.C
Type de comportement	Type	D	N. D	D	D
Poids volumique sec (KN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$	18	16	17	16
Poids volumique humide (KN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_h$	21	18	21	20
Perméabilité verticale (m/jour)	$K_y$	1	0.0001	0.01	1
Perméabilité horizontale (m/jour)	$K_x$	1	0.0001	0.01	1
Module d'Young (KN/m <sup>2</sup> )	E	50000	1500	50000	20000
Coefficient de poisson	V	0.3	0.35	0.3	0.330
Cohésion (KN/m <sup>2</sup> )	C	1	11	1	5
Angle de Frottement (°)	$\phi$	35	20	35	31
Angle de dilatance (°)	$\psi$	5	0	5	1

**4.7.2. Le modèle géométrique avec les conditions aux limites du barrage :**

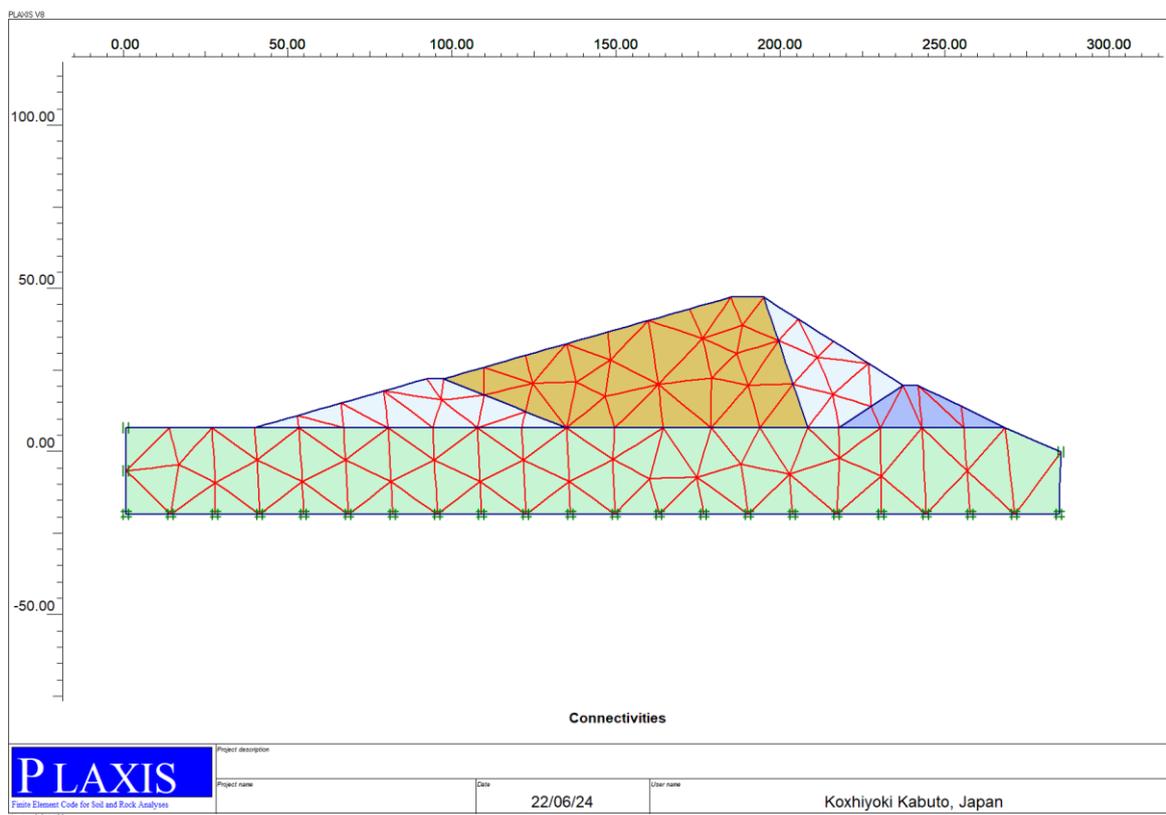
Le modèle géométrique du barrage est présenté dans la figure (4.8). Pour les frontières nous imposant que les déplacements horizontaux sont nuls. Pour le substratum nous imposant un déplacement nul suivant les deux directions X et Y.



**Figure 4.8 :** Représentation du modèle géométrique du barrage avec les conditions aux limites.

### 4.7.3. Discrétisation du modèle :

Le modèle de référence se fait par des éléments triangulaires à 15 nœuds, On ajuste la finesse du maillage (global Coarseness) sur «medium» pour tout le modèle, comme indiqué sur la Figure (4.9).



**Figure 4.9 :** Représentation du Maillage

### 4.8. Phases de calcul :

Le calcul numérique par Plaxis dans ce chapitre concerne seulement les contraintes, les pressions interstitielles, les différents déplacements et le coefficient de sécurité qui indique la stabilité du barrage. Le calcul numérique a été fait en 3 phases qui sont (Figure 4.10) :

- La première phase de calcul : des calculs pour l'analyse de la stabilité du barrage en fin de sa construction (barrage vide) ;
- La deuxième phase de calcul : des calculs pour l'analyse de la stabilité du barrage remplie d'eau jusqu'au le niveau normal de retenue (NNR) ;
- La 3ième phase : des calculs pour l'analyse du comportement du barrage sous vidange rapide (30 jours).

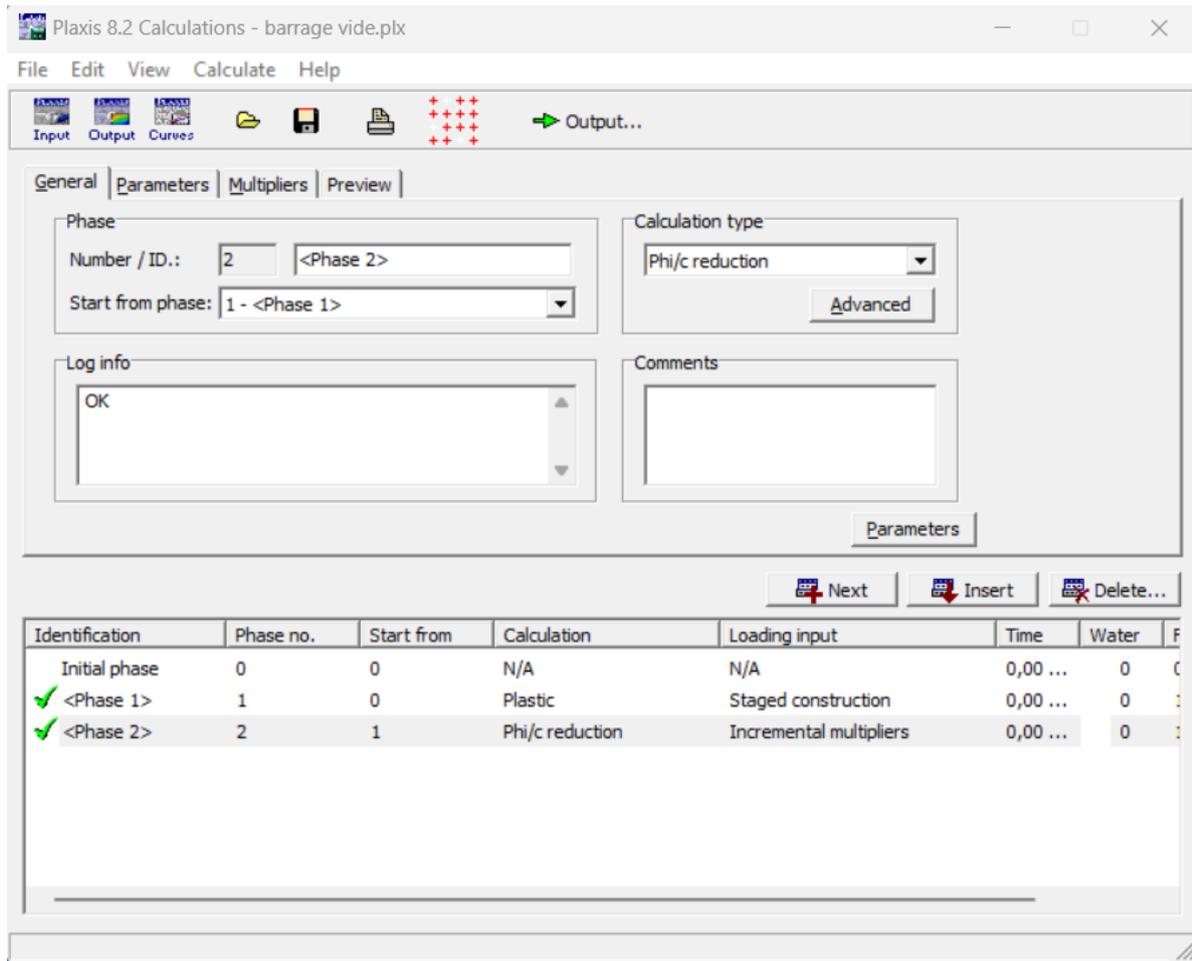


Figure 4.10 : Représentation des phases de calcul

#### 4.9. Partie output (Résultats de la modélisation) :

##### 4.9.1. Stabilité du barrage en phase finale de son exécution (barrage vide) :

Pour le calcul de la stabilité du barrage en fin de construction on commence par les conditions initiales ce qui correspond à une application totale de la gravité, le niveau de la nappe phréatique initial a été pris à la base du modèle. C'est-à-dire au niveau du substratum (Figure 4.11)

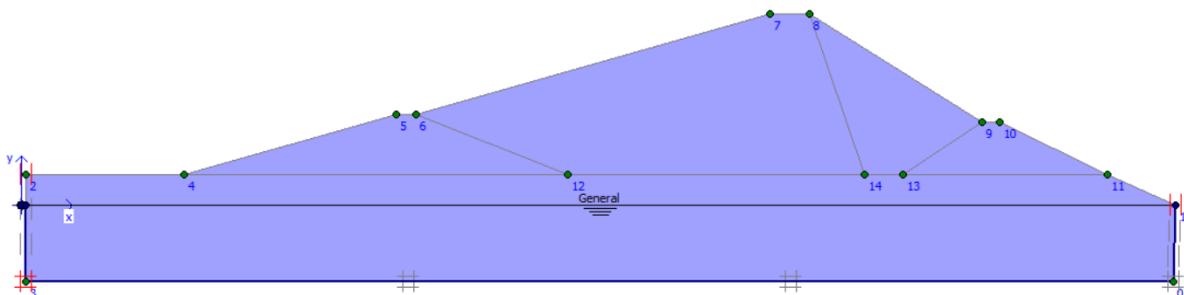
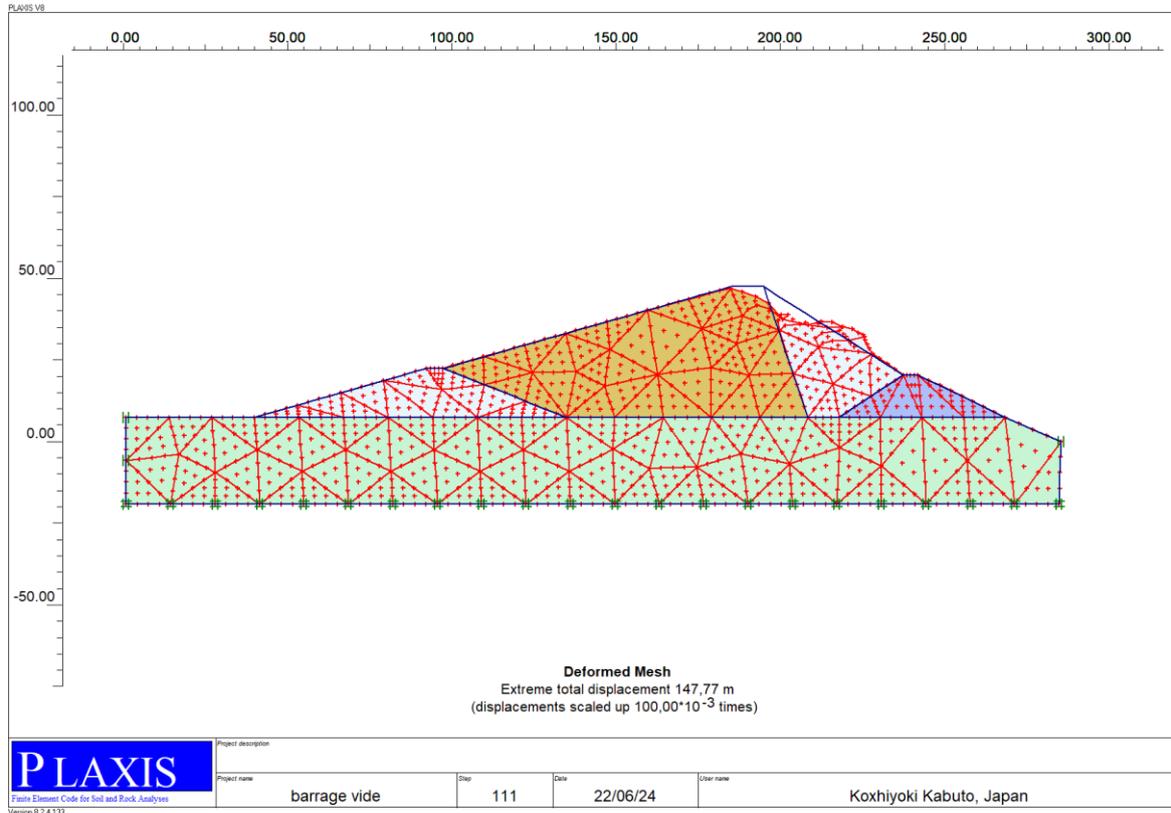


Figure 4.11 : Niveau de la nappe phréatique en fin de construction du barrage

### 4.9.2. Maillage Déformé :

Le maillage déformé est une représentation du maillage aux éléments finis dans son état déformé. Dans cette phase nous avons obtenu un déplacement de la mèche d'une valeur de 98.17cm. La figure 5.5 représente le schéma du maillage déformé du massif

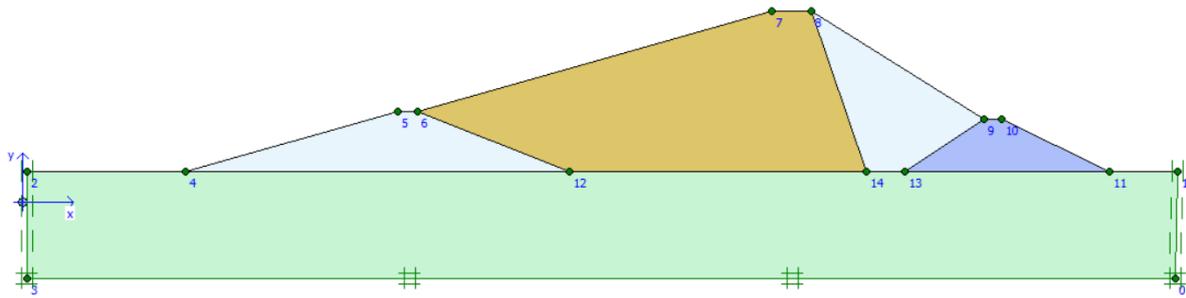


**Figure 4.12 : Maillage déformé**

## Barrage vide :

### 4.10 Le modèle géométrique avec les conditions aux limites du barrage :

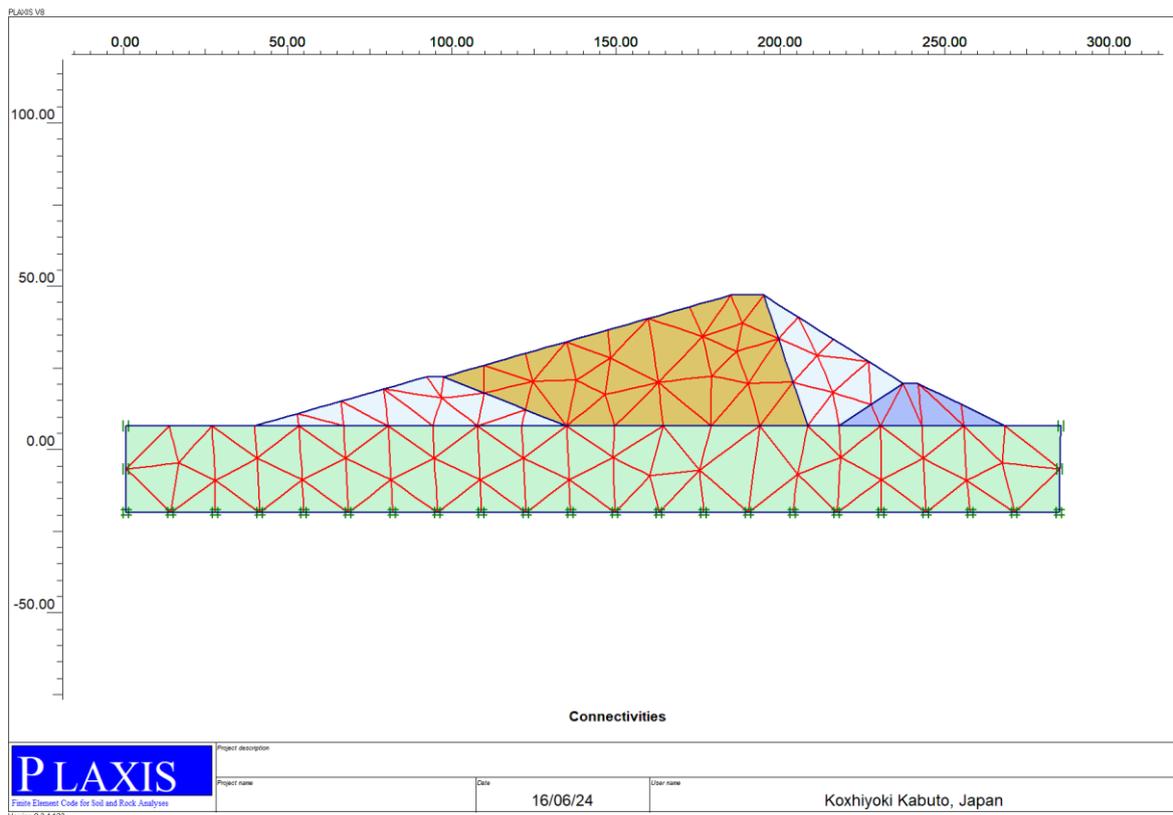
Le modèle géométrique du barrage est présenté dans la **figure (4.6)**. Pour les frontières nous imposant que les déplacements horizontaux sont nuls. Pour le substratum nous imposant un déplacement nul suivant les deux directions X et Y.



**Figure 4.13 :** Représentation du modèle géométrique du barrage avec les conditions aux limites

### 4.11 Discrétisation du modèle :

Le modèle de référence se fait par des éléments triangulaires à 15 nœuds, On ajuste la finesse du maillage (global Coarseness) sur « medium>>> pour tout le modèle, comme indiqué sur la Figure (5.2).



**Figure 4.13:** Représentation du Maillage

#### 4.12 Phases de calcul :

Le calcul numérique par Plaxis dans ce chapitre concerne seulement les contraintes, les pressions interstitielles, les différents déplacements et le coefficient de sécurité qui indique la stabilité du barrage. Le calcul numérique a été fait en 7 phases qui sont (Figure 4.14) :

- Les deux premières phases (application de la gravité): des calculs pour l'analyse du comportement du barrage au cours de son exécution jusqu'à la fin de sa construction.
- La 3ième phase de calcul : des calculs pour l'analyse de la stabilité du barrage en fin de sa construction (barrage vide).
- La 4ième phase de calcul des calculs pour l'analyse du comportement du Barrage au cours de remplissage du barrage par les eaux jusqu'au le niveau normal de retenue (NNR) et sous l'effet du poids propre du barrage et les forces hydrostatiques.
- La 5ième phase de calcul des calculs pour l'analyse de la stabilité du barrage remplie d'eau jusqu'au le niveau normal de retenue (NNR).
- La 6ième phase : des calculs pour l'analyse du comportement du barrage sous vidange rapide (30 jours).
- La 7ième phase : des calculs pour l'analyse de la stabilité du barrage sous vidange rapide (30 jours).

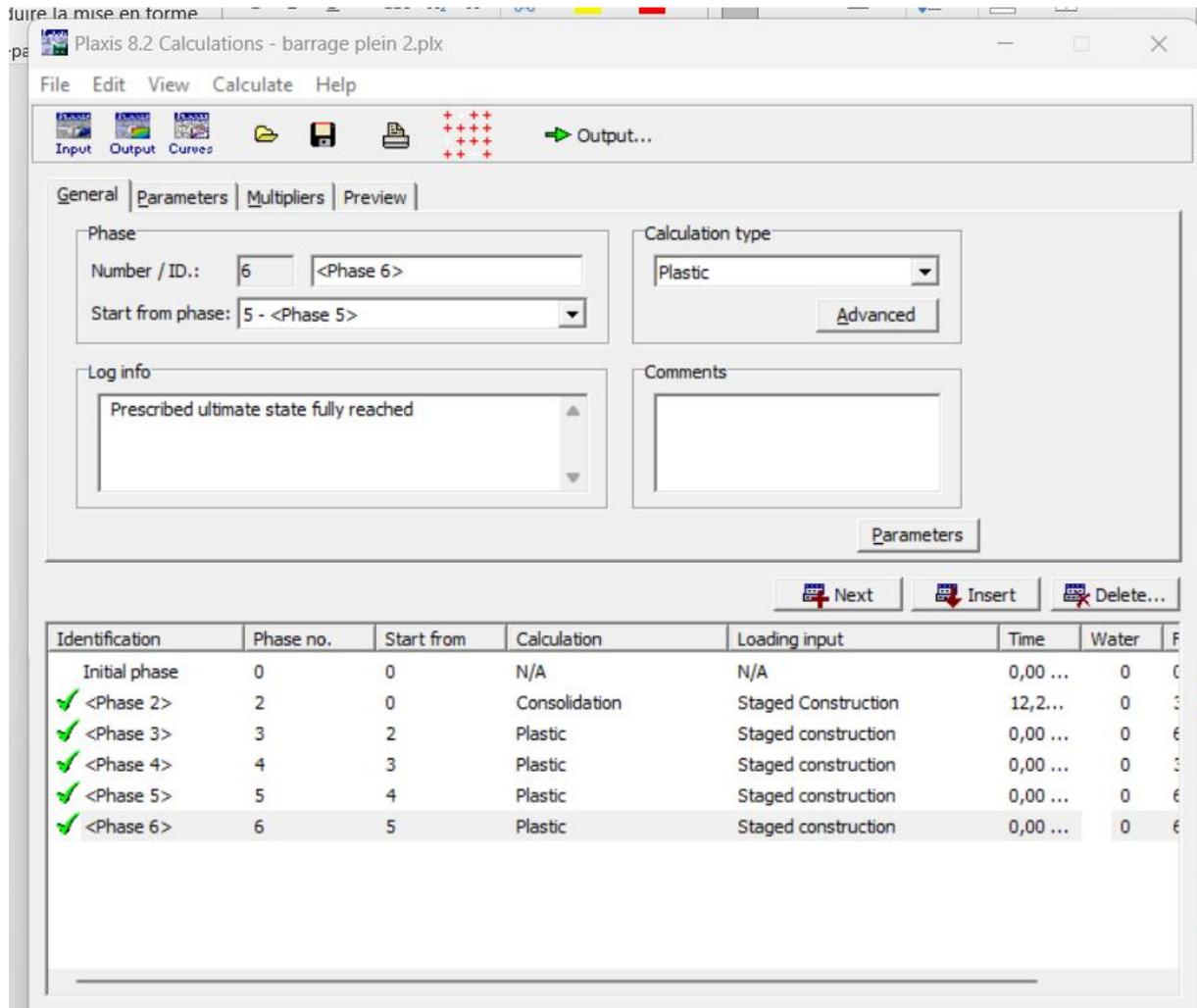


Figure 4.14 : Représentation des phases de calcul

### 4.13 Résultats de la modélisation :

#### 4.13.1 Stabilité du barrage en phase finale de son exécution (barrage vide)

Pour le calcul de la stabilité du barrage en fin de construction en commence par les conditions initiales ce qui correspond à une application totale de la gravité, le niveau de la nappe phréatique initial a été pris à la base du modèle c'est-à-dire au niveau du substratum (Figure 4.15) :

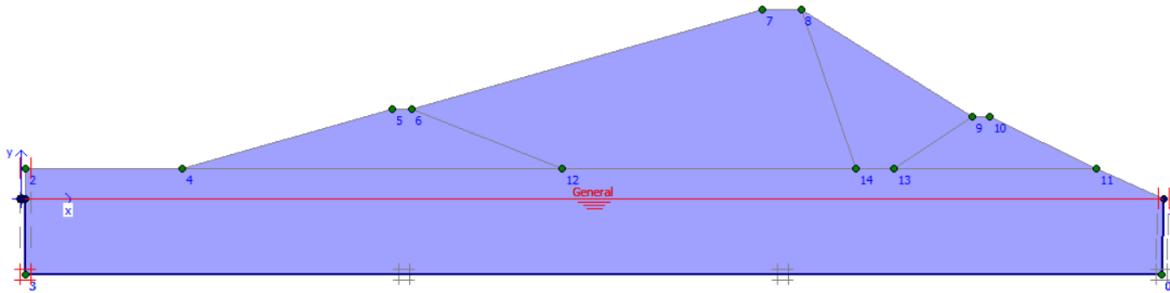


Figure 4.15 :Niveau de la nappe phréatique en fin de construction du barrage

#### 4.13.1.1 Maillage Déformé :

Le maillage déformé est une représentation du maillage aux éléments finis dans son état déformé. Dans cette phase nous avons obtenu un déplacement de la mèche d'une valeur de 98.17cm. La figure 5.5 représente le schéma du maillage déformé du massif.

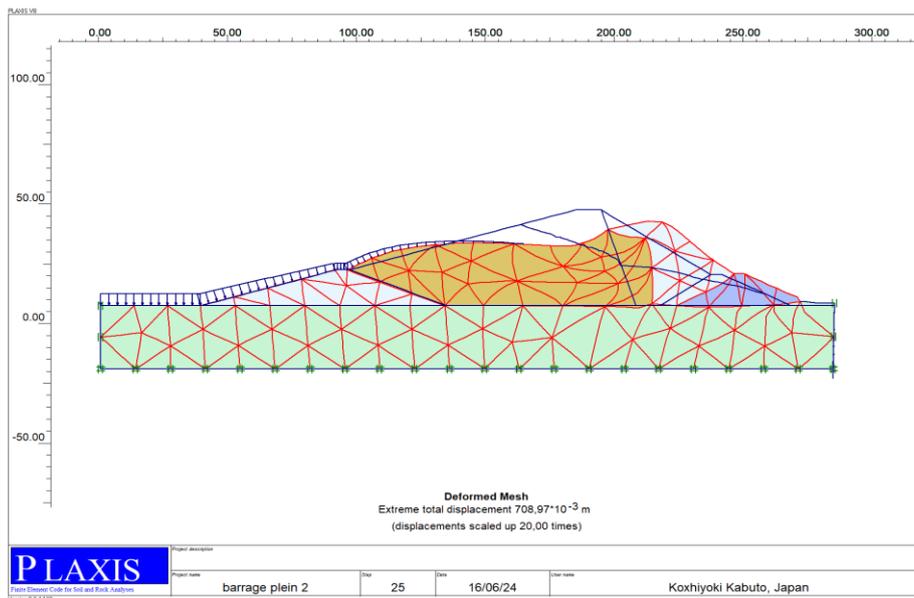


Figure 4.16 :Déformation de la mèche en fin de construction du barrage

## Barrage plein :

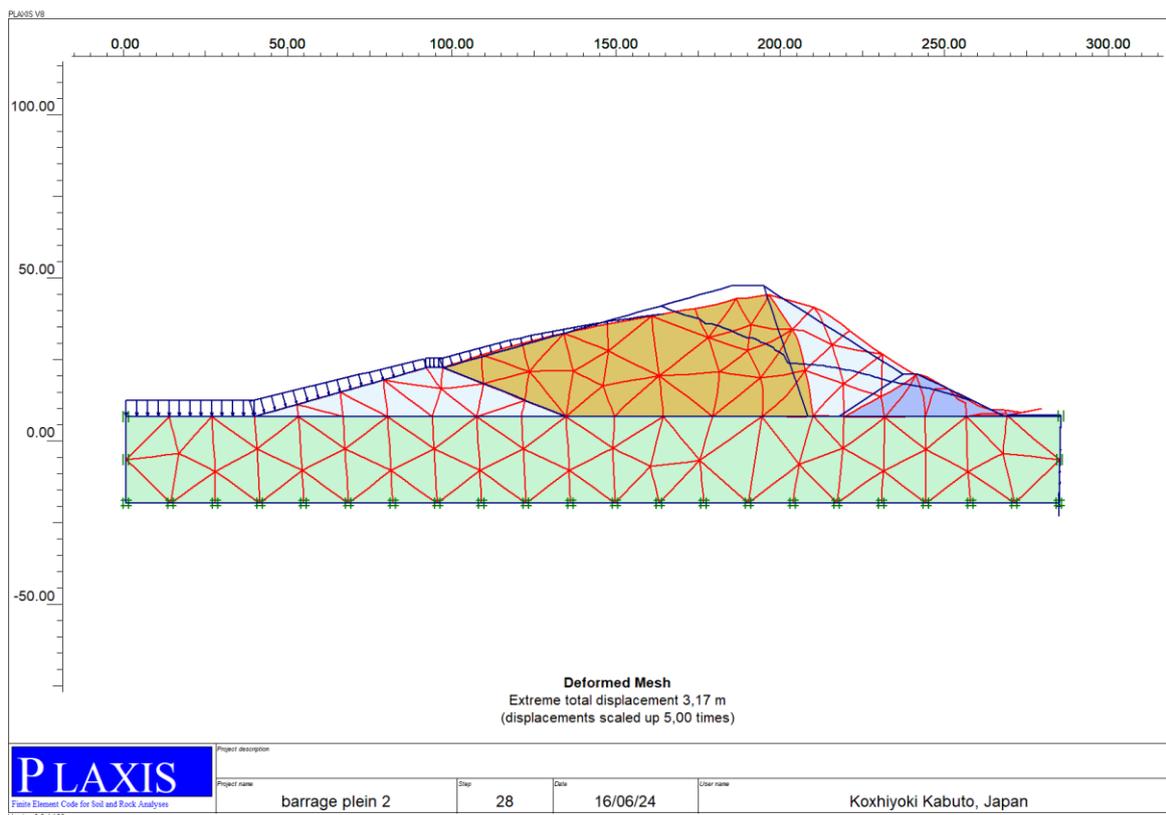


Figure 4.17:représentation de maillage dans barrage plein

### 4.14 Résultats de la modélisation :

#### 4.14.1 Stabilité du barrage en phase finale de son exécution (barrage plein) :

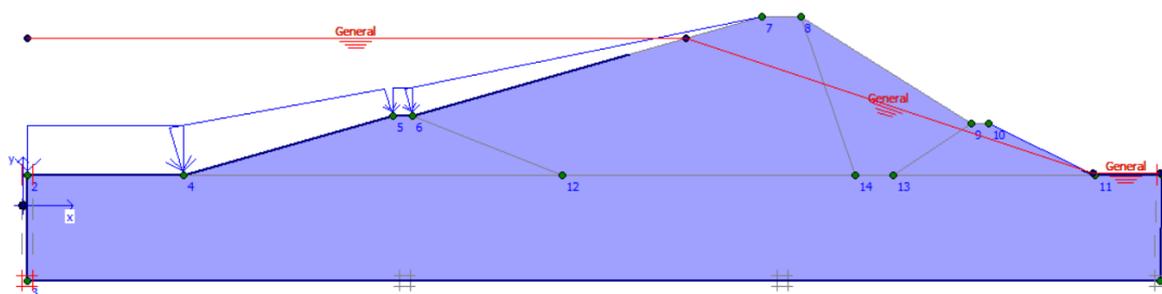
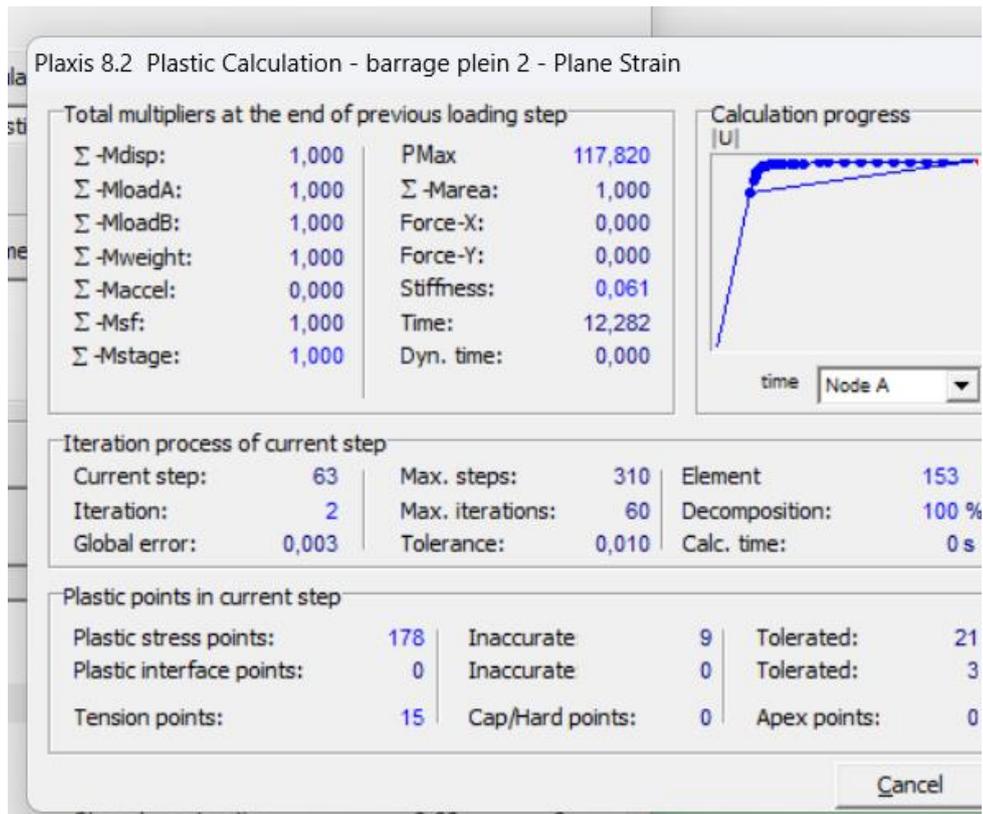


Figure 4.18 : Niveau d'eau élevé dans le réservoir

### 4.15 : Le résultat final de la phase dans le de barrage plein :



## **Conclusion :**

Dans ce chapitre on a étudié le comportement du barrage Koudiet Medaouar sous trois cas de chargement : en fin de construction, sous l'effet de la force hydrostatique et le poids propre du barrage (barrage remplie d'eau) et en phase de vidange rapide. Comme la montre les résultats obtenus, en fin de construction du barrage on constate que le barrage se déforme essentiellement dans le sens vertical. Pendant le remplissage du barrage, les déplacements s'orientent vers la partie amont du talus à cause de la charge d'eau et les pressions hydrostatiques appliquées sur le talus amont. Et en fin sous vidange rapide, le barrage subit une déformation latérale prépondérante avec un déplacement horizontal maximal de - 6.45cm, et un déplacement vertical maximal de - 3.55 cm. D'après les résultats de simulation dans ce chapitre, le barrage est stable pour tous les cas étudiés.

# **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

En conclusion, les barrages en terre jouent un rôle crucial dans la gestion des ressources en eau, la lutte contre les inondations et la production d'énergie hydroélectrique. Cependant, ils sont susceptibles de s'effondrer en raison de divers facteurs, notamment des causes naturelles, des défauts de conception, des erreurs de construction et un entretien inadéquat. Il est essentiel de comprendre les causes de rupture et de mettre en œuvre des mesures préventives pour garantir la sécurité et la durabilité des barrages en terre.

L'une des principales causes de rupture de barrage est l'infiltration, qui se produit lorsque l'eau s'infiltré à travers le barrage ou ses fondations. Cette infiltration peut entraîner une érosion interne, un renard et, en fin de compte, une rupture catastrophique. Parmi les autres facteurs contribuant à la rupture, citons la stabilité insuffisante des pentes, le débordement dû à un débit d'eau excessif, l'action érosive des vagues et l'activité sismique.

Plusieurs méthodes peuvent être employées pour prévenir les ruptures de barrage. Tout d'abord, des investigations approfondies du site et des études géologiques et géotechnique doivent être menées au cours des phases de planification et de conception afin d'évaluer les conditions du sol et de la roche et d'identifier les risques potentiels. Des pratiques de conception adéquates, notamment le choix de matériaux et de techniques de construction appropriés, sont essentielles pour garantir l'intégrité structurale du barrage.

La mise en œuvre de mesures efficaces de contrôle, telles que les paroi étanche, l'injection de coulis et les filtres drainant, peut réduire de manière significative le risque d'érosion interne. de rip-rap pour prévenir l'érosion du parement amont. La maintenance et l'entretien réguliers du barrage sont essentiels pour traiter rapidement les problèmes et éviter qu'ils ne s'aggravent. Cela comprend des inspections régulières, l'entretien des déversoirs et des exutoires, la gestion de la végétation et la réparation de tout défaut identifié.

En comprenant les causes de rupture et en mettant en œuvre des mesures préventives, nous pouvons améliorer la sécurité et la fiabilité des barrages en terre, en garantissant leur fonctionnalité à long terme et en minimisant les risques pour la vie humaine et l'environnement.

## Références bibliographiques :

- [1] **MARCHE .C ETVERZENI.G.** « barrage crues de rupture et protection civile ». DEUXIEME EDITION PRIX ROBERVAL 2004.
- [2] **BLONDEAU.F.** « les méthodes d'analyse de stabilité ». BULL. LABO. P. ET CH, SPECIAL, MARS 1976.
- [3] **DEGOUTT. G. (2003).** « Les mécanismes de rupture des digues ». GRENOBLE : ENGREF, FORMATION CONTINUE, SUPPORT D'INTERVENTION, P 32.
- [4] **Bouزيد, T. (2010).** Les barrages et la politique hydraulique en Algérie : état, diagnostic et perspectives d'un aménagement durable. These de doctorat, Université de Mentouri– Constantine.
- [5] **Degoutte, G. and P. Royat (1999).** Aide-mémoire de mécanique des sols, ENGREF
- [6] Pris à partir de profil en long l'axe du barrage en terre hétérogènes
- [7] **Patrick le Delliou (2003)** : « Les Bauages : conception et maintenance ». Ed. ENTPE, PRESSES universitaires Dlyon.270 p
- [8] **Toumi. A, Remini B.** ' *Les fuites à travers les rives du barrage de Foum-ElGherza, Biskra, Algérie* ', « revue vecteur environnement, Canada, novembre, 2003. PP67-71.
- [9] *Agence Nationale des barrages et transferts (A.N.B.T), service d'exploitation du barrage de Hammam Grouz (B.H.G), « Mesures hydrologiques et d'auscultation du barrage de Hammam Grouz 1999-2006 », 2007.*
- [10] **Ancey Christophe.** Note de cours : Hydraulique à surface libre.LHE, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Ecublens, CH-1015 Lausanne, 2012.
- [11] **ANCOLD.** Guidelines for design of dams for earthquake. Australian National Comminittee on Large dams, Melbourne, 1998.
- [12] **Arab R, Gendrin P&Faure Y.H.** Drainage sous remblai, géocomposite Somtube.Revue Travaux, Paris, 2002, pp.23-26.
- [13] **Femmam, H. (2014).** Analyse numérique de l'influence des pressions interstitielles sur la stabilité des talus. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider Biskra.
- [14] **Griffiths, D. V., & Lane, P. A. (1999).** Slope stabilité analysis by finite éléments. Géotechniques, 49(3), 387-403.

[15] **Femmam, H. (2014).** Analyse numérique de l'influence des pressions interstitielles sur la stabilité des talus. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider Biskra.

[16] Heragmi.A, 2009. CHOIX ET CONCEPTION DE L'ORGANE DE L'ETANCHEITE DES BARRAGES EN TERRE BARRAGE ELAGREM JIJEL. Diplôme de magister Annaba, 94p.

[17] Rolley.R et als, 1977. TECHNIQUE DES BARRAGES EN AMENAGEMENT RURAL

### **NETO-graphie :**

*Wikipédia (<https://fr.wikipedia.org/wiki/Barrage>)*

[a] *CHADI A. -1990- (L'envasement des retenues de barrages). Séminaire : Stratégie de gestion des eaux. Horizon 2010.Alger 28- 29 et 30 Mai.*

[b] *HADJI.T. et CHADI. A. -1991- Quelques aspects sur l'envasement des retenues Algériennes. Colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages. Alger les 1'2 et 3 Décembre*

[c] *REMINI B., KETTAB A., HMAT H. 1995-. Envasement du barrage d'IGHIL EMDA (Algérie).*

[d] *Revue Internationale de l'eau : La Houille Blanche no 2/3, pp.23-28*

[e] *BELHADJ. Mémoire magister, 2006, université de Batna*

[f] *Benaïcha, A, « Quantification des transports solides et de l'envasement du barrage de Foum El Gherza (Biskra) ». 2010.*