

**Centre Universitaire AbdelhafidBoussouf -Mila**

**Institut des Sciences et de la Technologie**

**Département de Génie Civil et Hydraulique**



N°Ref :.....

**Projet de Fin d'Etude préparé en vue de l'obtention du diplôme  
de MASTER**

**Spécialité : Hydraulique Urbaine**

**Etude de stabilité d'un barrage en terre –Barrage  
Boukhroufa de la wilaya d'El-Tarf**

**Réalisé par :**

**-Boughera Mahdi**

**-Meghzili Fares**

**-Bouhafna Sana**

**Soutenu devant le jury :**

**M. MOUSSOUNI Abderezzak.**

**Mme. CHEBBAH Lynda.**

**Mme. MISSAOUI Sabrina.**

**Président**

**Examinatrice**

**Encadrante**

**Année universitaire : 2022/2023**

# *Dédicace*

*Gloire soit rendue au Dieu. Le créateur de toute choses le très miséricordieux pour tous ses bienfaits dont il m'a comblé et de m'avoir donné le courage et la force pour réaliser ce travail que je dédie à :*

*Mes très chers parents Auxquels je dois ce que je suis, aucun dédicace ne saurait exprimer le respect, l'amour, Et les sacrifices que vous avez consenti pour ma construction et ma bien-être Puisse Dieu le très haut vous accorder Santé bonheur et longue vie Et faire en sorte que jamais je ne te déçois*

*À mes chers frères Que j'aime profondément, pour leur appui, leurs encouragements Et leur soutien sans faille.*

*À mes chers amis. En Souvenir De notre amitié Et les moments agréables que nous avons passés ensemble. Veuillez trouver dans ce travail L'expression de mon affection la plus sincère.*

*À tout ce que J'aime, à tous qui m'aiment.*

# *Remerciement*

*On remercie Allah le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.*

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de **M<sup>me</sup> SABRINA MISSAOUI**, on la remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

*Nos remerciements s'adressent à **M BERAHIL** pour son aide, son soutien moral et ses encouragements.*

*Nos remerciements s'adressent également à tous nos professeurs pour leur générosité et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.*

*Enfin, une pensée à tous ceux et celles qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, par un sourire réconfortant, un encouragement et généreux : amis, gens, parents...*

# *Nomenclature*

## *Symboles latins*

<i>S</i>	Section mouillée sur le parement aval du barrage	(m <sup>2</sup> )
<i>L</i>	La longueur	(m)
<i>e</i>	L'épaisseur	(m)
<i>q</i>	Débit d'infiltration	(m <sup>3</sup> /s/m)
<i>K</i>	Coefficient de perméabilité du milieu	(m/s)
<i>I</i>	Gradient hydraulique adimensionnel	(sans unité)
<i>F<sub>s</sub></i>	Facteur de sécurité	(sans unité)
<i>r<sub>f</sub></i>	Résistance disponible (résistance moyenne au cisaillement)	(sans unité)
<i>r<sub>d</sub></i>	Résistance mobilisée (contrainte de cisaillement moyenne développée)	(sans unité)
<i>C<sub>v</sub></i>	Coefficient de consolidation	(sans unité)
<i>t</i>	Temps de rabattement	(s)
<i>D</i>	Distance de drainage	(m)

# Table des matières

## Introduction générale

Introduction générale .....	1
-----------------------------	---

## Chapitre I : Généralités sur les barrages en terre

I.1. Introduction.....	1
I.2. Historique .....	3
I.3. Différents types des barrages .....	3
I.3.1. Les barrages rigides .....	4
I.3.1.1. Barrage poids simple .....	4
I.3.1.2. Barrage poids à voûte .....	5
I.3.1.3. Le Barrage poids à contreforts .....	6
I.3.2. Les barrages en remblai .....	7
I.3.2.1. Barrage en enrochement.....	8
I.3.2.1.1. Un barrage en enrochements à noyau d'argile.....	9
I.3.2.1.2. Barrage en enrochements à masque amont.....	9
I.3.2.1.3. Barrage en enrochements à écran interne d'étanchéité (membrane) en béton bitumineux.....	10
I.3.2.2. Barrage en terre :.....	11
I.3.2.2.1. barrage en remblai homogène.....	11
I.3.2.2.2. Barrage zoné avec un noyau étanche .....	12
I.3.2.2.3. Barrage à masque amont .....	13
I.4. Choix du site et du type de barrage .....	14
I.5. Définition du profil général des barrages en terre.....	14
I.5.1. Hauteur du Barrage.....	14
I.5.2. Le niveau normal de retenue .....	14
I.5.3. Niveau des plus Hautes Eaux.....	15
I.5.4. Revanche.....	15
I.5.5. Largeur en crête.....	15
I.5.6. Pente des Talus .....	16
I.6. Drains et filtres du barrage en terre.....	16
I.6.1. Drains.....	17
I.6.2. Filtres .....	17

I.7. Types des drains dans un barrage en terre .....	17
I.8. Les risques de rupture des barrages.....	17
I.8.1. Les causes de rupture des barrages.....	18
I.8.1.1. Causes humaines.....	18
I.8.1.2. Causes naturelles .....	19
I.8.1.3. Problèmes techniques.....	19
I.8.2. Les types de rupture.....	19
I.9. Les mécanismes de rupture des ouvrages en remblai.....	19
I.10. Sécurité d'un barrage en terre.....	20
I.11. Conclusion .....	22

## Chapitre II: Analyse de la stabilité d'un barrages en terre

II.1. Introduction.....	23
II.2 Différents types d'instabilités de pentes.....	23
II.3 Pathologie liée à l'instabilité de l'ouvrage .....	24
II. 3.1 Le glissement des talus.....	24
II.3.2 Le mécanisme de glissement .....	25
II.3.2.1 Le glissement côté aval en situation de crue .....	25
II. 3.2.2 Le glissement côté fleuve lors de la décrue .....	26
II.4 Etude des infiltrations dans un barrage en terre.....	27
II.4.1 Equation de la ligne de saturation .....	28
II.4.2 Ecoulement à travers un barrage à noyau anisotrope .....	30
II.4.3 Etude des pressions interstitielles.....	31
II.4.4 Débit de fuite par infiltration à travers le corps de la digue.....	31
II.4.5 Mécanisme de l'érosion interne et développement de phénomène renard .....	31
II.5 Méthodes d'analyse d'instabilité .....	33
II.5.1 Notion de facteur de sécurité.....	33
II.5.2 Méthode de l'équilibre limite.....	34
II.5.3 Méthodes des tranches .....	35
II.5.3.1 Méthodes de Fellenius .....	36
II.5.3.2 Méthode de Bishop simplifiée (1955).....	38
II.6 Les conditions d'analyse .....	39
II.6.1 Fin de construction .....	39

II.6.2 Période d'exploitation .....	40
II.6.3 Vidange rapide .....	40
II.7 Méthodes de calcul de stabilité sous séisme.....	41
II.7.1 Méthodes théoriques .....	42
II.7.1.1 Méthode pseudo-statique .....	42
II.7.1.2 Méthode de SEED et MARKDISI (1978).....	43
II.7.2 Méthodes numériques .....	43
II.8 Conclusion .....	44

## Chapitre III: Présentation du Barrage d'étude

III.1.Introduction .....	45
III.2 Situation géographique .....	45
III.3. Etude et reconnaissances.....	46
III.3.1 Etude topographique .....	46
III.3.2 Etude Géologique.....	47
III.3.2.1. Les argilites de Numidie.....	47
III.3.2.2. Les grés de Numidie.....	47
III.3.2.3. Les colluvions .....	48
III.3.2.4. Les alluvions .....	48
III.3.2.5. La géologie de la cuvette.....	48
III.3.3 Caractéristiques Hydrologique .....	48
III.3.4 Caractéristiques Géotechniques.....	49
III.4 Un aperçu complet des travaux .....	50
III.4.1 L'aménagement.....	50
III.4.2 Données générales sur l'aménagement .....	51
III.4.3 Le choix de type du barrage en terre.....	52
III.4.4 Description des ouvrages à réaliser pour l'aménagement du barrage .....	52
III.4.4.1 La digue .....	52
III.4.4.2 Le voile d'étanchéité.....	53
III.4.4.3 La galerie d'injection .....	54
III.4.4.4 Puits et galeries d'accès.....	54
III.4.4.5 Galerie de dérivation (provisoire) .....	54
III.4.4.6 Le vidange de fond.....	55
III.4.4.7 La tour de prise d'eau .....	56
III.4.4.8 Evacuateur de crue .....	56

III.6.Conclusion.....	58
-----------------------	----

## Chapitre VI –Application sur le Barrage Boukhroufa

VI.1 Introduction.....	59
VI.2 Présentation de logiciel.....	59
VI.2.1 Introduction .....	59
VI.2.2 Géométrie .....	60
VI.2.3 Génération du Maillage.....	61
VI.2.4 Modèles et propriétés structurels.....	63
VI.2.5 Conditions aux limites .....	63
VI.2.6 Résultats et outils d’analyses.....	64
VI.3 Application sur le barrage.....	65
VI.3.1 La géométrie.....	65
VI.3.2 Génération du maillage et définition des matériaux.....	66
VI.3.3 Définition des conditions aux limites .....	67
VI.3.4 Présentation des résultats .....	68
VI.3.4.1 Cas de vidange rapide .....	69
VI.3.4.2 Détermination du coefficient de sécurité .....	71
VI.4 Conclusion .....	74

## Conclusion

Conclusion générale .....	75
Conclusion générale .....	76

## Référence bibliographique

Références bibliographique .....	
----------------------------------	--



# *Liste des tableaux*

## **Chapitre I : Généralités sur les barrages en terre**

Tableau I.1 : Dimension de la largeur de la crête en fonction des catégories de la route... 16

## **Chapitre II: Analyse de la stabilité d'un barrage en terre**

Tableau II.1 : Valeurs de FS en fonction de l'importance de l'ouvrage ..... 34

## **Chapitre III: Présentation du Barrage d'étude**

Tableau III .1 : Caractéristiques hydrologique ..... 49

Tableau III .2 : Caractéristiques géotechnique ..... 50

## **Chapitre VI –Application sur le Barrage Boukhroufa**

Tableau VI.1 Récapitulation des caractéristiques des matériaux utilisées dans le modèle ..... 67

## *Liste des figures*

### **Chapitre I : Généralités sur les barrages en terre**

Figure I.1 Structure d'un barrage .....	1
Figure I.2 : les différents types de barrages poids .....	4
Figure I.3 Barrage de Sarrans, France .....	5
Figure I.4 Barrage-voûte de Tignes .....	6
Figure I.5 Barrage poids à contreforts de Plan d'Amont .....	7
Figure I.6 Les différents types des barrages en remblai .....	8
Figure I.7 Barrage en enrochement .....	8
Figure I.8 Barrage en terre .....	11
Figure I.9 Barrage en terre homogène .....	12
Figure I.10 Barrage zoné avec un noyau étanche.....	12
Figure I.11 Barrage à masque amont.....	13

### **Chapitre II: Analyse de la stabilité d'un barrage en terre**

Figure II. 1 Le glissement circulaire d'un talus.....	24
Figure II. 2 Le mécanisme de glissement circulaire coté Aval .....	25
Figure II. 3 Le mécanisme de glissement coté fleuve lors de la décrue .....	26
Figure II. 4 Trajectoire de l'eau à travers le barrage.....	27
Figure II. 5 Trace de la ligne de saturation .....	28
Figure II. 6 Trace de la ligne de saturation d'un barrage à noyau .....	29
Figure II. 7 Réseau d'écoulement dans un sol anisotrope .....	30
Figure II.8 La masse du talus découpé en tranches .....	36
Figure II.9 La masse du talus découpé en tranches méthode de Fellenius .....	37
Figure II.10 Forces agissantes sur une tranche (n) .....	37
Figure II.11 Forces agissant sur une seule tranche.....	38
Figure II.12 Critère de rupture en conditions non drainées .....	40
Figure II.13 Forces pseudo-statiques apportées à un talus .....	42

### **Chapitre III: Présentation du Barrage d'étude**

Figure III.1 Plan de situation (barrage Boukhroufa).....	45
--	----

Figure III.2 image topographie du Barrage .....	46
Figure III.3 Topographie de la cuvette .....	46
Figure III.4 L'aménagement du barrage Boukhroufa .....	51
Figure III.5 dérivation provisoire en cours de construction.....	55
Figure III.6 Evacuateur de crues en cours de construction.....	57

## Chapitre VI –Application sur le Barrage Boukhroufa

Figure VI.1 Solution pour tous les types d'analyse .....	59
Figure VI.2 Interface du programme MIDAS GTS NX.....	60
Figure VI.3 Les Différents types d'éléments MIDAS GTS NX.....	61
Figure VI.4 Les types de maillages pour MIDAS GTS NX.....	62
Figure VI.5 Implémentation des modules TGM dans la création .....	63
Figure VI.6 Conditions aux limites dans MIDAS GTS NX.....	64
Figure VI.7 Exploitation des résultats .....	64
Figure VI.8 Elaboration du modèle géométrique du barrage .....	65
Figure VI.9 Import TMS File.....	66
Figure VI.10 Modèle numérique du barrage .....	67
Figure VI.11 Fonction limite d'infiltration .....	68
Figure VI.12 Lignes d'écoulement du barrage a l'état initial.....	69
Figure VI.13 Pression interstitiel état initial (plein).....	70
Figure VI.14 Pression interstitielle vidange rapide.....	71
Figure VI.15 Déplacement barrage fin de construction .....	72
Figure VI.16 Facteur de sécurité - barrage vide.....	73
Figure VI.17 Facteur de sécurité - barrage plein .....	73

## ملخص

تُعد التسربات الهيدروليكية مشكلة خطيرة يجب معالجتها بعناية، حيث يمكن للتسرب أن يؤدي إلى تآكل التربة وتهديد استقرار السد. يهدف العمل المقدم من خلال هذه الدراسة على إنشاء نموذج ثلاثي الأبعاد باستخدام النمذجة الرقمية لتقييم تأثير التسربات الهيدروليكية، وتدفق المياه. حيث يتم من خلالها تقدير معدل التسرب وتحديد مواقع التسرب وتحليل تأثيرها على استقرار السد قدمنا في البداية معلومات عامة عن السدود، وطرق تحديد أبعادها، وتأثير المشاكل الخطيرة التي تهدد استقرارها بفعل التسربات الهيدروليكية مع عرض لبرنامج midas GTS.NX الذي يعتبر أحدث جيل من برامج العناصر المحددة. وفي النهاية فمننا بدراسة تطبيقية للاستقرار الهيدروليكي ثم التوازن الديناميكي للسد الترابي بوخروفا الواقع في ولاية الطارف، الذي هو قيد الإنشاء والذي سيوفر إمدادات لمياه الشرب و الري، بالإضافة إلى سدود أخرى مثل سد بولطان و بوناموسة.

## RESUME

L'étude présentée dans cette memoire vise à modéliser numériquement l'effet des infiltrations sur la stabilité d'un barrage en terre. Tout d'abord, nous avons présenté des généralités sur les différents types de barrages en terre, leur dimensionnement et les effets des infiltrations sur leur stabilité. Après avoir présenté l'outil numérique utilisé, le logiciel Midas GTS-NX qui est considéré comme la dernière génération de logiciels d'analyse par éléments finis. La modélisation numérique a été utilisée pour évaluer la stabilité hydraulique et mécanique du barrage en terre de Boukhroufa, qui est actuellement en cours de construction.

## Abstract

The study presented in this thesis aims to numerically model the effect of infiltrations on the stability of an earth dam.

Firstly, we presented generalities on the different types of earth dams, their dimensioning and the effects of infiltration on their stability.

After presenting the digital tool used, which is the Midas GTS-NX software which is considered the latest generation of finite element analysis software.

Finally, we conducted an applied study where the software application was employed to assess the hydraulic and mechanical stability of the Boukhroufa earthen dam, Which is currently under construction.

## INTRODUCTION

La construction des barrages en terre a connu une évolution significative en raison de la demande croissante d'approvisionnement en eau pour la population. La conception d'un barrage est complexe car elle dépend des conditions du site, des fondations, des matériaux disponibles et du coût de construction, ce qui influence le choix du type de barrage.

La sécurité des barrages est une préoccupation constante pour les ingénieurs chargés de leur conception, pour deux raisons principales. Tout d'abord, il s'agit de prévenir les ruptures catastrophiques. Ensuite, il est crucial de maintenir le bon fonctionnement de l'ouvrage, car la défaillance ou l'indisponibilité d'un barrage peut avoir un impact sur des intérêts économiques vitaux et causer des dommages importants, même en l'absence de rupture du barrage.

L'analyse de la stabilité d'un barrage, incluant le glissement, le tassement, peut être réalisée de manière efficace grâce à une campagne de reconnaissance géologique et géotechnique bien menée. Une étude géotechnique rigoureuse permet d'assurer la stabilité de la structure face à différentes situations de chargement.

Cependant, l'étude de la stabilité ne se limite pas aux aspects mentionnés précédemment. Elle englobe également l'analyse des infiltrations à l'intérieur du barrage, qui peuvent poser des problèmes et menacer sa stabilité interne. Afin de minimiser ces problèmes, il est nécessaire d'étudier la trajectoire de l'écoulement de l'eau, le gradient hydraulique et le débit des eaux qui s'écoulent à travers la digue. Pour résoudre le problème de stabilité des barrages, de nombreuses méthodes de calcul ont été développées. Les approches couramment utilisées sont les méthodes classiques, telles que les méthodes d'équilibre limite, ainsi que les méthodes numériques, notamment la méthode des éléments finis.

Les méthodes classiques, se basent sur des principes mécaniques pour évaluer la stabilité des barrages. Elles permettent de déterminer les forces et les moments qui agissent sur la structure, en prenant en compte les conditions de chargement et les caractéristiques du matériau. Ces méthodes fournissent des résultats analytiques et sont souvent utilisées pour les analyses préliminaires de stabilité.

Les méthodes numériques, sont basées sur la discrétisation du domaine du barrage en éléments finis. Elles permettent de modéliser plus précisément le comportement du barrage en

prenant en compte des paramètres plus complexes, tels que la non-linéarité des matériaux et les conditions aux limites spécifiques. Les méthodes numériques offrent une flexibilité accrue dans la modélisation des barrages et permettent d'obtenir des résultats plus détaillés.

L'objectif de notre travail est d'utiliser des outils numériques pour étudier la stabilité du barrage Boukhroufa, en se concentrant sur le phénomène d'infiltration. Nous allons utiliser la méthode des éléments finis, pour modéliser le comportement du barrage face aux infiltrations d'eau. En analysant les schémas d'écoulement de l'eau, les gradients hydrauliques et les débits d'eau traversant la digue, Cette étude nous permettra d'obtenir des informations précises sur l'impact des infiltrations sur la structure du barrage et de prendre des décisions éclairées pour assurer sa stabilité à long terme.

Pour aboutir à nos objectifs nous avons adopté le plan suivant :

**Le premier chapitre** prescrit les différents types de barrages en terre.

**Le deuxième chapitre** présente la stabilité et les méthodes de calcul.

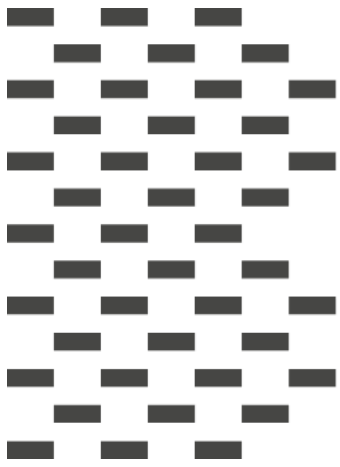
**Le troisième chapitre** présente le barrage d'étude.

**Le quatrième chapitre** offre une présentation de l'outil numérique Midas GTS.NX, suivi par d'application sur le barrage étudié, avec détermination de la ligne de saturation et le coefficient de sécurité dans les différentes cas.

Nous finissons ce travail par une conclusion générale dans laquelle nous exposons les différents résultats trouvés à travers cette étude

# Chapitre I

## Généralités sur les barrages en terre



barrage

## I.1. Introduction

Les barrages en terre sont des ouvrages de retenue d'eau construits à partir de matériaux naturels tels que la terre, les roches et les graviers. Ils sont considérés comme des ouvrages hydrauliques qui barrent sur toute la largeur une section de vallée et créent ainsi une cuvette artificielle géologiquement étanche.

Ils sont souvent utilisés pour des applications telles que l'irrigation, l'approvisionnement en eau pour les zones résidentielles et industrielles, la gestion des crues et la production d'énergie hydroélectrique pour les petits cours d'eau.

Les barrages en terre peuvent être construits de différentes manières, selon les caractéristiques du site et les besoins spécifiques. Les techniques de construction comprennent la construction de digues en terre compactée, la construction de remblais de roche et de terre, et la construction de barrages en terre renforcés avec des matériaux tels que le béton, le bois ou les géotextiles [1].

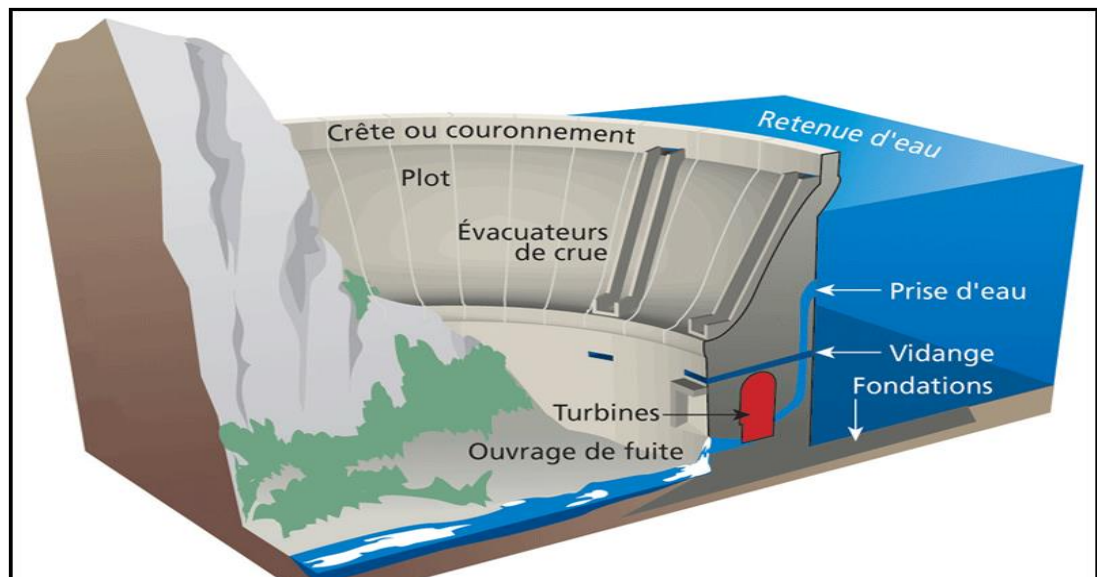


Figure I.1 Structure d'un barrage [12].

Un barrage est généralement constitué des éléments suivants :

- Un réservoir : c'est une étendue d'eau artificielle créée en amont du barrage, qui peut stocker une quantité d'eau variable en fonction de la taille et de la capacité du barrage. Le réservoir peut être



utilisé pour la production d'énergie hydroélectrique, l'irrigation, la navigation, la régulation des cours d'eau, la protection contre les crues, etc.

- Un déversoir : c'est un système qui permet de laisser passer les eaux lorsque le réservoir est plein pour éviter les risques de débordement et de rupture du barrage. Le déversoir peut être équipé de vannes pour réguler le débit d'eau.
- Un dispositif de vidange : c'est un système qui permet d'évacuer partiellement ou totalement les eaux du réservoir en cas de besoin. Cela peut être nécessaire pour entretenir le barrage, pour faire face à une période de sécheresse, pour évacuer une crue importante, etc.
- Des prises d'eau : ce sont des systèmes qui permettent d'alimenter le réservoir en eau depuis une source située à distance (rivière, glacier, etc.) ou d'acheminer les eaux retenues par le barrage vers des secteurs où elles seront utilisées pour diverses applications (irrigation, production d'énergie, etc.).
- Des turbines : dans le cas des barrages hydroélectriques, des turbines sont installées pour produire de l'électricité à partir de la force de l'eau. Les turbines sont actionnées par le flux d'eau qui passe à travers le barrage et qui fait tourner les pales des turbines.

Les barrages en terre peuvent être classés en différentes catégories en fonction de leur hauteur et de leur utilisation. Les petites digues et les barrages de rétention d'eau sont souvent construits pour l'irrigation et l'approvisionnement en eau des zones rurales et des zones périurbaines. Les grands barrages en terre sont souvent construits pour la production d'énergie hydroélectrique, la régulation des crues, la navigation, la protection contre l'érosion côtière et d'autres utilisations,

Les barrages en terre peuvent nécessiter une maintenance régulière pour maintenir leur intégrité structurelle et leur sécurité. Les inspections régulières peuvent aider à détecter les signes de défaillance potentielle, tels que les fuites, les érosions ou les fissures. Les réparations et les travaux d'entretien peuvent inclure l'ajout de matériaux de renforcement, le comblement de fissures ou l'élimination de la végétation qui peut endommager la structure [1].

En raison de leur coût relativement faible, de leur flexibilité de conception et de leur capacité à s'adapter aux conditions locales, les barrages en terre continuent d'être utilisés pour une variété d'applications. Cependant, ils peuvent être plus vulnérables aux conditions environnementales extrêmes, tels que les inondations, les séismes ou les glissements de terrain, ce qui nécessite une conception et une construction soignées pour assurer leur sécurité et leur fiabilité.

## **I.2. Historique :**

La construction de barrages remonte à l'Antiquité. Les civilisations de l'Égypte ancienne, de la Mésopotamie et de l'Asie du Sud ont construit des barrages en terre pour contrôler les eaux des rivières et créer des réserves d'eau pour l'irrigation.

Au fil du temps, les barrages ont été de plus en plus utilisés pour la production d'énergie hydroélectrique et la régulation des cours d'eau. En effet, la force hydraulique a été employée dès la fin du XIXe siècle pour faire face aux besoins en énergie hydroélectrique. Les barrages ont ainsi été construits pour fournir de l'énergie électrique aux villes en développement [3].

Par ailleurs, les barrages ont également été construits pour la régularisation des cours d'eau, l'alimentation des canaux et l'atténuation des étiages. Ces constructions ont permis de stocker de grandes quantités d'eau pour faire face aux périodes de sécheresse et aux besoins en irrigation [1].

Aux États-Unis, de nombreux barrages en remblai ont été construits dès le milieu du XIXe siècle pour répondre aux besoins en énergie électrique et en irrigation. Cependant, plusieurs d'entre eux ont été détruits lors de crues importantes, ce qui a conduit à une amélioration des techniques de construction et de gestion des barrages pour assurer leur sécurité et leur fiabilité.

## **I.3. Différents types des barrages**

Chaque barrage est un ouvrage unique qui nécessite une étude préalable et une conception spécifique en fonction des caractéristiques géologiques, hydrauliques, topographiques et environnementales du site. Cependant, en termes généraux, les barrages peuvent être classés en deux groupes principaux [2] :

1. Les barrages en béton : ces barrages sont construits en béton armé et sont généralement utilisés pour les grands barrages de grande hauteur. Le béton est un matériau très résistant à la pression de l'eau et peut être utilisé pour construire des barrages de forme complexe, tels que les barrages voûtes et les barrages poids.
2. Les barrages en remblai : ces barrages sont construits en utilisant des matériaux tels que des roches, des graviers et de la terre, qui sont compactés pour former une structure solide. Ces barrages sont généralement utilisés pour les petits et moyens barrages de faible hauteur. Les barrages en remblai peuvent être construits plus rapidement et à moindre coût que les barrages en béton, mais ils ont une durée de vie plus courte et nécessitent souvent une maintenance plus fréquente [6].

### I.3.1. Les barrages rigides

Le barrage poids est l'un des types les plus couramment utilisés pour retenir l'eau dans les réservoirs, les lacs artificiels ou les canaux. Il est conçu pour résister à la pression de l'eau grâce à son propre poids et à sa capacité de transfert de charge au sol, ils sont généralement construits en béton armé, bien que des matériaux tels que la pierre ou la brique puissent également être utilisés. Ils sont constitués d'une base en béton, sur laquelle est construite une paroi verticale en forme de U ou de V, appelée parement. Cette paroi est renforcée à l'intérieur par des contre-forts en béton qui la soutiennent et la renforcent, ce qui permet de réduire la pression de l'eau [7].

Les barrages poids sont des ouvrages de grande envergure qui nécessitent des études préalables et des travaux de génie civil importants pour leur construction. Ils sont généralement construits dans des zones où le sol est suffisamment solide pour supporter le poids du barrage et résister aux forces exercées par l'eau, ils sont généralement utilisés pour stocker l'eau, réguler les crues, produire de l'électricité et fournir de l'eau potable. Cependant, ils présentent également des risques potentiels tels que la rupture ou l'effondrement en cas de pression excessive de l'eau, de glissement de terrain ou de séisme.

Voici quelques schémas les différents types de barrages poids :

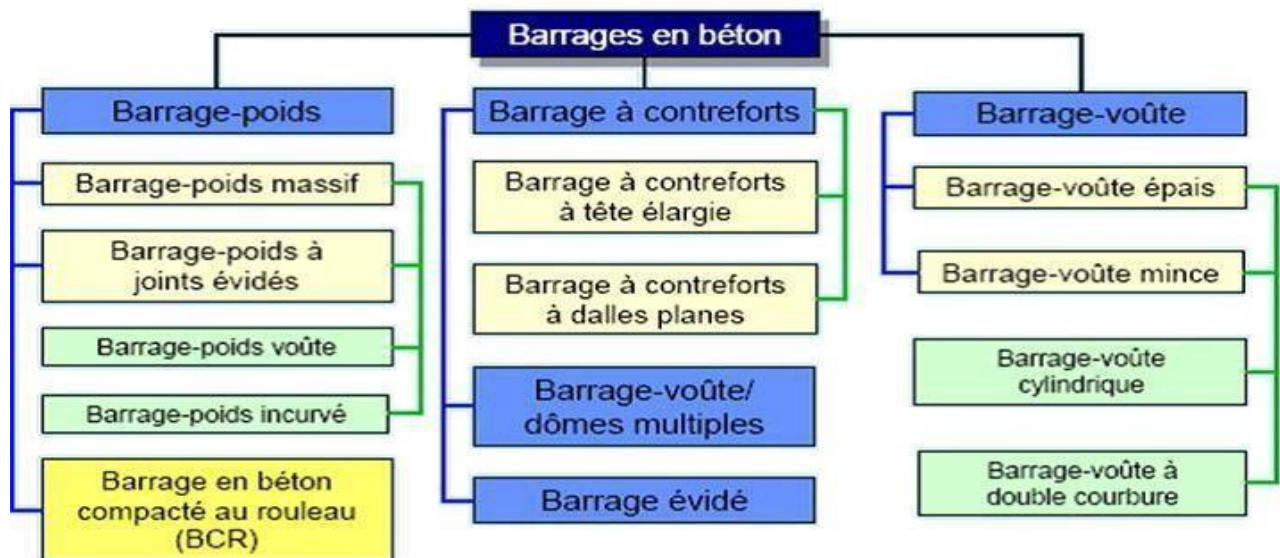


Figure I.2 Les différents types de barrages poids

Le parement du barrage peut être construit en une seule pièce ou en plusieurs blocs, qui sont souvent assemblés sur place à l'aide de joints en béton pour former une paroi continue. Le parement peut être renforcé par des armatures en acier pour augmenter sa résistance à la pression de l'eau. La base du barrage est également en béton armé et sert à répartir le poids du barrage sur la fondation. La base est souvent élargie pour augmenter la stabilité du barrage [1].

Le barrage poids simple est un type de barrage relativement facile à construire et économique. Cependant, il est moins adapté aux grands barrages de hauteurs importantes car il ne permet pas de réduire suffisamment la pression de l'eau sur la paroi du barrage. Les autres types de barrage poids, tels que les barrages à contreforts, les barrages en talus et les barrages à voûte, sont utilisés pour répondre à ces exigences [8].



**Figure I.3 Barrage de Sarrans, France [6].**

### **I.3.1.2. Barrage poids à voûte :**

Le barrage poids à voûte est un type de barrage qui est construit en forme d'arc, avec le courant de l'eau qui exerce une pression sur la voûte pour la stabiliser. Contrairement aux barrages poids simples, qui ont une paroi verticale, les barrages poids à voûte ont une forme incurvée qui leur permet de résister à une plus grande pression de l'eau [1]. La voûte du barrage est constituée d'une série de blocs en béton préfabriqués ou coulés sur place. Les blocs sont assemblés de manière à former une courbe, qui est ensuite ancrée dans la fondation du barrage. Les blocs sont souvent renforcés par des armatures en acier pour augmenter leur résistance à la pression de l'eau et les parois sont également en béton armé et servent à soutenir la voûte et la base du barrage est élargie pour augmenter la stabilité du barrage [4].



**Figure I.4 Barrage-voûte de Tignes [6].**

Le barrage poids à voûte est un type de barrage adapté aux grandes hauteurs et aux débits d'eau importants. Il permet de réduire la pression de l'eau sur la paroi du barrage, ce qui permet de construire des barrages plus hauts et plus larges que les barrages poids simples. Cependant, la construction d'un barrage poids à voûte est plus complexe et coûteuse que celle d'un barrage poids simple.

#### **I.3.1.3. Le Barrage poids à contreforts :**

Le barrage poids à contreforts est un type de barrage poids qui est renforcé par des contreforts qui s'étendent à partir de la base du barrage jusqu'à la crête du barrage.

Les contreforts servent à soutenir la paroi du barrage et à réduire la pression de l'eau sur la paroi.

La paroi du barrage est en béton armé et repose sur une base en béton. Les contreforts sont également en béton armé et sont ancrés dans la fondation du barrage. Les contreforts sont disposés le long de la paroi du barrage à intervalles réguliers, souvent tous les 10 à 20 mètres. Les contreforts sont généralement plus larges à leur base et s'affinent vers le haut pour minimiser la surface de contact avec l'eau. Ce type de barrage poids est un type de barrage adapté aux hauteurs moyennes à élevées et aux débits d'eau importants. Il permet de construire des barrages plus larges et plus hauts que les barrages poids simples grâce à la réduction de la pression de l'eau sur la paroi du barrage. La construction d'un barrage poids à contreforts est plus complexe et coûteuse que celle d'un barrage poids simple, mais moins que celle d'un barrage poids à voûte.



**Figure I.5 Barrage poids à contreforts de Plan d'Amont [11].**

Le barrage poids à contreforts a l'avantage de présenter une grande flexibilité de conception et de s'adapter à une grande variété de situations géologiques. Il est également relativement facile à construire et à entretenir, et peut être équipé d'un système de vidange pour évacuer l'eau en cas de besoin. Cependant, il nécessite une grande quantité de matériaux de construction en béton armé, ce qui peut être coûteux et avoir un impact environnemental important [5].

### **I.3.2. Les barrages en remblai**

Il existe plusieurs types de barrages en remblai, qui varient en fonction de leur conception et de leur utilisation spécifique. Voici quelques exemples :

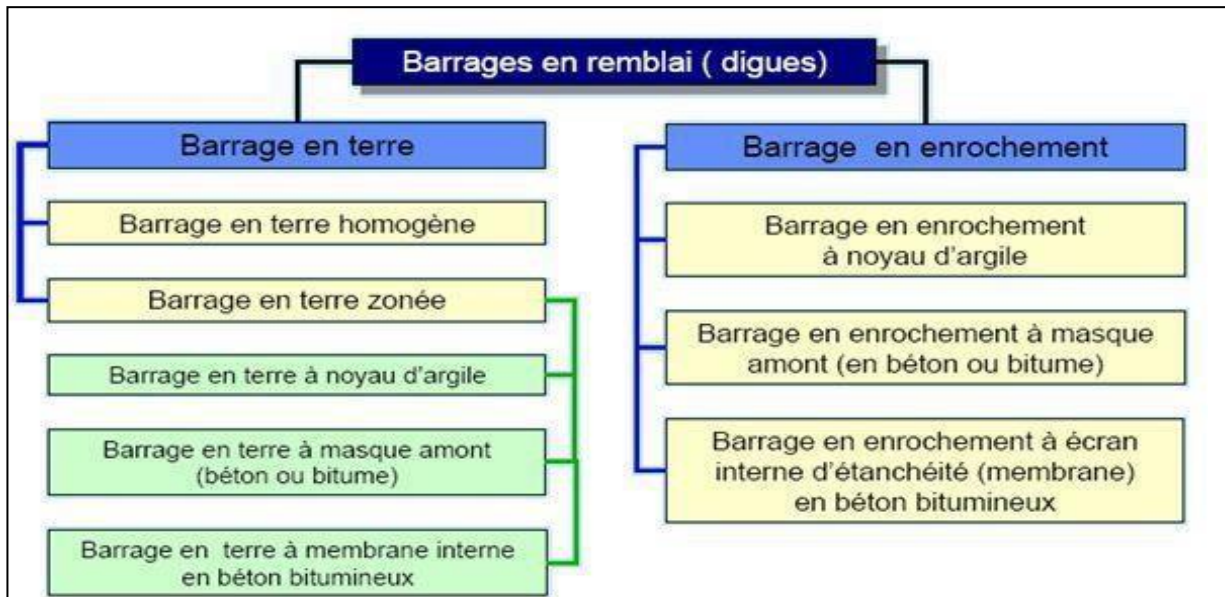


Figure I.6 Les différents types des barrages en remblai [6].

### I.3.2.1. Barrage en enrochement :

Un barrage en remblai enrochement est un type de barrage en remblai qui utilise des enrochements (des blocs de roche) pour renforcer la couche externe de matériaux de remblai. Les enrochements sont placés sur la surface externe du barrage pour augmenter sa résistance aux forces naturelles telles que les vagues, les courants et les inondations, il est construit en créant d'abord une couche de remblai avec des matériaux tels que de la terre, du sable ou du gravier. Cette couche est ensuite renforcée avec une couche de blocs de roche, qui est placée sur la surface externe du barrage. Les enrochements sont disposés en couches horizontales, et chaque couche est compactée pour assurer une structure solide [10].



Figure I.7 Barrage en enrochement [11].

Les avantages d'un barrage en remblai enrochement sont nombreux. Il est plus résistant aux forces naturelles que les barrages en remblai conventionnels, tels que les barrages en remblai avec noyau central. Il est également plus facile à construire que les barrages en béton, car il utilise des matériaux naturels tels que les blocs de roche. Cependant, le barrage en remblai enrochement peut nécessiter une maintenance régulière pour éviter les dommages causés par l'érosion ou les chocs. Il peut également nécessiter une surveillance continue pour détecter tout signe de faiblesse ou de défaillance structurelle.

En conclusion, le barrage en remblai enrochement est un type de barrage en remblai qui offre une grande résistance aux forces naturelles et qui est relativement facile à construire. Il est souvent utilisé dans des zones exposées à des conditions environnementales difficiles, telles que les régions côtières, les zones de haute montagne et les régions sujettes aux inondations.

#### **I.3.2.1.1. Un barrage en enrochements à noyau d'argile :**

c'est un type de barrage en remblai qui combine les avantages d'un barrage en enrochements et d'un barrage en remblai avec noyau central. Comme son nom l'indique, ce type de barrage en remblai utilise des enrochements pour renforcer la couche externe de matériaux de remblai, tandis qu'un noyau d'argile est utilisé pour empêcher les fuites d'eau. Le noyau d'argile est généralement constitué d'une couche de matériau argileux compacté, qui est placée entre les couches d'enrochements. Cette couche est étanchéifiée avec des matériaux spéciaux tels que des membranes géotextiles ou des bentonites, pour empêcher les fuites d'eau à travers le noyau.

Les avantages d'un barrage en enrochements à noyau d'argile sont multiples. Il offre une grande résistance aux forces naturelles telles que les vagues, les courants et les inondations, ainsi qu'une bonne étanchéité pour prévenir les fuites d'eau. Il est également plus facile à construire que les barrages en béton, car il utilise des matériaux naturels tels que les enrochements et l'argile. Cependant, le barrage en enrochements à noyau d'argile peut nécessiter une maintenance régulière pour prévenir l'érosion ou les dommages causés par les intempéries. Il peut également nécessiter une surveillance continue pour détecter tout signe de faiblesse ou de défaillance structurelle.

#### **I.3.2.1.2. Barrage en enrochements à masque amont :**

Un barrage en enrochements à masque amont est un type de barrage en remblai qui utilise une couche externe d'enrochements pour protéger la couche de matériaux de remblai contre les forces naturelles telles que les vagues, les courants et les inondations. Contrairement à un barrage en enrochements à noyau d'argile, le masque amont ne contient pas de couche étanche pour



empêcher les fuites d'eau, il est construit en créant une couche de remblai avec des matériaux tels que de la terre, du sable ou du gravier. Cette couche est ensuite renforcée avec une couche d'enrochements, qui est placée sur la surface externe du barrage. La couche d'enrochements protège la couche de remblai contre les forces naturelles, mais n'empêche pas les fuites d'eau.

Le masque amont peut être réalisé avec différents types de matériaux, tels que des blocs de roche, des graviers ou des galets. Les matériaux sont disposés en couches horizontales et sont soigneusement compactés pour assurer une structure solide.

Les avantages d'un barrage en enrochements à masque amont sont nombreux. Il est plus résistant aux forces naturelles que les barrages en remblai conventionnels, tels que les barrages en remblai avec noyau central, et il est plus facile à construire que les barrages en béton. Il est également plus économique que les autres types de barrages. Cependant, le barrage en enrochements à masque amont peut nécessiter une maintenance régulière pour prévenir l'érosion ou les dommages causés par les intempéries. Il peut également nécessiter une surveillance continue pour détecter tout signe de faiblesse ou de défaillance structurelle.

#### **I.3.2.1.3. Barrage en enrochements à écran interne d'étanchéité (membrane) en béton bitumineux :**

Un barrage en enrochements à écran interne d'étanchéité (membrane) en béton bitumineux est un type de barrage en remblai qui utilise une couche étanche en béton bitumineux pour empêcher les fuites d'eau à travers la structure. Ce type de barrage est souvent utilisé dans les zones où l'eau est abondante ou où les risques d'inondation sont élevés, il est construit en premier lieu en créant une couche de remblai avec des matériaux tels que de la terre, du sable ou du gravier. Ensuite, une couche d'enrochements est placée sur la surface externe du barrage pour protéger la couche de remblai contre les forces naturelles.

La couche étanche en béton bitumineux est ensuite placée à l'intérieur du barrage, contre la couche de remblai. Cette couche est composée d'une membrane en caoutchouc synthétique renforcée avec une couche de béton bitumineux. La membrane en caoutchouc synthétique est posée sur la surface du remblai, puis recouverte de béton bitumineux pour la protéger contre les dommages mécaniques et les rayons UV.

Les avantages d'un barrage en enrochements à écran interne d'étanchéité en béton bitumineux sont nombreux. Il est très résistant aux fuites d'eau grâce à la couche étanche en béton bitumineux, ce qui permet une utilisation efficace de l'eau stockée. De plus, il est plus

économique que les barrages en béton armé, et plus facile et rapide à construire. Cependant, comme pour tout type de barrage, il peut nécessiter une maintenance régulière pour prévenir l'érosion ou les dommages causés par les intempéries. Il peut également nécessiter une surveillance continue pour détecter tout signe de faiblesse ou de défaillance structurelle.

### **I.3.2.2. Barrage en terre :**



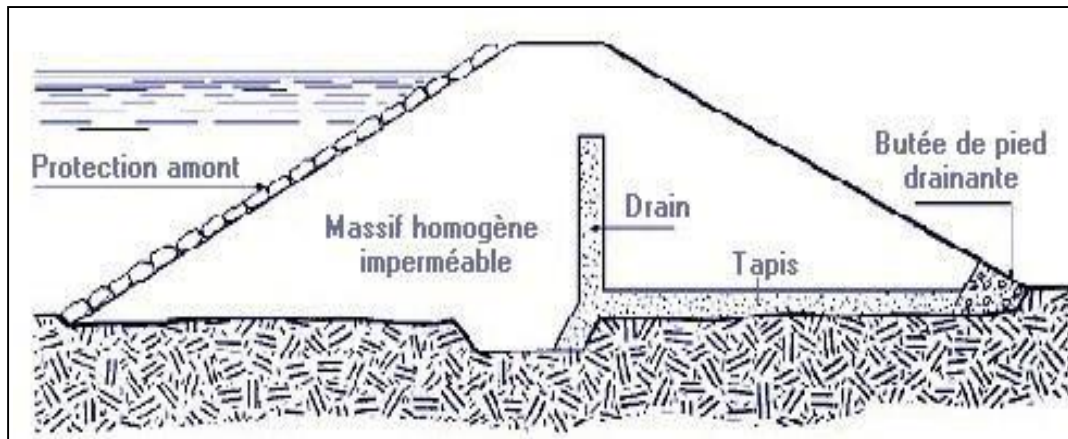
**Figure I.8 Barrage en terre [3].**

Les barrages en terres, également connus sous le nom de barrages en remblai, sont des structures construites en utilisant des matériaux tels que la terre, le sable, le gravier, la roche et autres matériaux similaires. Ils sont utilisés pour retenir l'eau et créer des réservoirs d'eau pour diverses utilisations [3]. Il existe plusieurs types de barrages en terres, notamment :

#### **I.3.2.2.1. barrage en remblai homogène**

Un barrage en remblai homogène est un type de barrage en terre construit en utilisant un seul type de matériau pour l'ensemble du barrage. Les matériaux utilisés pour construire ce type de barrage sont généralement de la terre, du sable, du gravier ou de la roche, et sont soigneusement sélectionnés pour leur qualité, leur résistance et leur compatibilité, le processus de construction d'un barrage en remblai homogène implique la construction d'une digue en utilisant des couches successives de matériau compacté. Chaque couche est compactée avant d'ajouter la couche suivante, ce qui permet de renforcer la structure et d'assurer sa stabilité.

Leurs avantages sont sa simplicité de conception et de construction, ainsi que son coût relativement faible par rapport à d'autres types de barrages. Les matériaux utilisés pour construire un barrage en remblai homogène sont également facilement disponibles dans la plupart des régions, ce qui rend cette solution de retenue d'eau largement utilisée.

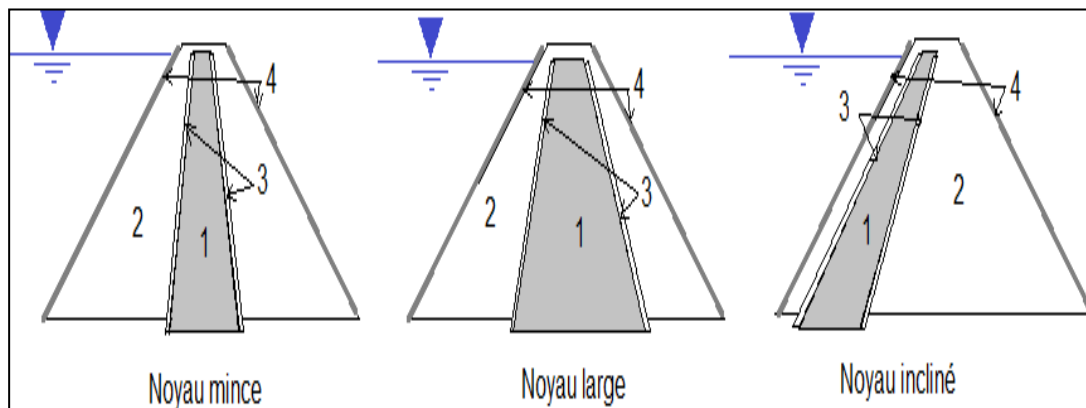


**Figure I.9 Barrage en terre homogène[6].**

Cependant, les barrages en remblai homogène peuvent être plus sujets aux fuites et aux érosions que les barrages en béton armé ou en enrochements, ce qui peut nécessiter une surveillance et une maintenance régulières pour prévenir les défaillances structurelles. De plus, la capacité de retenue d'eau d'un barrage en remblai homogène est limitée par rapport à d'autres types de barrages, ce qui peut limiter son utilisation dans certaines applications.

#### **I.3.2.2.2. Barrage zoné avec un noyau étanche :**

Un barrage zoné avec un noyau étanche est un type de barrage en terre qui utilise un noyau étanche pour renforcer sa capacité de retenue d'eau. Il est constitué de plusieurs zones, chacune ayant une fonction spécifique pour assurer la sécurité et la stabilité du barrage.



**Figure I.10 Barrage zoné avec un noyau étanche [6].**

La zone centrale est le noyau étanche, qui est généralement constitué de matériau argileux compacté et qui forme une barrière imperméable contre les fuites d'eau. Les zones adjacentes à la

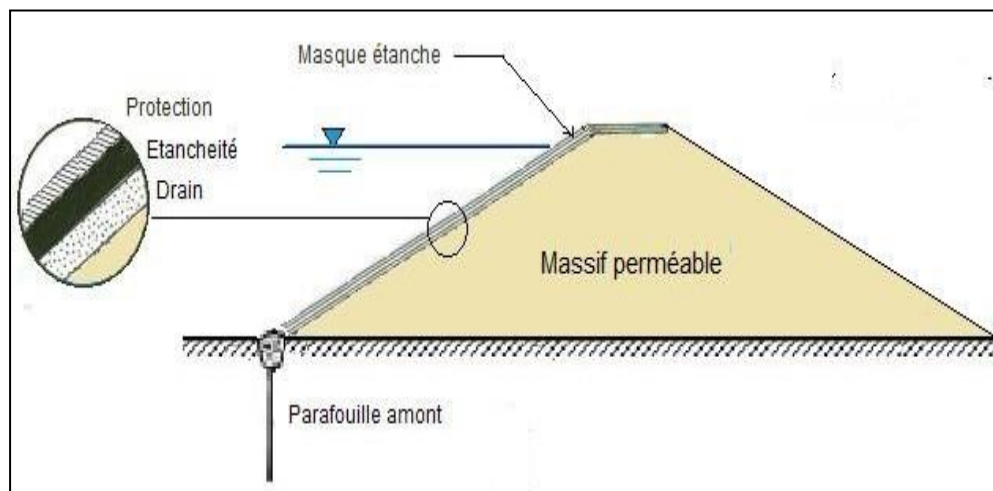
zone centrale sont appelées zones de transition et sont constituées de matériaux moins perméables, tels que du sable ou du gravier compacté.

Les zones extérieures sont les zones de filtre, qui permettent à l'eau de s'écouler à travers le barrage, mais qui empêchent le transport des particules de sol. Les zones de filtre sont généralement constituées de matériaux plus grossiers tels que des pierres ou des blocs de roche, ce qui permet une meilleure circulation de l'eau à travers le barrage.

Les barrages zonés avec un noyau étanche sont largement utilisés pour la construction de barrages en terre de grande envergure, car ils offrent une solution économique et fiable pour la retenue d'eau. Le noyau étanche permet de réduire les risques de fuites d'eau, tandis que les zones de transition et de filtre permettent une circulation adéquate de l'eau à travers le barrage.

Cependant, la construction d'un barrage zoné avec un noyau étanche est un processus complexe qui nécessite une planification minutieuse, une expertise en ingénierie et une surveillance constante pour garantir la sécurité et la stabilité du barrage à long terme.

#### I.3.2.2.3. Barrage à masque amont :



**Figure I.11 Barrage à masque amont [6].**

Un barrage à masque amont est un type de barrage en enrochement dans lequel une couche de roches ou d'enrochements est placée sur la face amont (côté où l'eau arrive) du barrage pour protéger le noyau du barrage et la fondation contre l'érosion causée par l'eau. Cette couche de roches est appelée "masque" et peut être constituée de pierres, de blocs de roche ou d'autres matériaux durs. L'utilisation d'un masque amont offre plusieurs avantages. Tout d'abord, il réduit le risque d'érosion du noyau du barrage et de la fondation, ce qui peut prolonger la durée de vie

du barrage et réduire les coûts de maintenance. De plus, il peut améliorer la résistance du barrage aux inondations et aux crues soudaines en renforçant sa capacité à retenir l'eau[4].

Cependant, la construction d'un masque amont peut être coûteuse et nécessiter une expertise en ingénierie pour garantir son efficacité à long terme. De plus, il peut être vulnérable aux dommages causés par les chocs, les tempêtes ou les tremblements de terre, ce qui peut compromettre la sécurité et la stabilité du barrage. Par conséquent, la surveillance et la maintenance régulières sont essentielles pour garantir la sécurité et la fiabilité d'un barrage à masque amont.

#### **I.4. Choix du site et du type de barrage :**

Les principaux paramètres à prendre en considération dans le choix du type de barragesont :

- ✓ Topographie du bassin versant ;
- ✓ Morphologie de vallée ;
- ✓ Les conditions géologiques et géotechniques ;
- ✓ La disponibilité des matériaux ;
- ✓ Risque sismique ;
- ✓ condition climatique ;
- ✓ crues a maîtriser ;
- ✓ But de l'ouvrage.

#### **I.5. Définition du profil général des barrages en terre**

**I.5.1. Hauteur du Barrage :** la hauteur d'un barrage est la mesure verticale de la distance entre la crête du barrage (le point le plus haut du barrage) et la base du barrage (le fond de la vallée ou du lit de la rivière où le barrage est construit). La hauteur d'un barrage est l'un des facteurs les plus importants dans la conception et la construction de barrages, car elle détermine la quantité d'eau que le barrage peut retenir et la pression que l'eau exerce sur le barrage. La hauteur du barrage dépend de plusieurs facteurs, notamment les caractéristiques géologiques et hydrologiques de la région, les conditions météorologiques, le volume d'eau à retenir et la fonction du barrage. Par exemple, un barrage utilisé pour l'irrigation ou la production d'électricitépeut avoir une hauteur différente de celle d'un barrage utilisé pour le stockage d'eau potable ou pour la prévention des inondations.

**I.5.2. Le niveau normal de retenue :** est la hauteur de l'eau retenue par un barrage lorsqu'il est rempli à sa capacité maximale normale. C'est la hauteur de l'eau qui est prévue pour être

maintenue en permanence dans le réservoir créé par le barrage, afin de satisfaire les besoins en eau des utilisateurs, tels que l'irrigation, la production d'électricité ou l'alimentation en eau potable.

Le niveau normal de retenue peut varier en fonction des saisons et des conditions météorologiques, car les précipitations et les débits d'eau peuvent fluctuer tout au long de l'année. Les barrages doivent être conçus pour résister à des variations importantes du niveau de l'eau, afin de garantir leur stabilité et leur sécurité en toutes circonstances.

### **I.5.3. Niveau des plus Hautes Eaux :**

Le niveau des plus hautes eaux (PHE) est la hauteur maximale que l'eau peut atteindre en amont d'un barrage, en cas de crue exceptionnelle ou d'inondation. Le niveau des plus hautes eaux est souvent utilisé pour déterminer la capacité de sécurité d'un barrage, c'est-à-dire sa capacité à résister aux inondations et aux crues. Le niveau des plus hautes eaux est important pour évaluer les risques liés à la sécurité des barrages et à leur capacité à résister aux crues et aux inondations. Les barrages doivent être conçus pour résister aux niveaux des plus hautes eaux prévus, afin de garantir leur sécurité et leur stabilité en toutes circonstances. Si le niveau des plus hautes eaux dépasse la capacité de sécurité d'un barrage, cela peut entraîner des inondations catastrophiques en aval, avec des conséquences potentiellement graves pour les populations et l'environnement.

**I.5.4. Revanche :** La revanche d'un barrage est importante pour assurer la sécurité du barrage en cas de submersion, elle correspond à la distance verticale entre le niveau maximal d'exploitation et le niveau du couronnement du barrage, après consolidation. La détermination de la revanche doit prendre en compte plusieurs facteurs pour assurer la sécurité du barrage, notamment :

- Le dysfonctionnement des organes de décharge mobile.
- La hauteur maximale des vagues provoquées par le vent extrême considéré.
- Le déferlement des vagues à la surface du parement amont.
- Le supplément de sécurité en cas d'avalanches, de tremblements de terre ou de rupture des glaciers.

**I.5.5. Largeur en crête :** elle doit assurer la sécurité suffisante contre tout risque de submersion par les vagues au cas où la revanche serait faible. Elle dépend de plusieurs facteurs notamment de la longueur minimum du chemin d'infiltration qui assure un gradient hydraulique suffisamment faible à travers le barrage lorsque le réservoir est plein Généralement pour les

petits barrages, la largeur en crête est égale ou supérieure à 3 m, et pour des digues de plus de 9 m de haut on adopte souvent comme largeur en crête 1/3 de la hauteur de la digue [5].

**Tableau I.1** : Dimension de la largeur de la crête en fonction des catégories de la route.

Paramètres	Catégorie de la route				
	I	II	III	IV	V
Largeur de la crête b (m)	$\geq 27.5$	15	12	12	8
de la partie de passage	$\geq 15$	7.5	7.0	7.0	4.5
Largeur du bas-côté, a1(m)	3.75	3.75	3.75	2.5	1.75

### I.5.6. Pente des Talus :

La pente des talus est un élément important pour garantir la stabilité statique de ces structures. En effet, la pente des parements doit être déterminée en fonction de la nature des matériaux utilisés et des conditions géotechniques du site pour garantir une stabilité optimale.

Pour déterminer la pente des parements, on utilise en général des valeurs qui semblent optimales, compte tenu des matériaux utilisés. Cependant, il est important de vérifier la stabilité de la structure par des calculs de mécanique des sols pour garantir que la pente est suffisamment stable pour résister aux forces qui agissent sur le talus.

Pour les digues de hauteur égale ou inférieure à 10 mètres, on utilise en général une valeur de fruit constante. Cependant, pour les digues de hauteur supérieure à 10 mètres, il est nécessaire d'utiliser des fruits variables pour garantir une stabilité optimale. Dans ce cas, la plus grande valeur de fruit est utilisée à la semelle et la plus petite à la crête.

### I.6. Drains et filtres du barrage en terre

Les drains et les filtres sont des éléments importants des barrages en terre, permettant de contrôler la pression de l'eau et d'éviter l'érosion du remblai en évacuant l'eau accumulée derrière le barrage de manière contrôlée [6].

### **I.6.1. Drains :**

Les drains du barrage en terre sont des canalisations qui permettent de drainer l'eau qui s'accumule derrière le barrage. Ces canalisations sont généralement constituées de matériaux résistants à la corrosion, tels que l'acier galvanisé ou le PVC. Les drains sont positionnés à différents niveaux dans le remblai pour permettre l'évacuation de l'eau à différents niveaux de profondeur.

### **I.6.2. Filtres :**

Les filtres du barrage en terre sont des couches de matériaux perméables, tels que le sable et le gravier, qui sont placées autour des drains pour empêcher les particules de sol fines de pénétrer dans les canalisations de drainage. Les filtres doivent être conçus de manière à permettre l'écoulement de l'eau tout en évitant le colmatage.

## **I.7. Types des drains dans un barrage en terre :**

Il existe plusieurs types de drains utilisés dans les barrages en terre. Voici quelques exemples :

1. Drains verticaux : ces drains sont généralement constitués de tuyaux en PVC perforés qui sont placés verticalement dans le remblai. Ils permettent de drainer l'eau accumulée à des niveaux profonds du barrage.
2. Drains horizontaux : ces drains sont constitués de tuyaux en PVC ou en acier galvanisé qui sont placés horizontalement dans le remblai. Ils permettent de drainer l'eau accumulée à des niveaux plus superficiels du barrage.
3. Drains en zigzag : ces drains sont conçus pour suivre un parcours en zigzag à travers le remblai. Ils permettent d'évacuer l'eau de manière plus efficace en couvrant une plus grande surface de remblai.
4. Drains radiaux : ces drains sont placés perpendiculairement à la face aval du barrage et permettent de drainer l'eau accumulée le long de la face du barrage.

Le choix du type de drain dépend des caractéristiques spécifiques du barrage en terre et de la nature du sol environnant. Un ingénieur spécialisé dans la conception des barrages en terre sera en mesure de recommander le type de drain le plus approprié pour chaque projet spécifique [10].

## **I.8. Les risques de rupture des barrages :**

Les barrages sont des structures de génie civil qui sont utilisées pour stocker l'eau, produire de l'électricité, réguler le débit des cours d'eau et protéger les zones en aval des crues. Cependant, comme toute infrastructure, les barrages peuvent présenter des risques, notamment celui de rupture. Les risques de rupture des barrages peuvent avoir des conséquences dévastatrices pour les personnes et l'environnement situés en aval. Voici quelques exemples de risques de rupture des barrages :



1. Surcharge hydraulique : l'eau stockée derrière le barrage peut exercer une pression énorme sur la structure. Si cette pression dépasse la capacité du barrage, cela peut provoquer une rupture.
2. Glissement de terrain : les barrages en terre peuvent subir des glissements de terrain si le sol sur lequel ils sont construits n'est pas stable. Cela peut affaiblir la structure et la rendre plus vulnérable à la rupture.
3. Érosion : l'eau qui s'écoule sur la surface du barrage peut entraîner une érosion, ce qui peut affaiblir la structure.
4. Vieillesse et usure : les barrages sont des structures qui vieillissent et s'usent avec le temps. Les matériaux peuvent se corroder, se fissurer et se dégrader, ce qui peut affaiblir la structure et la rendre plus vulnérable à la rupture.
5. Mauvaise conception : si la conception du barrage n'est pas correcte ou si les matériaux utilisés ne sont pas suffisamment solides, cela peut également augmenter le risque de rupture.

**I.8.1. Les causes de rupture des barrages :** Les causes de rupture d'ouvrage peuvent être de différents ordres :

#### **I.8.1.1. Causes humaines**

Les facteurs humains peuvent jouer un rôle important dans la rupture des barrages. Les études préalables approfondies sont essentielles pour comprendre les caractéristiques du site, les conditions environnementales et les risques potentiels associés à la construction d'un barrage. Si ces études sont insuffisantes, cela peut entraîner des problèmes de conception et de construction qui peuvent augmenter les risques de rupture [7].

Le contrôle d'exécution doit être effectué tout au long de la construction du barrage pour s'assurer que les plans sont suivis correctement et que les matériaux utilisés sont conformes aux normes de qualité requises. Les erreurs d'exploitation peuvent également causer la rupture d'un barrage. Un mauvais contrôle des débits d'eau, une surcharge hydraulique ou un manque de préparation pour des événements tels que des crues peuvent tous contribuer à augmenter le risque de rupture. Un manque de surveillance et d'entretien réguliers peut également causer des problèmes de sécurité pour les barrages. Les barrages ont besoin d'être surveillés en permanence pour détecter les signes de problèmes potentiels et les réparer avant qu'ils ne deviennent critiques. Un manque d'entretien régulier peut également causer une détérioration structurelle du barrage, ce qui peut augmenter le risque de rupture.

Enfin, les actes de malveillance, de sabotage, d'attentat ou de guerre peuvent également causer la rupture des barrages. Les barrages peuvent être des cibles pour des attaques terroristes ou des actes de guerre, qui peuvent endommager les structures et causer leur rupture.

### **I.8.1.2. Causes naturelles**

Les ruptures de barrage peuvent également être causées par des facteurs naturels tels que les crues exceptionnelles qui peuvent avoir une intensité supérieure à celle retenue pour le dimensionnement des ouvrages évacuateurs, appelée crue de projet. Les barrages en remblai sont particulièrement vulnérables aux débordements car ils ne supportent pas la submersion. Le niveau de sécurité retenu pour les barrages est généralement compris entre la crue millénaire et la crue déca millénaire. Pendant la phase de construction des barrages, les ouvrages d'évacuation ne sont pas encore opérationnels, ce qui peut rendre cette période sensible aux risques de crue.

Les glissements de terrain sont également une cause fréquente de rupture de barrage. Ils peuvent affecter l'ouvrage lui-même dans le cas des barrages en remblai, ou les terrains entourant la retenue. Un glissement de terrain peut déstabiliser l'ouvrage et provoquer sa rupture [10].

### **I.8.1.3. Problèmes techniques :**

La rupture d'un ouvrage peut être causée par des problèmes techniques tels que des vannes défectueuses qui ne permettent pas une évacuation adéquate des crues ou des défauts de conception, de construction ou de matériaux. Les caractéristiques du barrage, telles que le type, les matériaux et les fondations, ainsi que l'âge de l'ouvrage, peuvent influencer l'apparition de ces problèmes. Cependant, les techniques de construction modernes ont considérablement amélioré la sécurité des barrages.

### **I.8.2. Les types de rupture**

Il existe deux types principaux de rupture de barrage : la rupture brutale et la rupture progressive. La rupture brutale est caractérisée par une défaillance soudaine de l'ouvrage, généralement causée par une charge hydraulique ou une surcharge. Cela peut être dû à une crue exceptionnelle ou à un glissement de terrain, par exemple. La rupture brutale peut entraîner une onde de submersion violente qui peut être très destructrice en aval du barrage.

La rupture progressive, quant à elle, est causée par une accumulation de dommages au fil du temps. Des facteurs tels que la corrosion, l'érosion ou la fatigue des matériaux peuvent affaiblir l'ouvrage progressivement jusqu'à ce qu'il se rompe. La rupture progressive peut prendre plusieurs formes, telles que des fissures ou des fuites, et peut prendre du temps pour se manifester complètement. Ce type de rupture peut causer des dommages moins importants que la rupture brutale, mais il peut être difficile à détecter et à prévenir [6].

### **I.9. Les mécanismes de rupture des ouvrages en remblai :**

Les ouvrages en remblai sont les types de barrages les plus couramment utilisés. Leur rupture peut survenir de différentes manières, notamment en raison de leur structure même. Les mécanismes de rupture les plus courants sont :

1. L'érosion interne : l'eau qui s'infiltré à travers le remblai peut emporter avec elle les particules fines du sol, créant ainsi des canaux à l'intérieur de l'ouvrage. À terme, ces canaux peuvent se rejoindre pour former un conduit continu qui affaiblit l'ensemble de la structure.
2. Le glissement de terrain : les remblais sont souvent construits sur des pentes naturelles. Si ces pentes sont mal stabilisées, un glissement de terrain peut se produire et entraîner la rupture du barrage.
3. La surverse : lorsque la retenue est pleine, l'eau peut déborder par-dessus la crête du barrage. Si cela se produit, l'eau peut éroder la surface du sol et affaiblir la structure.
4. Les séismes : les tremblements de terre peuvent causer des dommages importants aux barrages en remblai, en provoquant des fissures ou des glissements de terrain.

### **I.10. Sécurité d'un barrage en terre**

La statistique de Middle brooks est une étude qui a porté sur 200 barrages en terre qui ont subi des désordres graves ayant entraîné leur mise hors service. Les résultats de cette étude ont montré que seulement 15 % de ces cas étaient dus à une instabilité de talus, qui correspond à un problème de coefficient de sécurité au glissement. Les autres cas représentaient la quasi-totalité des accidents, mais ne pouvaient pas être calculés.

En effet, les déversements, c'est-à-dire la submersion du barrage, représentaient 30 % des cas. L'infiltration et le renard, qui est l'érosion interne du barrage, ont été responsables de 25 % des cas. Les conduites sous remblai ont également été identifiées comme une cause de rupture dans 13 % des cas. Les revêtements, qui peuvent être endommagés par les vagues, ont contribué à 5 % des cas. Enfin, 7 % des cas ont été classés comme "divers" et 5 % sont restés inconnus. Ces chiffres soulignent l'importance de prendre en compte une variété de facteurs dans la conception, la construction et l'exploitation des barrages en terre pour garantir leur sécurité.

- **Sécurité en fonction de la hauteur**

La sécurité d'un barrage dépend en partie de sa hauteur. En effet, plus un barrage est haut, plus le volume d'eau stocké en amont est important et plus les conséquences d'une rupture sont catastrophiques. Ainsi, la sécurité des barrages est réglementée en fonction de leur hauteur.

En Europe, les barrages sont classés en quatre catégories en fonction de leur hauteur : A, B, C et D. Les barrages de classe A sont les plus hauts, avec une hauteur supérieure à 20 mètres, tandis que les barrages de classe D ont une hauteur inférieure ou égale à 8 mètres. Les règles de

conception, de construction et d'exploitation sont plus strictes pour les barrages de classe A que pour les autres.

- **Les voiles d'injection et de drainage :**

Les voiles d'injection et de drainage sont des techniques utilisées pour renforcer la stabilité des barrages en terre. Les voiles d'injection sont des couches de matériaux tels que le ciment ou la bentonite, injectées dans le sol pour renforcer sa résistance et éviter l'érosion interne. Les voiles de drainage, quant à elles, sont des couches de matériaux perméables, comme des graviers, placées à la base du barrage pour permettre l'écoulement de l'eau et réduire la pression hydrostatique qui peut s'accumuler à la base de l'ouvrage.

Ces techniques de renforcement contribuent à améliorer la sécurité des barrages en terre en réduisant les risques de glissement de terrain, d'érosion interne et de rupture due à la pression hydrostatique. Les voiles d'injection et de drainage sont souvent utilisées en complément de techniques plus traditionnelles comme les noyaux étanches, les talus renforcés, les enrochements, ou encore les vannes de vidange pour assurer une sécurité optimale des barrages en terre.

- **La fondation et ses pièges**

La sécurité des barrages est étroitement liée à la qualité de la fondation sur laquelle ils reposent. En effet, une fondation mal adaptée ou défaillante peut conduire à une instabilité de l'ouvrage ou à des infiltrations d'eau qui peuvent compromettre sa stabilité à long terme.

Il existe plusieurs pièges liés à la fondation d'un barrage, notamment :

-La présence de cavités souterraines : des cavités naturelles dans le sol peuvent affaiblir la fondation du barrage et provoquer des mouvements de terrain ou des effondrements.

-Les matériaux de fondation inadéquats : si la fondation du barrage est composée de matériaux instables ou peu résistants, elle peut s'affaisser ou se déformer avec le temps, mettant en danger la stabilité de l'ouvrage.

-La présence de failles géologiques : les failles peuvent compromettre la stabilité de la fondation du barrage en créant des zones de faiblesse qui peuvent conduire à des glissements de terrain ou à des infiltrations d'eau.

-Les mouvements sismiques : les tremblements de terre peuvent causer des mouvements du sol qui peuvent endommager la fondation du barrage et causer des ruptures ou des fuites.

Pour prévenir ces pièges, des études géologiques et géotechniques approfondies doivent être menées pour évaluer la qualité de la fondation et déterminer les mesures de renforcement nécessaires pour garantir la sécurité de l'ouvrage. Des techniques telles que l'injection de ciment ou l'installation de drains peuvent être utilisées pour stabiliser la fondation et éviter les infiltrations d'eau.

## **I.11. Conclusion**

La sûreté des barrages est le fruit d'un processus technique rigoureux qui inclut leur conception, leur construction et leur exploitation, et qui ne peut être dissocié de cet ensemble. Cet objectif ambitieux d'améliorer la sûreté des barrages est d'autant plus crucial que le nombre de barrages augmente, et avec lui le niveau de risque lié à leur rupture.

Il est donc impératif d'atteindre cet objectif car des vies humaines sont en jeu. En outre, les barrages sont perçus comme un danger supplémentaire ajouté aux autres nuisances souvent évoquées telles que la perte d'habitat, l'inondation de terres agricoles, la suppression de rapides, la modification du cycle naturel des rivières, la détérioration de la qualité de l'eau et la formation de brouillard. L'accumulation de ces facteurs, à des degrés divers selon le projet, altère l'image de l'hydroélectricité et incite les organismes publics de financement ou de réglementation à être plus prudents avant de soutenir un nouveau projet ou la rénovation d'un barrage existant.

# Chapitre II

## Analyse de la stabilité d'un barrage en terre



## II.1 Introduction

La construction de barrages en remblai est une pratique courante pour la gestion des ressources en eau. Cependant, la stabilité de ces structures est cruciale pour garantir leur sécurité et leur durabilité. La stabilité des barrages en remblai dépend en grande partie de la stabilité des talus, qui doivent être capables de résister aux glissements sous toutes les sollicitations possibles. Pour déterminer les conditions de stabilité, la mécanique des sols utilise l'étude de l'équilibre limite. Les matériaux utilisés pour la construction du barrage peuvent également influencer la stabilité des pentes, et il est important de choisir des matériaux performants pour éviter la rupture des talus, garantir la stabilité de la fondation et éviter les déformations excessives. Dans cet article, nous examinerons les différents facteurs qui influencent la stabilité des barrages en remblai, ainsi que les méthodes utilisées pour garantir leur sécurité et leur durabilité.

## II.2 Différents types d'instabilités de pentes :

Les versants sont soumis à des mouvements variés en termes de dimensions, de morphologie et d'évolution cinématique. Pour les classifier, plusieurs critères ont été proposés tels que la morphologie, la cinématique et la nature des matériaux. Trois familles principales de phénomènes sont à l'origine des déplacements importants de matériaux sur les talus et les versants :

- les glissements en terrain meuble : qui se caractérisent par la formation d'une surface de rupture le long de laquelle les déplacements se produisent, ils se produisent lorsque la couche supérieure du sol se déplace sur une couche plus profonde le long d'une surface de rupture. Ils sont souvent déclenchés par des facteurs tels que les précipitations abondantes, les tremblements de terre ou l'activité humaine.
- les éboulements en terrain rocheux : ils se produisent lorsque des blocs de roche se détachent d'une falaise ou d'un versant et dévalent la pente, souvent en raison de l'érosion naturelle ou de l'activité humaine.
- les coulées boueuses ou de débris : elles se produisent lorsque de fortes pluies ou des événements de fonte des neiges entraînent des quantités importantes d'eau et de sédiments sur des pentes abruptes.
- Les chutes de blocs : elles sont similaires aux éboulements, mais impliquent des blocs individuels plutôt que des masses rocheuses importantes.

- Les avalanches de neige : elles sont provoquées par des accumulations de neige instables qui se détachent et dévalent la pente à grande vitesse.

Ces instabilités de pentes peuvent être très dangereuses pour les populations et les infrastructures situées en aval. Il est donc crucial de comprendre les facteurs qui contribuent à leur déclenchement et de prendre les mesures nécessaires pour les prévenir ou les atténuer.

### II.3 Pathologie liée à l'instabilité de l'ouvrage

L'instabilité mécanique d'un ouvrage peut entraîner plusieurs pathologies qui peuvent affecter sa durabilité et sa sécurité. Elle se caractérise par des désordres dans sa masse, qui se traduisent en surface par des déformations géométriques décelables par l'auscultation topographique. On distinguera l'instabilité mécanique "de masse" des instabilités liées à l'eau (comme les effets du renard) ou à la surface du sol (comme le développement du ravinement), qui ont un impact plus localisé sur la forme de l'ouvrage.

#### II. 3.1 Le glissement des talus

Le phénomène observé dans ce cas est celui du glissement de talus, qui se manifeste généralement par la formation d'une zone de rupture presque circulaire à l'intérieur du corps de la structure de remblai, en raison d'une pente de talus excessive. Le phénomène de glissement circulaire est souvent observé dans les remblais homogènes où il n'existe pas de structure interne favorisant une ligne de rupture particulière. Ce type de glissement peut également affecter les terrains de fondation si ceux-ci ont des caractéristiques mécaniques peu favorables.

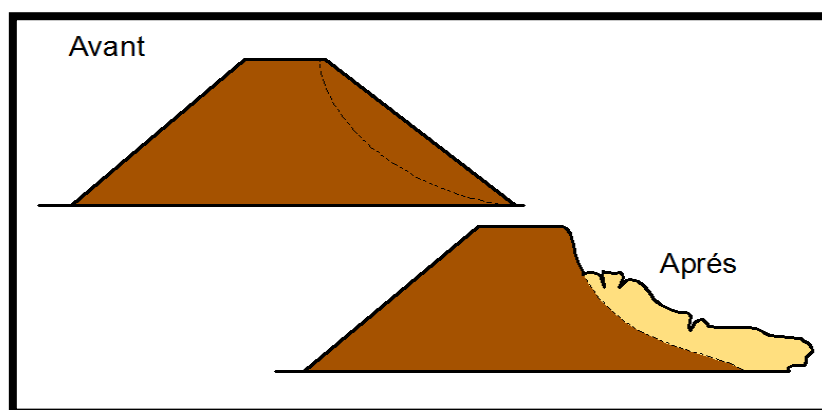


Figure II. 1 Le glissement circulaire d'un talus[13]



## II.3.2 Le mécanisme de glissement

### II.3.2.1 Le glissement côté aval en situation de crue

Le glissement côté aval est un phénomène qui peut se produire lors de crues, lorsque les trois facteurs mentionnés sont réunis. Voici une brève explication de chacun de ces facteurs :

1. Un profil de digue étroit avec pentes de talus fortes : Une digue avec un profil étroit et des pentes de talus fortes est plus susceptible de subir un glissement de terrain côté aval en raison de l'instabilité naturelle de ce type de terrain.
2. Une piézométrie élevée dans la digue : La piézométrie fait référence à la pression de l'eau dans la digue. Si cette pression est élevée en raison d'une absence de drainage ou de la présence de couches hétérogènes, elle peut provoquer un affaiblissement de la digue et augmenter le risque de glissement côté aval.
3. Une faible compacité du remblai : La compacité du remblai fait référence à la densité et à la solidité des matériaux utilisés pour construire la digue. Si les matériaux utilisés sont peu denses et peu solides, la digue sera plus susceptible de subir un glissement côté aval. De même, la présence d'une couche argileuse sous-consolidée peut également contribuer à la faible compacité du remblai et augmenter le risque de glissement.

pour éviter le glissement côté aval en situation de crue, il est important de s'assurer que la digue est construite avec des matériaux solides et compacts, de veiller à la piézométrie de la digue et à la présence d'un système de drainage adéquat, et de surveiller régulièrement l'état de la digue afin de détecter tout signe de faiblesse ou d'instabilité.

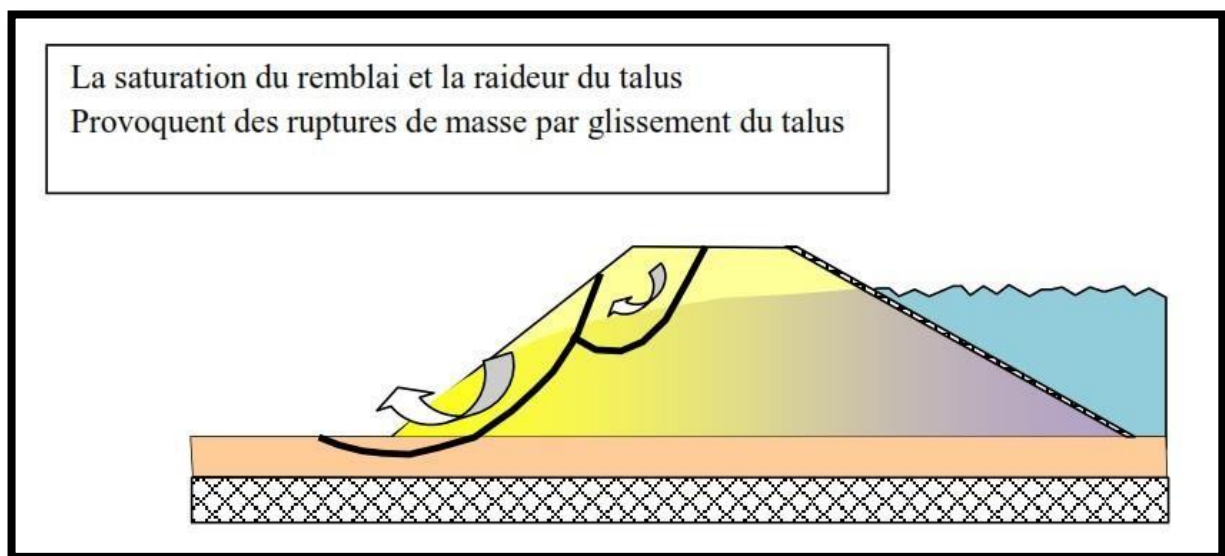


Figure II. 2 Le mécanisme de glissement circulaire coté Aval [13]

### II. 3.2.2 Le glissement côté fleuve lors de la décrue

Le phénomène de rupture par glissement côté fleuve se produit généralement lors de la décrue rapide du cours d'eau. Ce mécanisme est principalement dû aux sous-pressions qui se développent pendant la période de crue et affecte principalement les talus de digues constitués de matériaux argileux, présentant des pentes raides ou des perrés trop étanches. [15]

Cependant, ce mécanisme est particulièrement préoccupant pour les digues situées à proximité de déversoirs équipés de remblais fusibles, qui sont conçus pour se rompre lorsque la hauteur d'eau atteint un certain seuil. Lorsque le déversoir est en fonctionnement, le remblai fusible s'érode rapidement et le débit dérivé dans le déversoir augmente, ce qui peut entraîner une décrue rapide du cours d'eau. Cette situation peut alors provoquer des glissements de talus côté fleuve, ce qui peut être particulièrement dangereux pour les zones résidentielles et les terres agricoles situées en aval de la digue. Pour minimiser le risque de glissement, il est important de surveiller régulièrement l'état de la digue, d'assurer une maintenance adéquate du système de drainage et de renforcer les zones à risque avec des matériaux plus solides. [13]

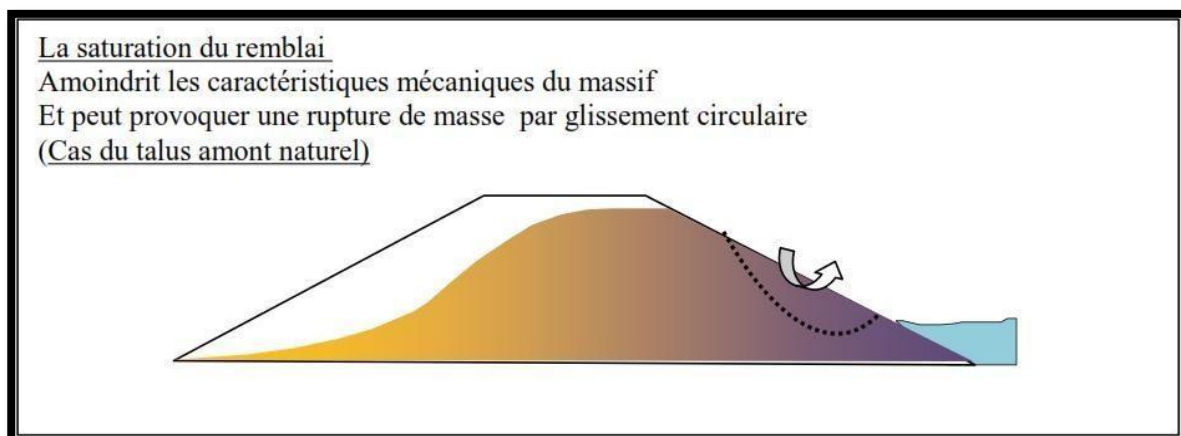
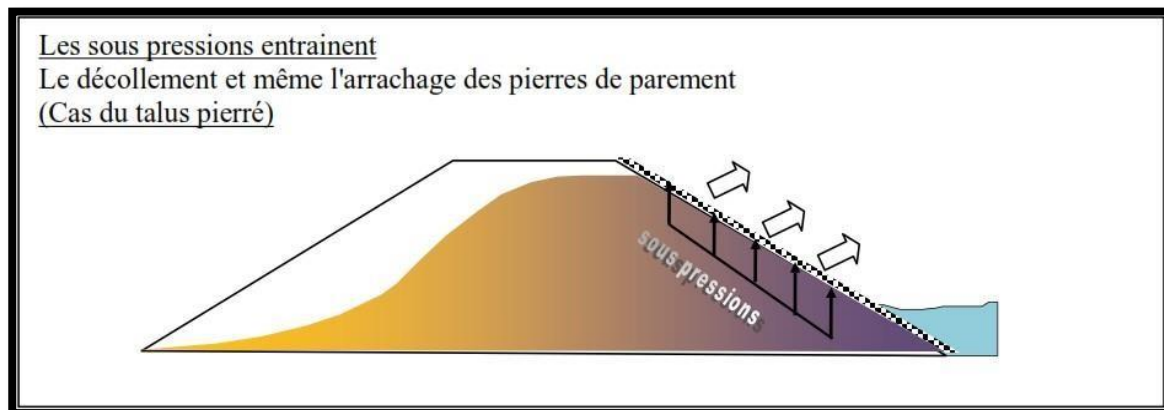


Figure II. 3 Le mécanisme de glissement coté fleuve lors de la décrue[13]

## II.4 Etude des infiltrations dans un barrage en terre

Lors des calculs de stabilité préliminaires d'une digue, il est essentiel de déterminer le réseau d'écoulement à long terme à travers le corps de celle-ci, en supposant que la retenue est pleine et en régime permanent. Les infiltrations dans les barrages en terre doivent être examinées sous trois angles différents afin d'obtenir une vision complète du problème :

- La ligne de saturation du massif de la digue, qui correspond à la ligne où la pression hydrostatique de l'eau au sein du massif est nulle. Cette ligne phréatique représente le niveau de la surface libre dans le corps du barrage, et est essentielle pour effectuer les calculs de stabilité de la digue.
- La pression de l'eau interstitielle dans le massif, qui peut être déterminée à partir d'un réseau de lignes équipotentiels reliant les points d'égal potentiel hydraulique dans le barrage et les fondations. Une augmentation de cette pression peut être dangereuse pour la stabilité, car elle peut causer l'apparition du phénomène de renard.
- Le débit de fuite dû aux infiltrations, qui peut être obtenu à partir du réseau de lignes de courant représentant la trajectoire de l'eau à travers le barrage. Si le débit de fuite est trop important, le barrage ne remplit pas sa fonction, et il est nécessaire d'augmenter la taille des parties imperméables du corps de digue.

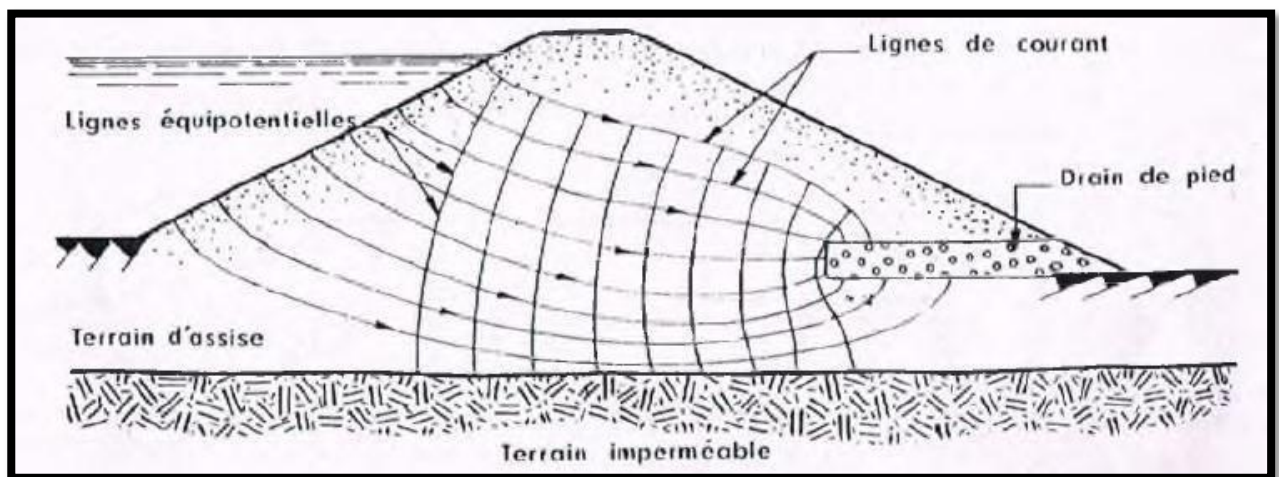


Figure II. 4 Trajectoire de l'eau à travers le barrage [14]

L'étude de l'infiltration peut aussi se faire par calcul numérique sur ordinateur, par analogie électrique, ou par une méthode simplifiée basée sur approximations et des propriétés

graphiques du réseau d'écoulement. [1]

- **Méthodes graphiques** : méthodes simplifiées telles que la méthode de Kozeny qui utilise des approximations et des propriétés graphiques du réseau d'écoulement).
- **Méthodes analogiques** : méthodes électriques et magnétiques (pour descas simples).
- **Méthodes de simulation numérique**, (outil mathématique qui peut s'adapter avec des cas complexes).

#### II.4.1 Equation de la ligne de saturation

L'équation de la ligne de saturation est définie comme une surface où la pression est égale à la pression atmosphérique dans une coupe transversale. Kozeny a proposé une méthode pour tracer cette ligne, en montrant :

**-Cas d'un barrage en terre homogène** : la ligne de saturation peut être représentée par une parabole dans sa partie médiane. Cette méthode présente l'avantage de permettre la détermination des trois paramètres importants sans la connaissance précise de toutes les lignes de courant, à condition de respecter certaines règles de distribution des lignes : le parement amont est une équipotentielle, la ligne de saturation est une ligne de courant, la fondation est une ligne de courant dans le cas d'une fondation imperméable, la pression hydraulique étant nulle sur la courbe de saturation, le potentiel en un point de cette ligne est dû uniquement à la côte de ce point et les équipotentiels sont perpendiculaires aux lignes de courant.

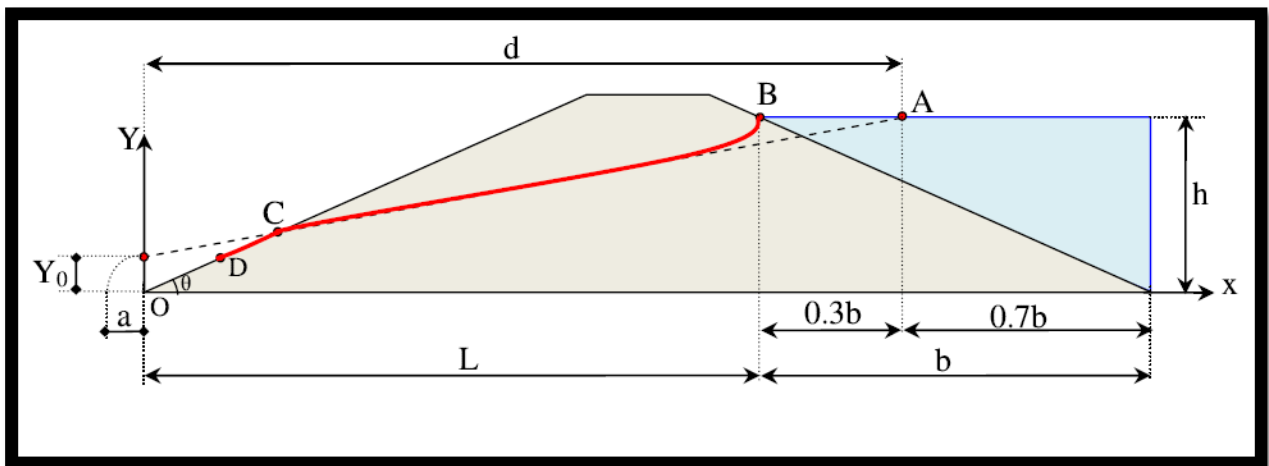


Figure II. 5 Trace de la ligne de saturation [15]

Kozeny a montré que, dans un barrage en terre **homogène et isotrope** non drainé, la ligne de saturation peut être assimilée dans sa partie médiane à une parabole d'axe horizontal dont le foyer « O » est situé au pied du parement aval du barrage. L'équation de cette parabole s'écrit : Avec :

$$Y^2 - Y_0^2 - 2XY_0 = 0 ; \quad Y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d$$

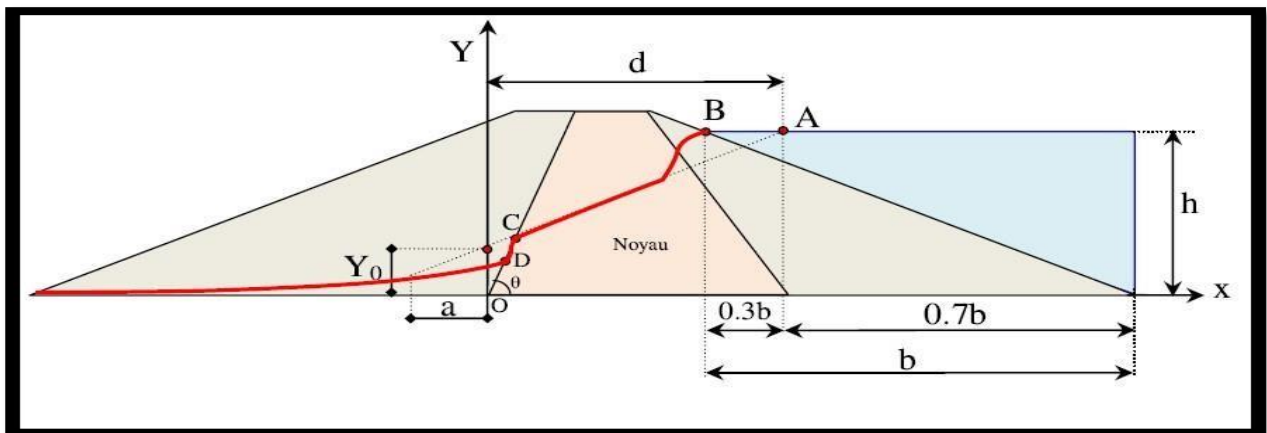
Avec  $d$  : étant la largeur en base du barrage diminuée  $0.7 b$  et  $b$  étant la projection horizontale de la partie mouillée du parement amont.

La parabole coupe le plan d'eau amont en un point  $A$  situé à une distance horizontale de ce parement  $AB = 0,3 b$

Pour obtenir la ligne de saturation à partir de la parabole de Kozeny, on raccorde celle-ci au point «  $B$  » du plan d'eau amont par une courbe normale au parement amont en «  $B$  » et tangente à la parabole. [15]

### -Cas de digue avec un noyau, sur fondations imperméables

Le calcul des digues avec un noyau sur fondations imperméables est essentiel pour déterminer le point de résurgence de l'eau dans le noyau. Cette information est cruciale pour dimensionner les filtres et les drains afin de rabaisser la ligne de saturation vers le fond de la digue. La méthode de Kozeny n'est pas claire pour trouver la suite de la ligne de saturation. Il semble qu'une fois sortie du noyau, l'eau ruisselle un temps sur le noyau, puis elle forme une surface à la côte «  $Y_0/2$  » jusqu'à la sortie du barrage.



**Figure II. 6 Trace de la ligne de saturation d'un barrage à noyau [15]**

Bien que cette ligne soit une approximation de la situation réelle, elle est adéquate pour notre analyse. Cependant, quelle que soit la situation après le noyau, il est essentiel de construire des drains sur chaque face. Ces filtres empêchent le lessivage des matériaux et maintiennent l'intégrité du noyau.

### II.4.2 Ecoulement à travers un barrage à noyau anisotrope

Dans un sol homogène et isotrope soumis à un écoulement d'eau permanent, les deux équations qui régissent l'écoulement sont :

- L'équation de la continuité dans la phase liquide.
- La loi de Darcy.

La charge hydraulique  $h(x, y)$  satisfait donc à une équation de Laplace. C'est une fonction harmonique.

Dans la réalité (milieu anisotrope), du fait de la sédimentation et de consolidation suivant la verticale, la perméabilité horizontale  $K_x$  et verticale  $K_y$  sont différentes :

$$K_y < K_x. [14]$$

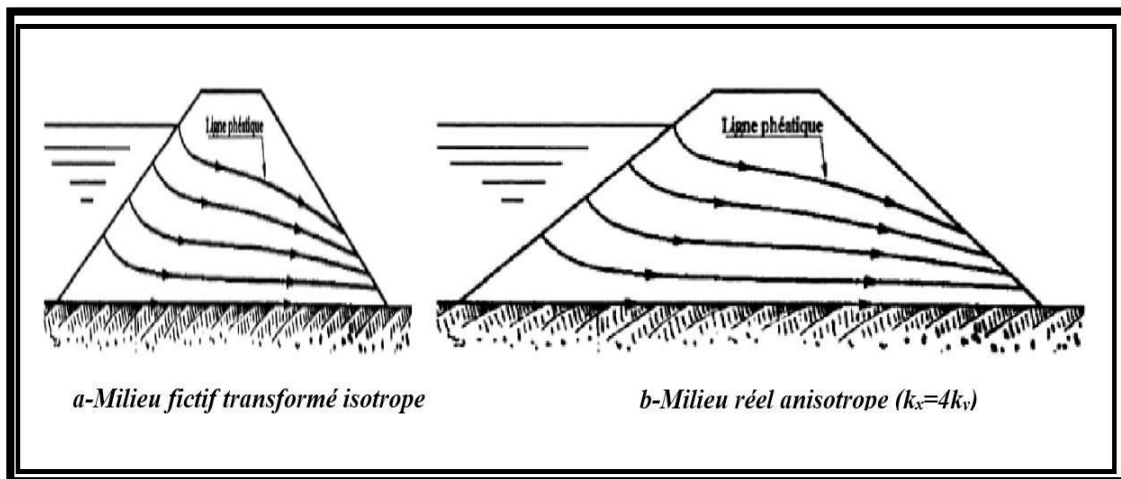


Figure II. 7 Réseau d'écoulement dans un sol anisotrope [14]

Une fois que le réseau d'écoulement a été tracé dans le milieu isotrope, il est possible de revenir au milieu réel en utilisant une transformation inverse. Cela permet d'obtenir un réseau d'écoulement constitué de courbes qui ne sont plus orthogonales. Pour calculer le débit dans ce réseau, il est nécessaire d'utiliser la perméabilité fictive et l'expression du coefficient de perméabilité fictive  $K$  est obtenue en appliquant la conservation du débit : le débit dans le milieu fictif est égal au débit dans le milieu réel.

La perméabilité du noyau étant souvent très inférieure à celle des recharges, le rapport des perméabilités peut atteindre 1000. Par conséquent, on peut supposer que les pertes de charge sont concentrées dans le noyau, tandis que la recharge amont est une zone équipotentielle et que la hauteur d'eau dans la recharge aval est négligeable. Toutefois, si le rapport des perméabilités est nettement inférieur à 1000, la hauteur d'eau dans la recharge aval peut ne plus être négligeable et la surface libre y est d'autant plus haute que ce rapport est plus faible.

Pour annuler la pression interstitielle dans la recharge aval, on peut interposer un drain entre celle-ci et le noyau.

### II.4.3 Etude des pressions interstitielles

La pression interstitielle  $P$  est la pression présente en un point du sol saturé et peut être exprimée par la formule générale suivante :

$P = \rho g (h - Z)$  où  $h$  représente la charge hydraulique et  $Z$  la cote d'un point du barrage par rapport à un repère.

Pour des raisons de stabilité, il est important de minimiser cette pression. Si elle est trop élevée, cela signifie qu'il y a beaucoup d'eau et il y a un risque de phénomène de renard. C'est pourquoi il est nécessaire de bien drainer le corps de barrage, en particulier dans la partie aval qui est généralement soumise à de forts gradients hydrauliques.

### II.4.4 Débit de fuite par infiltration à travers le corps de la digue [14]

Le débit d'infiltration est le volume d'eau qui s'infiltré à travers le corps de la digue par unité de temps et par unité de longueur. Il est estimé à partir de la loi de Darcy qui décrit le flux d'eau à travers un milieu poreux. La formule générale est :

$q = K * I * S$  où :

- $q$  : débit d'infiltration en  $m^3/s/m$
- $K$  : coefficient de perméabilité du milieu en  $m/s$
- $I$  : gradient hydraulique adimensionnel, sans unité
- $S$  : section mouillée sur le parement aval du barrage en  $m^2$

Dans le cas d'un écoulement parabolique, on peut estimer la section  $S$  en utilisant l'ordonnée  $y$  de la ligne phréatique et le gradient hydraulique  $I$  en utilisant la pente  $dy/dx$ . Ainsi, on peut calculer  $q$  comme suit :  $q = K \cdot y \cdot \frac{dy}{dx}$

Ce qui peut être exprimé sous la forme :

$$q = K \cdot Y_0, \quad q = K (\sqrt{(H^2 + d^2 - d)})$$

Le débit total à travers la digue est donc :  $Q = q \cdot \frac{2}{3} \cdot L$

### II.4.5 Mécanisme de l'érosion interne et développement de phénomène renard

L'érosion interne est un processus qui peut avoir lieu dans les sols ou les roches, et qui se produit lorsque les particules sont éloignées du noyau ou de la fondation en empruntant des

voies de migration préférentielles. [14]Ce processus peut être favorisé par différents facteurs, tels que ceux mentionnés dans votre question :

- La présence d'un chemin d'infiltration et d'une source d'eau : lorsque de l'eau s'infiltré dans le sol ou la roche, elle peut emporter avec elle des particules de sol ou de roche, en créant un chemin de migration pour ces particules.
- L'existence de matériaux érosifs à l'intérieur de ce chemin et transportables par le flux d'infiltration : si le chemin d'infiltration contient des particules de sol ou de roche qui sont facilement transportables par l'eau, cela peut favoriser l'érosion interne en permettant à ces particules de migrer plus facilement.
- L'absence de protection qui pourrait retenir ces particules : si le sol ou la roche environnants ne sont pas suffisamment solides pour retenir les particules en place, cela peut favoriser l'érosion interne en permettant aux particules de migrer librement.
  - **La phase d'initiation** se produit lorsque des particules commencent à se détacher, ce qui peut être causé par plusieurs facteurs. Dans le cas d'un barrage, ces facteurs peuvent inclure une concentration de fuites dans les fissures existantes ou causées par des conditions météorologiques telles que la dessiccation ou le gel, une concentration de fuites dans les voies interconnectées formées par des matériaux de faible compaction ou de taille grossière dans la zone perméable, un détachement de particules du sol en présence d'infiltration sur une surface libre non protégée par des filtres, ou un phénomène appelé "suffusion", qui correspond à une érosion sélective des particules fines de la matrice de particules grossières.
  - **La phase de continuité de l'érosion** dépend de la présence de filtres et de zones de drainage dans le barrage, construits selon les critères de construction des filtres. La présence de ces filtres et de ces drains permet de retenir les particules déplacées pendant la décharge sans favoriser l'accumulation d'un excès de pression dans les pores. Cependant, dans de nombreux vieux barrages, ces filtres et drains sont absents, ce qui contribue à la progression de l'érosion.
  - **La phase de progression de l'érosion** est caractérisée par une migration progressive des particules détachées vers le côté amont du barrage, transportées par le flux d'infiltration. Cela peut entraîner la formation de renards, l'augmentation du suintement et de la pression des pores dans la partie aval du barrage.



- **La phase de développement de brèches** est causée par la circulation des eaux du réservoir en amont, et indique que le processus d'érosion interne est déjà bien avancé. Les eaux circulant dans le barrage suivent une trajectoire aléatoire et peuvent créer des brèches dans la structure, augmentant le risque de rupture du barrage.

## II.5 Méthodes d'analyse d'instabilité :

### II.5.1 Notion de facteur de sécurité :

Le facteur de sécurité  $F_s$  peut être exprimé mathématiquement comme le rapport entre les forces résistantes et les forces motrices, Il représente la capacité du sol à résister aux forces qui peuvent provoquer la rupture d'un talus ou d'une pente. Plus le facteur de sécurité est élevé, plus le talus est stable et résistant aux glissements. [16]

En d'autres termes, le facteur de sécurité permet de quantifier la marge de sécurité vis-à-vis de la rupture, en comparant les forces qui poussent le talus à glisser avec les forces qui le retiennent en place.

$$F_s = \frac{rf}{rd}$$

**Avec :**

- $F_s$  : Facteur de sécurité ;
- $rf$  : Résistance disponible (résistance moyenne au cisaillement) ;
- $rd$  : Résistance mobilisée (contrainte de cisaillement moyenne développée le long de la surface de rupture potentielle) ;

La résistance moyenne au cisaillement ( $rf$ ) est égale à la cohésion non drainée pour les sols fins à court terme, dans le cas général, elle dépend de la contrainte effective normale  $\sigma'n$  selon le critère de rupture de Mohr-Coulomb :

$$rf = C' + \sigma'n \cdot \tan \varphi' \dots\dots\dots \text{(II.1).}$$

La résistance mobilisée ( $rd$ ) est la contrainte de cisaillement qui prévôt un angle,

$$\alpha = \frac{\pi}{2} + \frac{\varphi_d}{2}$$

Pour un état de contrainte donnée telle que :

$$rd = Cd + \sigma'n \cdot \tan \varphi_d \dots\dots\dots \text{(II.2).}$$

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,

est défini par des rapports de forces, de contraintes, de moments ou même en termes de hauteurs de talus.

- **Le choix des facteurs de sécurité :**

Il faut, pour obtenir un coefficient de sécurité FS supérieur à 1, que les forces "résistantes" au niveau de la surface de rupture potentielle soient supérieures aux forces motrices. Dans ces conditions, l'équilibre est généralement supposé assuré. Cependant, du fait de l'incertitude liée aux paramètres de calcul, notamment mécaniques, cette valeur limite pourrait très bien ne pas être suffisante dans certains cas.

Le tableau suivant nous donne les valeurs de FS en fonction de la taille de la structure et des conditions particulières qui l'entourent :

**Tableau II.1 : Valeurs de FS en fonction de l'importance de l'ouvrage [18]**

<b>Fs</b>	<b>Etat de l'ouvrage</b>
<1	Danger
1.0 - 1.25	Sécurité contestable
1.25-1.4	Sécurité satisfaisante pour les ouvrages peu importants Sécurité contestable pour les barrages, ou bien quand la rupture serait catastrophique
>1.4	satisfaisante pour les barrages

L'expérience a montré que, les talus restent toujours stables si  $Fs > 1.5$ , le glissement est pratiquement inévitable si  $Fs < 1$  [18]. Pour certains sites particuliers (carrières, mines à ciel ouvert, talus en cours de construction), le coefficient de sécurité peut être réduit à 1.2 ou 1.3. Dans ce cas la surveillance et l'auscultation des terrains sont généralement renforcées.

### **II.5.2 Méthode de l'équilibre limite :**

La méthode de l'équilibre limite est largement utilisée en géotechnique pour l'analyse de la stabilité des talus. Elle consiste à étudier l'équilibre d'un corps rigide constitué par le talus et une surface de glissement, en prenant en compte les forces motrices et résistantes agissant sur la surface de rupture. Cette méthode permet de calculer le coefficient de sécurité, qui est le rapport entre la résistance disponible et les contraintes de cisaillement.

Parmi les méthodes d'équilibre limite, il y a la méthode globale, qui prend en compte l'équilibre global du corps rigide. Cette méthode est utilisée pour les cas simples de talus homogènes et sans présence de nappe, en considérant la totalité de la "masse libre" et en faisant des hypothèses sur la distribution des contraintes normales le long de la surface de rupture. Les méthodes de Biarez, Caquot et Taylor en font partie, mais elles ne peuvent être utilisées qu'avec des surfaces de rupture circulaires ou des lignes droites simples.

Il y a également la méthode des tranches, qui décompose le talus en tranches et étudie d'abord l'équilibre individuel de chaque tranche avant de globaliser le résultat. Cette méthode prend en compte la non-homogénéité du talus et permet d'analyser la stabilité de talus plus complexes, en utilisant certaines hypothèses simplificatrices. Les méthodes de Fellenius, Bishop et Jambu font partie de cette catégorie.

Les hypothèses basiques de la méthode de l'équilibre limite sont [16]:

- La rupture se fait dans un plan (analyse bidimensionnelle) ;
- Les forces extérieures d'entraînement sont le poids et les surcharges ;
- Le problème est statique ;
- Les lois de la mécanique des milieux continus s'appliquent au sol ;
- Le sol est rigide, et c'est pourquoi la courbe de rupture est de "bonne allure" ;
- La relation de Terzaghi est vraie :  $\sigma' = \sigma - u$ ;
- La loi de Coulomb s'applique à la rupture :  $r = C' + (\sigma - u)\varphi$  ;
- Un coefficient de sécurité est défini comme le rapport de la résistance au cisaillement maximale du sol à celle de contrainte mobilisable ;
- Le coefficient de sécurité  $F_s$  est constant le long de la courbe de rupture ;

### II.5.3 Méthodes des tranches :

La méthode des tranches consiste donc à découper la surface de glissement en une série de tranches verticales de largeur constante et d'épaisseur infinitésimale, chacune étant supposée homogène et isotrope. Pour chaque tranche, on considère les forces motrices et les forces résistantes, et on calcule les moments de forces en prenant en compte les angles de frottement et la cohésion. On obtient ainsi une équation d'équilibre pour chaque tranche. En sommant les moments de forces de toutes les tranches, on peut déterminer le coefficient de sécurité global de la structure. Cette méthode permet d'obtenir une estimation relativement précise du coefficient de sécurité d'une structure complexe telle qu'une digue ou un talus.

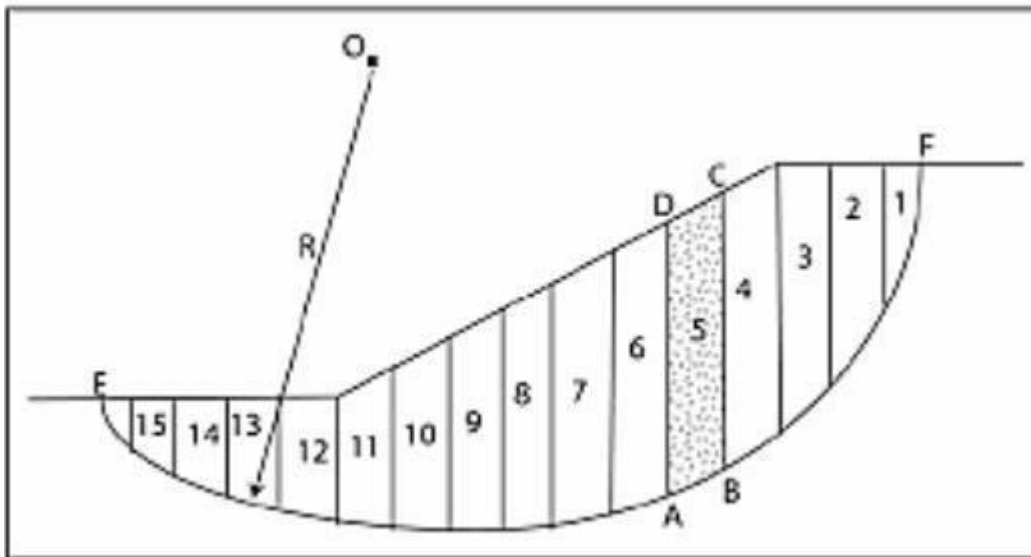


Figure II.8 La masse du talus découpé en tranches [17]

### II.5.3.1 Méthodes de Fellenius :

Pour appliquer la méthode de Fellenius, on suppose que la surface de glissement est circulaire et que la rupture se produit autour de son centre de gravité. On découpe alors le sol en tranches verticales de largeur constante, et pour chaque tranche, on calcule les forces motrices et résistantes. Les forces inter-tranches sont supposées égales ou opposées, ce qui permet de simplifier les calculs. On applique ensuite l'équilibre des moments pour chaque tranche, en prenant en compte les angles de frottement et la cohésion du sol. On obtient ainsi une série d'équations d'équilibre pour chaque tranche, et en sommant ces équations, on peut déterminer le coefficient de sécurité global de la structure. Cette méthode est relativement simple à mettre en œuvre, mais elle ne prend pas en compte les forces de cisaillement inter-tranches, ce qui peut conduire à des résultats imprécis dans certains cas.

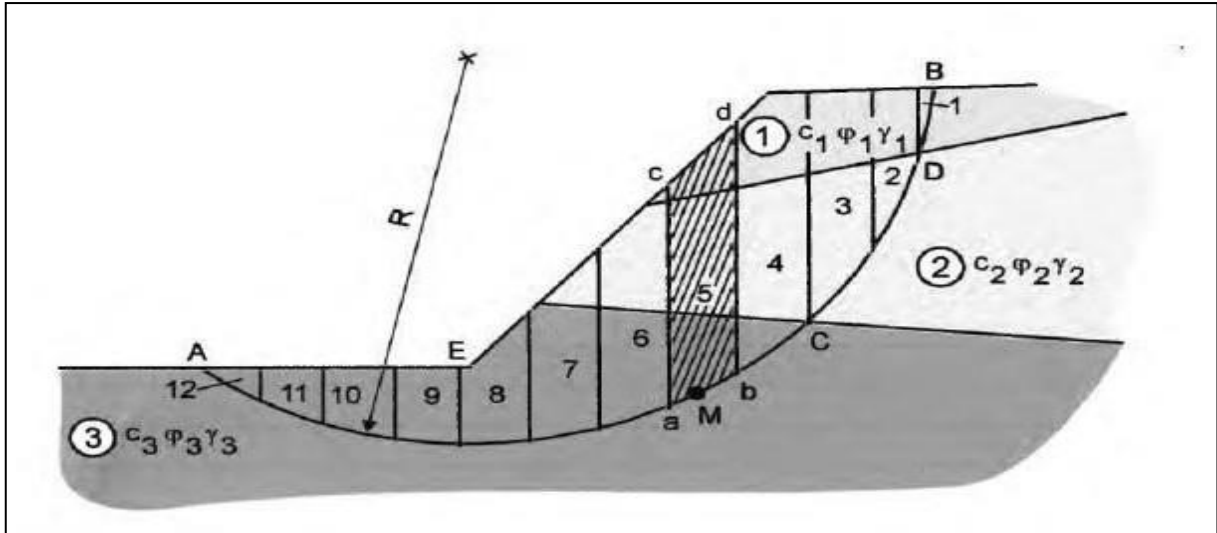


Figure II.9 La masse du talus découpé en tranches méthode de Fellenius [14]

On trace sur une coupe transversale du barrage plusieurs cercles de glissement et on cherche le cercle critique, c'est-à-dire celui qui présente le coefficient de sécurité le plus faible.

Pour chaque tranche verticale (n), on détermine les forces illustrées à la figure II.9

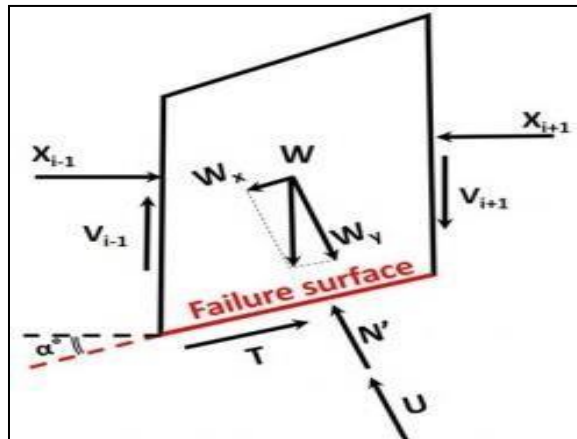


Figure II.10 Forces agissantes sur une tranche (n) [6]

Pour chaque tranche verticale, on détermine alors les efforts suivants :

- $W_i$  : le poids de la tranche ;
- la composante motrice du poids soit  $T_i = W_i \sin(\alpha_i)$  où  $\alpha_i$  est l'inclinaison locale de la surface de rupture avec l'horizontale ;
- la composante normale du poids sur la surface de glissement soit  $N_i = W_i \cos(\alpha_i)$

- la résultante des forces de pressions interstitielles sur la base de la tranche. Si  $U_i$  est la pression et  $b_i$  l'épaisseur horizontale de la tranche, la résultante des forces de pression est :

$$U_i \cdot b_i = P_i = \cos(\alpha)$$

- la contribution de la cohésion  $C_i$  à l'effort résistant :

$$C \cdot b_i = c_i = \cos(\alpha)$$

- la contribution du terme de frottement à la résistance :  $(N_i - P_i) \tan \varphi$

Finalement, le coefficient de sécurité pour un cercle de glissement donné vaut :

$$F_s = \frac{\sum \frac{c_i \cdot b_i}{\cos(\alpha_i)} + (N_i - P_i) \tan \varphi}{\sum W_i \cdot \sin \alpha_i}$$

### II.5.3.2 Méthode de Bishop simplifiée (1955) :

Bishop a supposé que le facteur de sécurité est constant le long de la surface de glissement, avec,  $P_i - P_{i+1} = \Delta P$  et  $S_i - S_{i+1} = \Delta S$ .

Dans cette méthode, on suppose également que la surface de rupture potentielle est circulaire ; les forces sur les côtés de la tranche sont supposés être horizontale (c'est-à-dire, il n'y a pas de cisaillement entre les tranches). Les forces sont résumées dans le sens vertical pour satisfaire l'équilibre dans cette direction et d'obtenir une expression de la contrainte normale sur la base de chaque tranche. Se référant à la tranche illustrée dans la figure suivante, et on détermine les forces verticales, l'équation de l'équilibre suivante peut être écrite pour les forces dans le sens vertical :

$$W_i + \Delta P = N \cdot \cos \alpha_i + T \cdot \sin \alpha_i$$

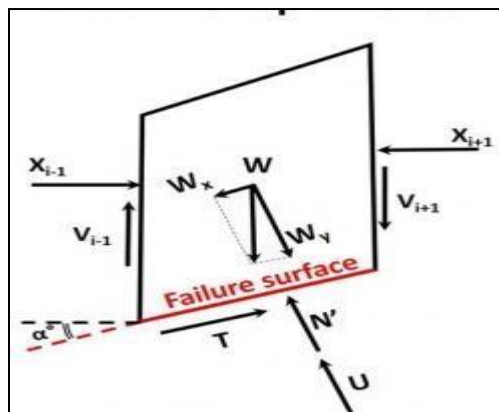


Figure II.11 Forces agissant sur une seule tranche [5]

$$Fs = (\sigma' \cos^2 \phi + C' \sin^2 \phi) / (W \cos^2 \phi \sin^2 \alpha + N \sin^2 \alpha)$$

où  $\sigma'$  est la contrainte effective horizontale,  $\phi$  est l'angle de frottement interne du sol,  $C'$  est la cohésion apparente du sol,  $W$  est le poids total de la tranche considérée,  $N$  est la composante normale de la force inter-tranches,  $\alpha$  est l'angle que fait la surface de glissement avec l'horizontale.

Il convient de noter que cette formule ne prend pas en compte l'effet de l'eau sur la stabilité du talus, et qu'elle est limitée aux surfaces de glissement circulaires, 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 [17]

## II.6 Les conditions d'analyse :

Il est nécessaire de contrôler la stabilité des talus d'un barrage en remblai à plusieurs étapes de sa construction et de son utilisation. En règle générale, il existe trois types de situations pour lesquelles la stabilité d'un barrage en remblai doit être vérifiée [18]:

### II.6.1 Fin de construction

Lors de la fin de la construction d'un barrage en remblai, il est crucial de réaliser une analyse de la stabilité pour s'assurer qu'il peut atteindre sa hauteur finale sans se rompre. Bien qu'il n'y ait pas encore de pression exercée par la retenue d'eau, les pressions interstitielles sont élevées car les surpressions dues à la construction ne se sont pas encore dissipées. La résistance dépend de la contrainte effective  $\sigma'$ , et elle diminue progressivement avec l'augmentation de la pression interstitielle  $u$  ( $\sigma' = \sigma - u$ ), pouvant entraîner un glissement du talus en raison de la diminution de la résistance au cisaillement. Il est donc recommandé d'analyser la stabilité du talus en aval. Pour les matériaux fins argileux, la méthode la plus simple pour calculer la stabilité est à court terme, avant la consolidation, en utilisant les valeurs de  $C_{uu}$  et  $\phi_{uu}$  correspondant au taux de compactage du remblai. Pour les barrages de grande hauteur, les valeurs de  $C_{uu}$  et  $\phi_{uu}$  ne sont pas constantes, mais la courbe intrinsèque indiquée sur la figure II.5 montre que la branche inclinée ( $\phi_{uu} > 0$ ) correspond à un sol compacté non saturé, où les contraintes interstitielles  $u$  sont élevées, et où le sol se trouve souvent sous forme de bulles dissoutes dans la phase aqueuse. En revanche, le sol compacté argileux est saturé, et  $C_{uu} \neq 0$  et  $\phi_{uu} = 0$  à la limite.

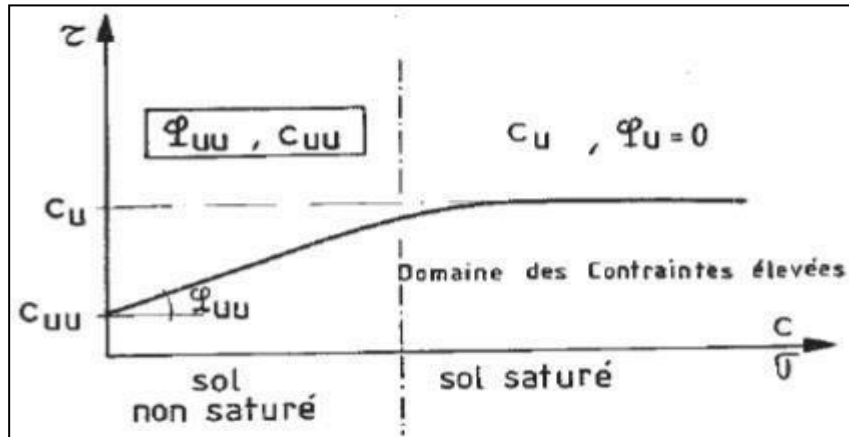


Figure II.12 Critère de rupture en conditions non drainées [17]

### II.6.2 Période d'exploitation

Pendant la période d'exploitation d'un barrage en remblai, l'analyse de la stabilité est nécessaire pour vérifier sa capacité à rester stable après le remplissage du réservoir et l'établissement du réseau d'écoulement à travers le barrage. Dans le secteur amont du barrage, la pression interstitielle réduit la contrainte effective  $\sigma'$  et, par conséquent, la résistance, mais cette diminution est compensée par la pression exercée par le réservoir, qui s'oppose au glissement du talus amont. Dans le secteur aval du barrage, l'écoulement dans le massif peut créer une surface de suintement sur le talus, où la poussée d'écoulement sur les grains solides peut le déstabiliser. Pour cette raison, un drainage du talus aval est généralement prévu. Lorsque la retenue est pleine, l'écoulement est défavorable à la stabilité du talus aval. Les caractéristiques mécaniques du sol  $C$  et  $\varphi$ , indépendamment de la perméabilité du matériau de construction, peuvent être obtenues à partir de l'essai de résistance au cisaillement à long terme, surconsolidé, saturé et drainé.

### II.6.3 Vidange rapide :

La condition 'vidange rapide' est rencontrée lorsque le niveau d'eau diminue brusquement au-dessous du niveau normal de la retenue. 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. L'analyse de la stabilité est menée en adoptant la résistance au cisaillement non drainé pour les matériaux peu perméable, et la résistance drainée pour les matériaux qui présentant une perméabilité élevée. On peut



estimer si un matériau a un comportement drainé ou non, en calculant la valeur du facteur temps T, donnée par :

$$T = \frac{Cv.t}{D^2}$$

**Avec :**

- $C_v$  : coefficient de consolidation,
- $t$  : temps de rabattement,
- $D$  : distance de drainage,

La condition de vidange rapide peut être dangereuse pour la stabilité du barrage, en particulier pour le talus amont, qui perd son effet stabilisateur du réservoir et subit une augmentation des pressions interstitielles. L'analyse de la stabilité doit prendre en compte le comportement du matériau du barrage lorsqu'il est soumis à des pressions d'eau non dissipées, en utilisant la résistance au cisaillement non drainé pour les matériaux peu perméables et la résistance drainée pour les matériaux plus perméables. Le facteur temps T peut être utilisé pour estimer si un matériau a un comportement drainé ou non, et si T est supérieur ou égal à 3, le matériau peut être considéré comme drainé. La plupart des matériaux ayant des coefficients de perméabilité supérieurs ou égaux à  $10^{-6}$  peuvent être supposés comme des matériaux à comportement drainé.

## **II.7 Méthodes de calcul de stabilité sous séisme :**

Pour assurer la sécurité sismique des barrages en terre, il est important de considérer les déformations permanentes pendant et après un tremblement de terre, la stabilité des pentes, les mouvements dynamiques de la pente, les pressions interstitielles excessives dans les matériaux de remblai et les risques de liquéfaction du sol au niveau de la fondation. Les principales causes de rupture des barrages en terre pendant un tremblement de terre sont la liquéfaction, les fissures longitudinales ou transversales, les glissements de talus, l'érosion interne ou externe, et la rupture totale. Pour étudier la stabilité sismique des barrages en terre et d'autres structures en sol soumises à des sollicitations sismiques, il existe deux méthodes principales : les méthodes théoriques et les méthodes numériques. Les méthodes de calcul

utilisées pour évaluer la stabilité des ouvrages sous séisme sont pseudo-statiques ou dynamiques. Les méthodes pseudo-statiques sont généralement utilisées pour les petits ouvrages et les tremblements de terre faibles ou modérés, tandis que les méthodes dynamiques sont plus adaptées pour les ouvrages sensibles et les tremblements de terre plus importants, car elles prennent en compte le comportement dynamique des sols.

## II.7.1 Méthodes théoriques :

### II.7.1.1 Méthode pseudo-statique :

Dans les années 1970, la méthode pseudo-statique était couramment utilisée pour l'analyse de la stabilité des barrages en terre face aux séismes. Cette technique consiste à inclure l'effet de la sollicitation sismique dans une analyse de stabilité statique classique, en appliquant une force horizontale statique au centre de gravité de la masse de sol au-dessus de la surface de rupture potentielle envisagée. Cette force est calculée en multipliant le coefficient sismique

$K_s$  par le poids du sol impliqué  $W$ . [18]

L'approche pseudo-statique repose sur la modélisation de la sollicitation sismique par une accélération équivalente qui prend en compte la réaction probable du massif en pente. Cette méthode consiste à représenter les efforts pseudo-statiques par deux coefficients,  $K_h$  et  $K_v$ , qui caractérisent respectivement les composantes horizontales dirigées vers l'aval et les composantes verticales descendantes ou ascendantes des forces appliquées au massif en pente. Ces coefficients permettent d'intégrer l'effet de la sollicitation sismique dans une analyse de stabilité statique conventionnelle, en appliquant une force statique horizontale au centre de gravité de la masse du sol au-dessus de la surface de rupture potentielle considérée.

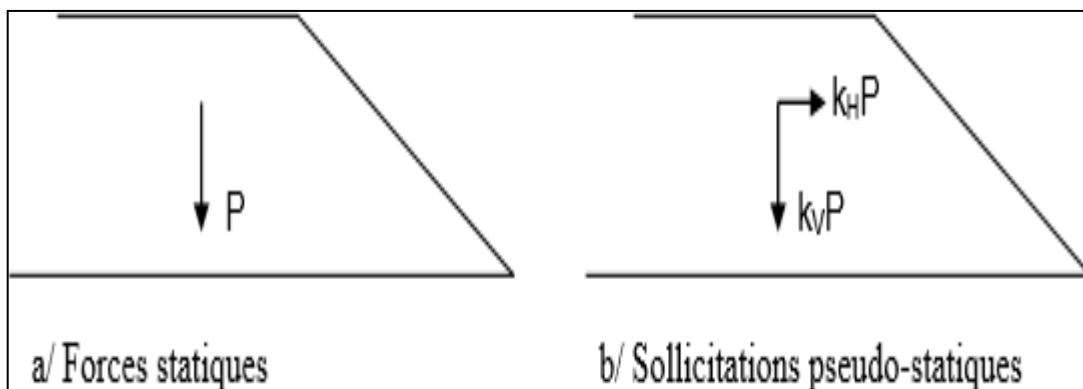


Figure II.13 Forces pseudo-statiques apportées à un talus [18]

### II.7.1.2 Méthode de SEED et MARKDISI (1978) :

La méthode de MAKDISI et SEED est une méthode complémentaire à l'approche de NEWMARK pour l'analyse de la stabilité des barrages en remblai. Cette méthode prend en compte le comportement flexible de la structure et permet d'estimer l'amplification des mouvements du sol jusqu'à la crête du barrage. Elle consiste à estimer l'accélération maximale de la crête  $a_{max}$ , pour un mouvement du sol d'une ampleur donnée, puis à déterminer l'accélération maximale de la zone de glissement potentielle  $k_{max}$ . [5] Pour estimer la valeur de l'accélération limite  $k_y$  de la zone de glissement, la méthode de MAKDISI et SEED utilise le coefficient de l'accélération horizontale moyenne dans une analyse de stabilité de pente conventionnelle qui fournirait un coefficient de sécurité de 1,0. Ce coefficient est défini comme le rapport d'une force horizontale déstabilisante (comme celle pouvant être engendrée par un séisme) au poids de la zone de glissement. Ensuite, le rapport de  $k_y$  à  $k_{max}$  est utilisé pour estimer le déplacement à la crête du barrage. La valeur estimée contient une composante horizontale et verticale.

### II.7.2 Méthodes numériques :

Les méthodes numériques sont des techniques de modélisation qui ont été utilisées pour la première fois par Clough et Chopra en 1966 pour l'analyse dynamique des barrages en terre. Les codes numériques de la dynamique sont généralement classés en deux catégories : a) Les codes en contraintes totales, qui ne tiennent pas compte de la pression interstitielle dans l'analyse et peuvent être divisés en deux grandes catégories [18]:

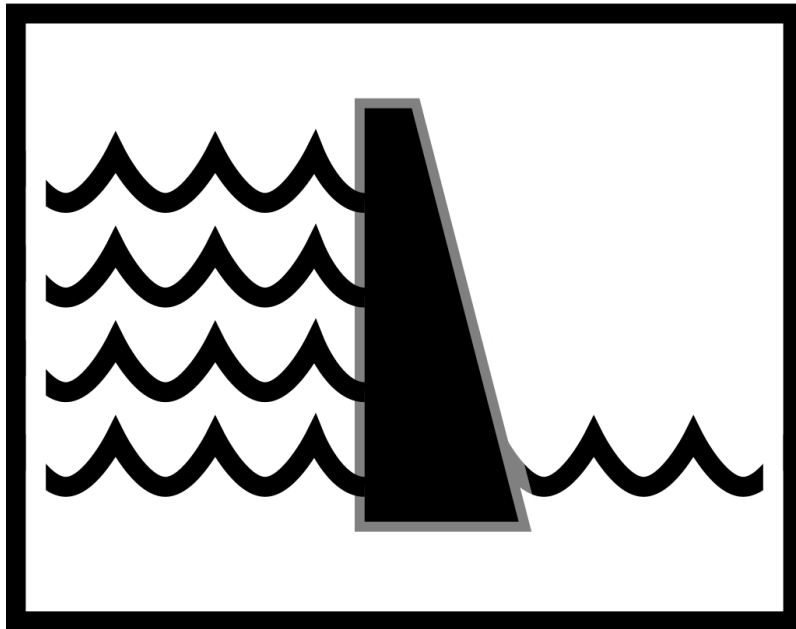
- Les codes basés sur la méthode linéaire équivalente (EQL), qui est une analyse élastique développée pour l'approximation du comportement non linéaire des sols sous l'effet de chargement cyclique. Les codes qui utilisent cette méthode en pratique sont SHAKE, QUAD-4 et FLUSH
- Les codes non linéaires, qui donnent des valeurs de déformation proches de la réalité et sont typiquement utilisés pour l'analyse des barrages en terre, tels que, ANSYS, FLAC, etc.

## **II.8 Conclusion**

L'analyse de la stabilité des talus des barrages en terre est une étape cruciale de leur conception, car une défaillance de la pente peut entraîner des conséquences catastrophiques. Les méthodes analytiques telles que la méthode d'équilibre limite sont largement utilisées pour évaluer la stabilité des pentes. Cependant, pour une analyse plus précise et réaliste, les méthodes de modélisation numérique sont de plus en plus utilisées. Les codes numériques de dynamique permettent de simuler le comportement dynamique de structures composées de sol ou de roches, en utilisant des techniques de modélisation sophistiquées. L'analyse dynamique est particulièrement importante pour les barrages situés dans des zones sismiques ou soumis à des forces dynamiques importantes, telles que les vagues de submersion.

# Chapitre III

## Présentation du Barrage d'étude



### III.1 INTRODUCTION

Le barrage Boukhroufa, anciennement connu sous le nom de barrage Bouhalloufa, fait partie d'un schéma complexe de réservoirs, de transferts d'eau et de stations de pompage. Son objectif principal est d'assurer l'irrigation de la plaine d'El Tarf, une région située dans le nord-est de l'Algérie, près de la côte méditerranéenne, le long de la frontière avec la Tunisie. Le plus important cours d'eau, est l'Oued El Kebir Est, avec les affluents Guergour, Bou Redim, Bou Halloufa et Bou Latane. El Kebir avec l'oued Bou Namoussa, forme ainsi l'oued Mafragh, qui se jette dans la mer.

### III.2 Situation géographique

Le barrage de Boukhroufa ex Bouhaloufa est implanté sur l'oued du même nom, affluent d'El Kebir Est. Il est situé à 5 km de Bouteldja - Wilaya d'El Tarf.

L'accès au site du barrage se fait par une route vers le Sud à partir de la RN 44 à la sortie de Bouteldja. Cet accès est route goudronnée sur une distance de 2 Km, les 3 Km restant sont une piste.

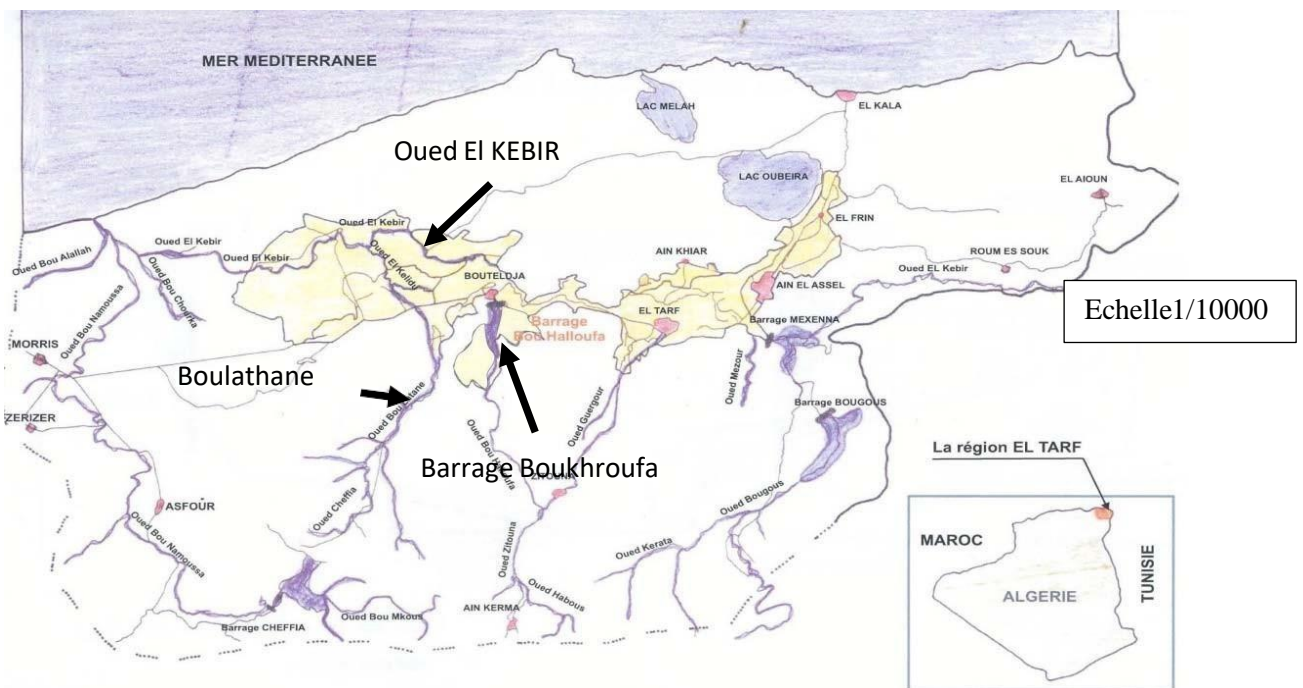


Figure III.1 Plan de situation (barrage Boukhroufa)

### III.3. Etude et reconnaissances

#### III.3.1 Etude topographique

L'étude de la carte topographique à l'échelle 1/25000 a révélé la présence d'un verrou topographique intéressant pour l'implantation du barrage. Un verrou topographique est une caractéristique géographique où une étroite vallée ou une zone de relief élevé crée une opportunité naturelle pour la construction d'un barrage. Cela peut être dû à la présence de montagnes ou de collines qui permettent de retenir l'eau efficacement, cet emplacement a les coordonnées NTU suivantes :

*X : 428 ,4 Km*

*Y : 4066,3 Km*

*Z : 22m*

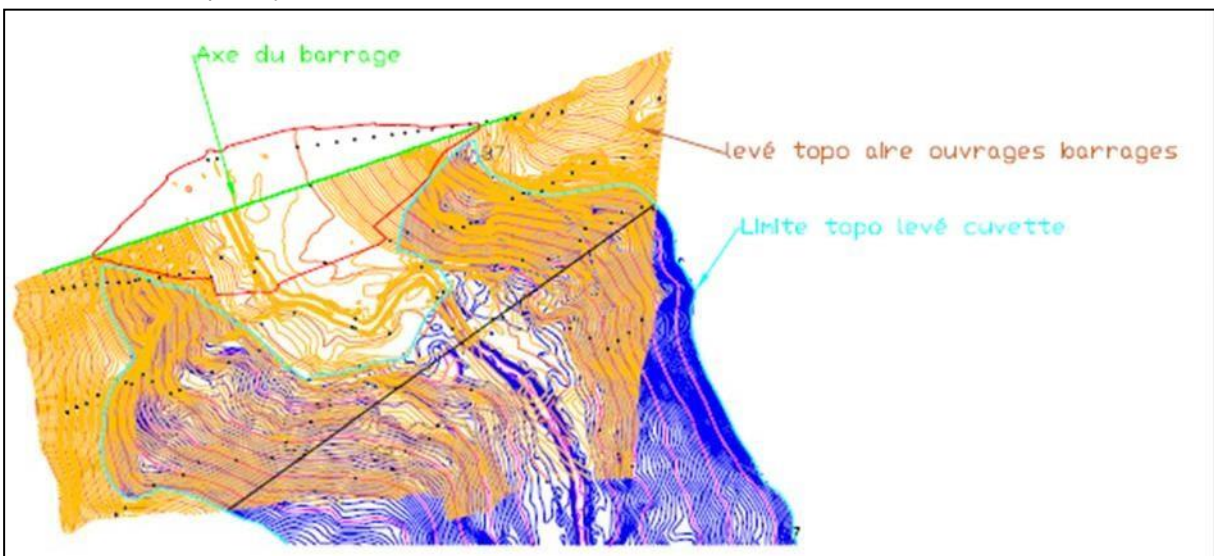


Figure III.2 image topographie du Barrage 1/25000 [19]

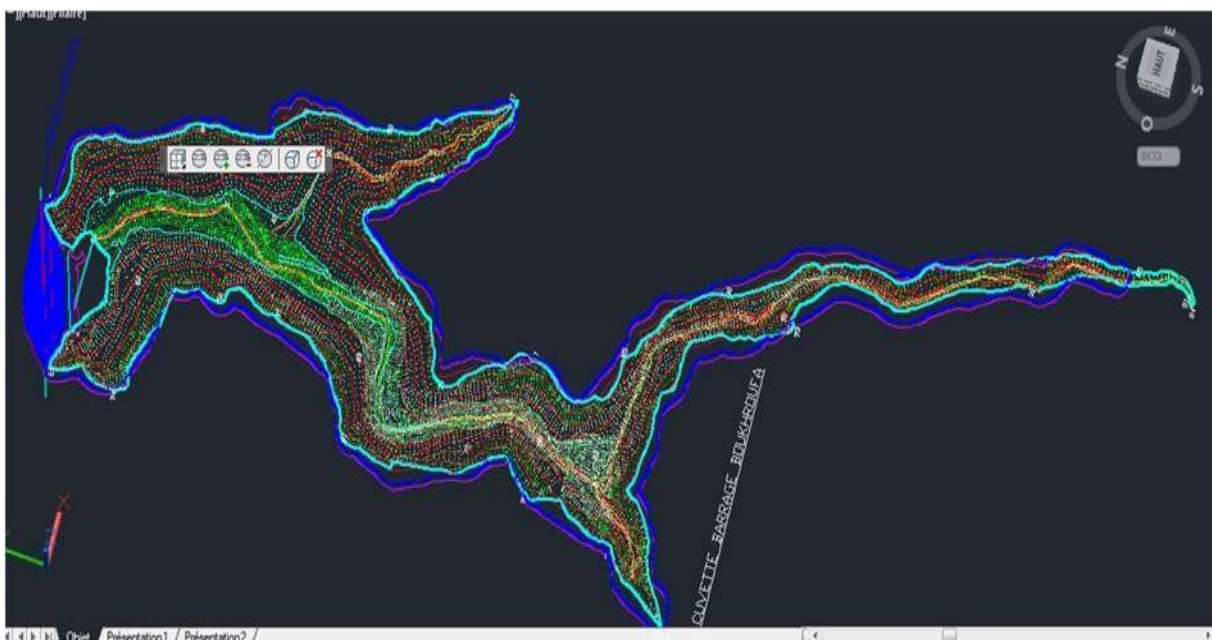


Figure III.3 Topographie de la cuvette 1/25000 [19]

### **III.3.2 Etude Géologique**

Le site du barrage Boukhroufa est situé au milieu de la nappe de Numidie avec les monts de Chafia à l'Ouest et les monts d'El Kala à l'Est, qui forment avec ceux de Guelma un immense « radeau », sur près de 200 km de long.

L'axe du barrage Boukhroufa est situé au dernier étranglement de la vallée de l'oued Boukhroufa, où la largeur de la plaine atteint environ 210 mètres le long de cet axe spécifique. Les deux rives de la vallée ont des pentes relativement faibles. L'appui droit présente une pente de 9°, tandis que l'appui gauche a une pente d'environ 15°.

La vallée de l'oued Boukhroufa, dans la zone de l'axe du barrage, est constituée d'alternances d'argilites et de grès appartenant à la série numidienne. Ces formations géologiques ont été charriées et se trouvent au-dessus des terrains du crétacé.

Les argilites sont des roches sédimentaires composées principalement d'argile, tandis que les grès sont des roches constituées de grains de sable consolidés. La série numidienne est une formation géologique caractéristique de la région et est souvent présente dans les régions montagneuses du nord de l'Algérie.

#### **III.3.2.1. Les argilites de Numidie :**

Les argilites se rencontrent en couche plus épaisses que les grès atteignant un maximum de 13m d'épaisseur sur les appuis et 22 m de profondeur en plaine. Ce sont des argilites gréseuses et occasionnellement des argilites marneuses de couleurs verdâtres, brunâtres, grisâtre au noirâtre.

Au niveau du site elles présentent de nombreux miroirs de failles. Le plus souvent des altérations argilo-sableuses remplissent les fractures. Les traces d'oxyde, marquant la zone de circulation d'eau, sont généralement quasi-inexistantes en profondeur.

#### **III.3.2.2. Les grés de Numidie :**

Les grés sont la seule roche qui affleure sur les deux appuis, en amont de l'axe du barrage.

Elle a une couleur variable de blanchâtre à grisâtre et occasionnellement jaunâtre et rougeâtre dans les zones d'altération. sa granulométrie varie de fine à grosse, les épaisseurs atteignent un maximum de 14 m sur les appuis et de 11 m dans la plaine.

Les grés présentent sur l'ensemble du site une intense fracturation ainsi qu'une importante altération.



### **III.3.2.3. Les colluvions :**

Ces colluvions, provenant de l'altération superficielle des grès et des argilites, sont constituées par des fragments allant jusqu' à une échelle décimétrique dans une matrice argilo-sableuse.

Leurs épaisseurs sont de 1 à 1,5 m sur les parties hautes des versants et 2 à 2,5 m sur les parties basses à la limite de la plaine . Des blocs de grès éboulés, de taille métrique, s'y trouvent également disséminés. Des blocs de grès de taille variable sont accumulés au pied du talus des affleurements rocheux.

### **III.3.2.4. Les alluvions :**

Les dépôts alluvionnaires, appartenant au lit actuel et à la basse terrasse de l'oued boukhroufa, sont représentés par trois horizons.

- horizon supérieur, de maximum 7,20 m d'épaisseur. constitué d'argile et limon.
- horizon médian, de maximum 7,30 - 7,50 m d'épaisseur, constitué de sable argileux et argile sableuse.
- horizon inférieur, d'une épaisseur maximale de 9,40 m, constitué d'alluvions grossières composées de graviers, cailloux et blocs et d'une matrice sableuse.

Une lentille d'argile sableuse grisâtre, de forte plasticité existe en profondeur, ayant une épaisseur maximale de 3,80 m intercalée entre les alluvions sableuses et les alluvions grossières.

### **III.3.2.5. La géologie de la cuvette :**

Le projet de régénération du barrage de Boukhroufa vise à créer une retenue d'eau avec un plan d'eau à la cote 75,5, d'une longueur d'environ 7,5 kilomètres, offrant une capacité d'environ 102,5 millions de mètres cubes ( $\text{hm}^3$ ). Le lac ainsi formé aura une superficie de 440 hectares et n'inondera qu'une station pluviométrique désactivée et une route en terre menant à la ville de ZITOUNA en amont du réservoir. La cuvette où se situe le barrage est principalement recouverte d'une végétation dense. Dans la zone de la cuvette, la roche mère est constituée d'alternances d'argilites et de grès appartenant à la série numidienne. Généralement, le massif rocheux est recouvert d'une mince couche de colluvions sur les versants et de dépôts alluvionnaires dans la vallée.

## **III.3.3 Caractéristiques Hydrologique**

L'étude hydrologique menée pour la réalisation d'un ouvrage hydrotechnique met en évidence l'importance des paramètres hydrologiques de l'oued. Ces paramètres comprennent les débits des crues et les apports du bassin versant, à la fois liquides et solides. Ces données sont essentielles pour dimensionner les ouvrages qui seront intégrés dans l'aménagement.

L'objectif de cette étude est de déterminer les caractéristiques hydrologiques essentielles nécessaires à la future étude hydrotechnique de la retenue collinaire sur l'oued. Ces caractéristiques essentielles comprennent :

- Les caractéristiques physiques et hydrographiques.
- Les précipitations.
- Les apports liquides.
- Les crues et leurs caractéristiques.
- Les Apports solides.

**Tableau III .1 : Caractéristiques hydrologique[19]**

<i>Bassin versant</i>	<i>176,5 km<sup>2</sup></i>
<i>Périmètre bassin versant</i>	<i>103.7 Km</i>
<i>Apport annuel</i>	<i>30,5hm<sup>3</sup></i>
<i>Crue de projet (T=1000)</i>	<i>470m<sup>3</sup>/s</i>
<i>Lame d'eau écoulée</i>	<i>17mm</i>
<i>Capacité de la retenue</i>	<i>12500000m<sup>3</sup></i>
<i>Tranche morte</i>	<i>83370m<sup>3</sup></i>
<i>Altitudes Hmax</i>	<i>1041m</i>
<i>Altitudes Hmin</i>	<i>22.5 m</i>
<i>Largeur de déversoir</i>	<i>43m</i>
<i>Charge déversante</i>	<i>3 m</i>

### III.3.4 Caractéristiques Géotechniques

Avant la construction du remblai d'argile, une étude approfondie de la zone d'emprunt a été réalisée, comprenant des prélèvements d'échantillons pour des analyses en laboratoire. Les échantillons ont été prélevés dans 15 puits afin de procéder à des analyses granulométriques, des essais des limites d'Atterberg et des essais de compactage de Proctor. Les résultats de ces essais ont révélé que l'argile présente les caractéristiques suivantes :

1. Argile limoneuse : L'analyse granulométrique a montré que l'argile est composée principalement de fines particules, avec une proportion significative de limon. Cette composition confère à l'argile une texture lisse et cohésive.
2. Plasticité moyenne : Les essais des limites d'Atterberg ont indiqué que l'argile présente une plasticité moyenne. Cela signifie qu'elle est capable de subir une certaine déformation sans se rompre, ce qui facilite le processus de compactage.
3. Teneur en eau optimale : Les essais de compactage de Proctor ont permis de déterminer la teneur en eau naturelle de l'argile, qui se situe près de l'optimum Proctor. Cela signifie que la teneur en eau

actuelle de l'argile est proche de celle qui permet d'atteindre la densité maximale lors du compactage. En conclusion, le matériau du remblai est une argile limoneuse de plasticité moyenne, présentant une cohésion et une capacité de déformation adéquates. Sa teneur en eau naturelle proche de l'optimum Proctor facilite le processus de compactage et permet d'obtenir une densité maximale efficace lors de la construction du remblai (Tableau III.2).

**Tableau III .2 : Caractéristiques géotechnique [20]**

<b><u>Essais caractéristiques</u></b>	
<i>Teneur en eau</i>	20%
<i>Poids spécifique</i>	2.60
<i>Limite de liquidité</i>	50%
<i>Limite de plasticité 20%</i>	
<b><u>Analyse granulométrique</u></b>	
<i>Fraction d'argile</i>	45%
<i>Fraction de limon</i>	30%
<i>Fraction de sable</i>	13%
<i>Fraction de gravier</i>	2.5%
<b><u>Oedomètre</u></b>	
<i>Indice des vides initial</i>	0.484
Coefficient de compressibilité	$7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{KN}$
Coefficient de consolidation (Cv)	11 m <sup>2</sup> /année
<b><u>Essais triaxial</u></b>	
Coefficient de perméabilité	$4 \times 10^{-10} \text{ m/s}$
Angle de frottement effectif	25°
Cohésion effective	16 KN/ m

### III.4 Un aperçu complet des travaux

#### III.4.1 L'aménagement

Le projet de construction du barrage de Boukhroufa fait partie de l'aménagement hydraulique de la wilaya d'El Tarf. Son objectif principal est de régulariser environ 73,84 millions de mètres cubes d'eau par an, provenant des apports naturels de l'oued ainsi que des volumes transférés depuis d'autres barrages, et d'emmagasiner environ 125 millions de mètres cubes d'eau. La réalisation de ce barrage permettra la création de périmètres irrigués dans la wilaya d'El Tarf.

En plus de la régulation des ressources en eau, le barrage jouera un rôle crucial dans la protection contre les inondations qui menacent les habitants et les infrastructures en aval. Il contribuera également au développement économique et social de la région en créant des emplois pendant la phase de construction et lors de l'exploitation des périmètres irrigués.

Les travaux de construction du barrage de Boukhroufa engloberont les différentes étapes nécessaires, telles que l'étude préliminaire, la conception détaillée, la construction des infrastructures, l'installation des équipements hydromécaniques, ainsi que les aménagements nécessaires pour les périmètres irrigués.

L'aménagement hydraulique de la wilaya d'El Tarf est composé de deux (02) transferts : Ouest et Est à savoir:

- Transfert Est transfert des eaux à partir du barrage Bounamoussa vers le barrage de Boulatane.
- Transfert Ouest : Transfert des eaux à partir de la prise d'eau de l'Oued El Kébir via le barrage Boukhroufa vers le barrage de Boulatane soit un apport annuel d'environ  $42,5 \text{ Hm}^3$  à raison de  $5,7 \text{ m}^3/\text{s}$

### III.4.2 Données générales sur l'aménagement

L'aménagement du barrage de Boukhroufa est implanté sur l'Oued du même nom, affluent d'El Kebir Est. Il est situé à 5 Km au sud de la ville de Bouteldja (Wilaya El Tarf).

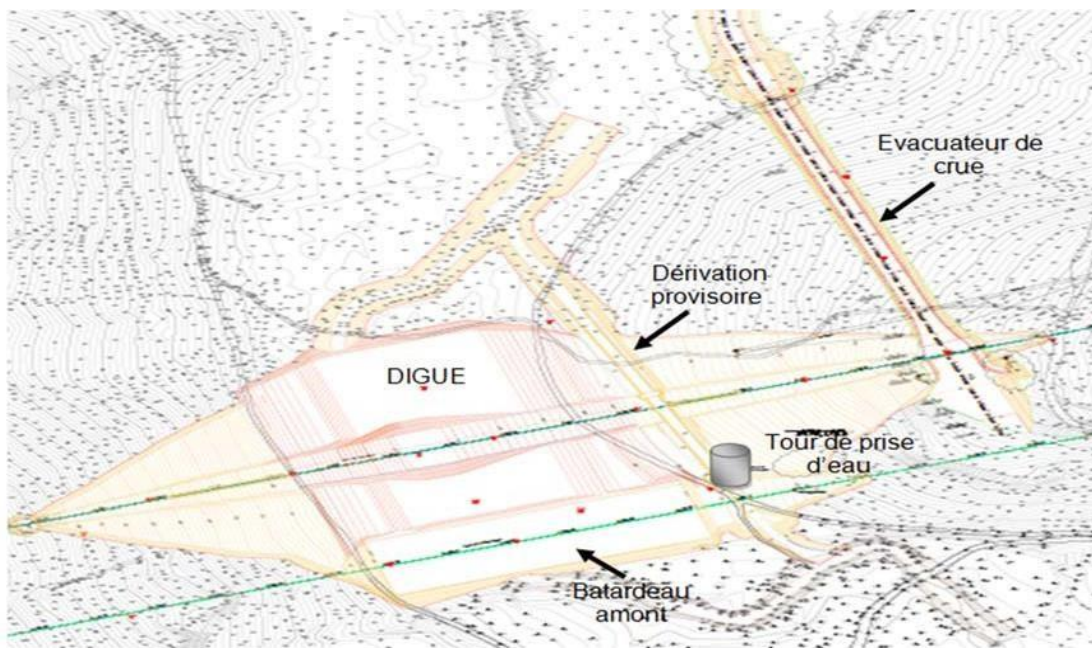


Figure III.4 L'aménagement du barrage Boukhroufa [20]

La réalisation du barrage, d'une hauteur approximative de 87,00 m, doit permettre la création d'une retenue de 125 millions de  $\text{m}^3$ . La réserve d'eau est destinée aux besoins de l'irrigation. Le volume nécessaire annuel est réparti comme suit :

- Périmètre de Bounamoussa  $23.10^6 \text{ m}^3$ .
- Périmètre d'El Tarf  $48.10^6 \text{ m}^3$

### III.4.3 Le choix de type du barrage en terre

Les barrages en terre sont les plus répandus dans notre pays, et de plus ils sont les ouvrages les plus résistants aux séismes, la connaissance des conditions géologiques, topographiques, hydrauliques et économiques importante pour le choix de la digue. Opter pour une digue zonée en matériaux alluvionnaires avec noyau central en fonction de la disponibilité et du type de matériaux locaux recensés lors des campagnes géologiques.

### III.4.4 Description des ouvrages à réaliser pour l'aménagement du barrage :

- Construction d'une digue, comprenant les structures nécessaires telles que le batardeau et la galerie de dérivation.
- Mise en place de galeries d'injection et d'accès.
- Transformation de la galerie de dérivation en galerie de vidange de fond et d'amenée.
- Installation d'une tour de prise d'eau.
- Mise en œuvre d'un système d'évacuation des crues."

#### III.4.4.1 La digue :

Les caractéristiques géologiques et topographiques du site permettent la construction d'un barrage en terre, sans restrictions quant au type de matériau disponible à proximité. Les conclusions tirées des études et recherches de matériaux de construction sont les suivantes :

- Les réserves de matériaux en enrochement sont d'environ 12.106 m<sup>3</sup>.
- Les réserves d'argile sont pratiquement illimitées dans la zone 5 à la base du barrage.
- Le volume de matériaux alluvionnaires disponibles dépasse les 6.106 m<sup>3</sup>

En se basant sur ces conclusions et leur analyse, on a opté pour un type de digue zonée. L'étanchéité de l'ouvrage est assurée par un noyau central en argile, tandis que la stabilité de la digue est garantie par les recharges amont et aval en alluvions.

Concernant les versants, la base de la digue repose sur le substratum. Au centre, dans la terrasse de l'Oued, la fondation atteint la côte 20, qui est composée d'une couche de graviers.

#### - **Caractéristiques de la digue :**

- Niveau de crête : 87,0 m.
- Largeur de la crête : 10,0 m.
- Longueur de la crête : 883,0 m.
- Hauteur maximale : 87,0 m.

#### - **Parement amont**

- Pente du talus en alluvion : 1/2,5.

- Pente du talus en enrochement : 1/2,5.
- Couche de protection /rip/rap/ : 1,0 m.
- **Parment aval**
  - Pente du talus en alluvions : 1/1,8.
  - Pente du talus en enrochement : 1/1,8.
  - Bermes aux côtes : 70,00 m, 55,00 m.
  - Une berme de 40 m avec une largeur de 5,00 m.

La crête de la digue a une largeur de 10,00 m et est située à une altitude de 87,0 m, soit 5,00 m au-dessus du niveau de retenue normal (82,00) et environ 2,0 m au-dessus du niveau de crue de projet. Une route se trouve sur la crête, avec une chaussée large de 6,0 m, réservée aux déplacements liés à l'exploitation de l'aménagement.

La galerie d'injection est prévue le long de l'axe de la digue, sur toute sa longueur. Elle est positionnée au fond d'une para fouille en argile et assure le contact avec le substratum dans la partie centrale.

Le volume total des remblais à mettre en œuvre est d'environ 3,47 millions de m<sup>3</sup>, répartis comme suit :

- Alluvions sélectionnées : 3 332 000 m<sup>3</sup>
- Alluvions tout venant : 195 000 m<sup>3</sup>
- Enrochements pour les parements : 83 000 m<sup>3</sup>
- Argile : 840 000 m<sup>3</sup>
- Filtre, drains, transitions : 60 000 m<sup>3</sup>

#### **III.4.4.2 Le voile d'étanchéité**

Le voile d'étanchéité est construit en utilisant des forages et des injections de peau depuis la galerie d'injections, conformément aux spécifications suivantes :

- Les forages sont positionnés en une seule ligne.
- L'espacement final entre les forages est de 2,5 mètres.
- La profondeur du voile varie en fonction de l'emplacement : 45 mètres sur la rive droite, 50 mètres sur la rive gauche et 25 mètres dans le lit de l'oued.
- La quantité totale d'injections de peau nécessaire pour former le voile est de 20 000 millilitres.
- Les injections sont réalisées depuis la galerie d'injection avec des forages d'une profondeur de 45 mètres.
- Le voile d'étanchéité est prolongé sur la rive droite à travers l'évacuateur de crue et sur la rive gauche sur une distance supplémentaire de 50 mètres.

#### **III.4.4.3 La galerie d'injection :**

Située sous la digue, est un ouvrage en béton armé construit à l'air libre. Sa section est en forme de fer à cheval, avec une largeur de 3,50 mètres et une hauteur de 2,5 mètres. La galerie est divisée en trois tronçons par rapport à sa fondation :

- Sur la rive gauche, la galerie est disposée dans une tranchée excavée dans la roche.
- Dans la zone centrale, la galerie repose sur le substratum et la section se trouve dans une tranchée excavée dans la couche de graviers.
- Sur la rive droite, tout comme sur la rive gauche, la galerie est entièrement disposée dans le substratum.

Le profil en long de la galerie présente des pentes étudiées pour permettre la circulation pendant son exploitation, ainsi qu'un écoulement gravitaire des eaux drainées vers un puits et une station de pompage. Pendant l'exploitation, la galerie sera utilisée pour effectuer des inspections afin d'évaluer les infiltrations d'eau et, si nécessaire, pour effectuer des réparations sur le voile d'étanchéité en cas de fuites importantes.

#### **III.4.4.4 Puits et galeries d'accès :**

Pour accéder à la galerie d'injection, il y aura deux puits d'accès situés sur la rive gauche et la rive droite. Un troisième accès sera assuré par la galerie de dérivation et de vidange, en aval.

Les sorties à l'air libre de ces puits et galeries seront situées sur les plateformes d'accès. Elles seront équipées de portails métalliques ajourés dotés de fermetures de sécurité efficaces.

Les sections des puits et des galeries d'accès auront la même largeur que celle de la galerie d'injection. Cependant, la galerie de dérivation, qui contiendra la conduite de vidange, conservera sa section en forme de fer à cheval.

#### **III.4.4.5 Galerie de dérivation (provisoire)**

La galerie de dérivation proposée a une section en forme de fer à cheval, avec un rayon de 2 mètres pour la partie supérieure et une hauteur totale de 4 mètres. Sa longueur est de 270 mètres, avec une pente longitudinale de 1%. La partie inférieure de la galerie, séparée de la partie demi-circulaire par un plancher, est compartimentée en deux sections de 3 mètres par 3 mètres.

L'ouvrage est implanté dans le pied du versant naturel droit et est conçu pour permettre l'évacuation de la crue de chantier, avec un débit de 260 mètres cubes par seconde, avant le processus de laminage.

La section de la galerie est en forme de fer à cheval, avec une section mesurant (B\*H) égale à 10,5 mètres sur 9,75 mètres.

Les couches traversées dans la fondation sont essentiellement composées de grès alternant avec des argilites. Les travaux seront exécutés à ciel ouvert. Le débouché amont de la galerie se trouve sur une vaste plateforme où l'ouvrage d'entrée est aménagé.

En aval, la galerie de dérivation provisoire débouche sur un bassin d'amortissement. La longueur totale de la galerie est d'environ 270 mètres. La tour de prise d'eau est située sur l'axe de la galerie, à une distance de 40 mètres de l'ouvrage d'entrée.

Dans le stade final des travaux, la galerie de dérivation, à partir de l'emplacement de la tour de prise jusqu'à la sortie, sera transformée en une vidange de fond. Deux conduites en acier de diamètre DN1200 mm seront disposées sur la partie supérieure, au-dessus des deux pertuis de la vidange de fond, pour répondre aux besoins de consommation.



**Figure III.5 dérivation provisoire en cours de construction [20]**

#### **III.4.4.6 Le vidange de fond**

La vidange de fond comprend deux pertuis équipés de deux vannes wagon, avec une surface totale (S) de 2 mètres carrés, installées dans la chambre de vannes située à la base de la tour de prise. Chaque pertuis de vidange est équipé de deux prises : une à la cote de 40,5 mètres, dotée d'une grille, et une autre située plus bas, au niveau du radier de la galerie de dérivation, à la cote de 29,0 mètres.

La chambre des vannes de la vidange de fond et de la tour de prise constituent un ensemble, une structure en béton armé, conçue de manière à permettre également la fonction de dérivation.

Les vannes de la vidange sont des vannes noyées, manœuvrable de la partie haute de la tour de prise, le tronçon aval de la vidange est en pipe de 1600 mm diamètre, comme le tronçon amont.



#### **III.4.4.7 La tour de prise d'eau**

La tour de prise d'eau est située en amont de la galerie et est équipée de vannes de contrôle. Elle est construite à sec et comporte six prises d'eau réparties sur trois niveaux différents. Ces prises d'eau permettent d'acheminer le débit d'eau vers l'aval à travers deux conduites. La tour a une section circulaire avec un diamètre de 10 mètres.

Les prises d'eau sont équipées de grilles amovibles et de vannes de fermeture qui peuvent être actionnées à l'aide de vannes wagon. Les deux pertuis de vidange de la galerie sont également munis de vannes wagon et ont une surface de 2 mètres carrés. Ces vannes sont installées dans la chambre de vannes située à la base de la tour de prise.

Chaque pertuis de vidange de fond comporte deux prises d'eau. Une prise est située à une cote de 40,5 mètres et est équipée d'une grille, tandis que l'autre prise est située au niveau du radier de la galerie de dérivation à une cote de 29,0 mètres.

La chambre des vannes de la vidange de fond et de la tour de prise forment un ensemble en béton armé. Cette structure permet non seulement la fonction de la vidange de fond, mais aussi la fonction de la dérivation de l'eau.

La tour de prise est implantée dans le pied du versant naturel droit et est alignée avec l'axe de la galerie de dérivation. Elle est construite en deux étapes. Dans la première étape, qui se déroule en parallèle avec la construction de la galerie de dérivation, la tour est élevée jusqu'à une hauteur d'environ 12 mètres. Dans la deuxième étape, la construction de la tour est finalisée jusqu'à sa cote finale.

La structure de la tour comprend une fondation de 12 mètres sur 12 mètres sur laquelle repose une structure demi-circulaire en béton armé d'un diamètre de 4 mètres. Pendant son exploitation, la tour est remplie d'eau. Les prises d'eau permettent de prélever l'eau à différents niveaux. De plus, une prise équipée d'une vanne wagon sous carter est prévue à la base de la tour, permettant l'accès de l'eau à une cote de 29,70 mètres.

La partie supérieure de la tour est constituée d'une construction en béton armé qui abrite deux tableaux électriques de 3 tonnes et une grue roulante. L'accès à la tour se fait depuis l'aval et des escaliers ainsi qu'un ascenseur sont prévus pour permettre l'accès vertical.

#### **III.4.4.8 Evacuateur de crue**

L'évacuateur de crue est conçu pour gérer l'évacuation de la crue de projet, qui atteint un débit de 1015 m<sup>3</sup>/s avant d'être régulé. L'évacuateur proposé est un canal avec une entrée frontale de l'eau. Le seuil du déversoir a une longueur de 25 mètres et le niveau de l'eau dans la retenue est de 86 mètres.

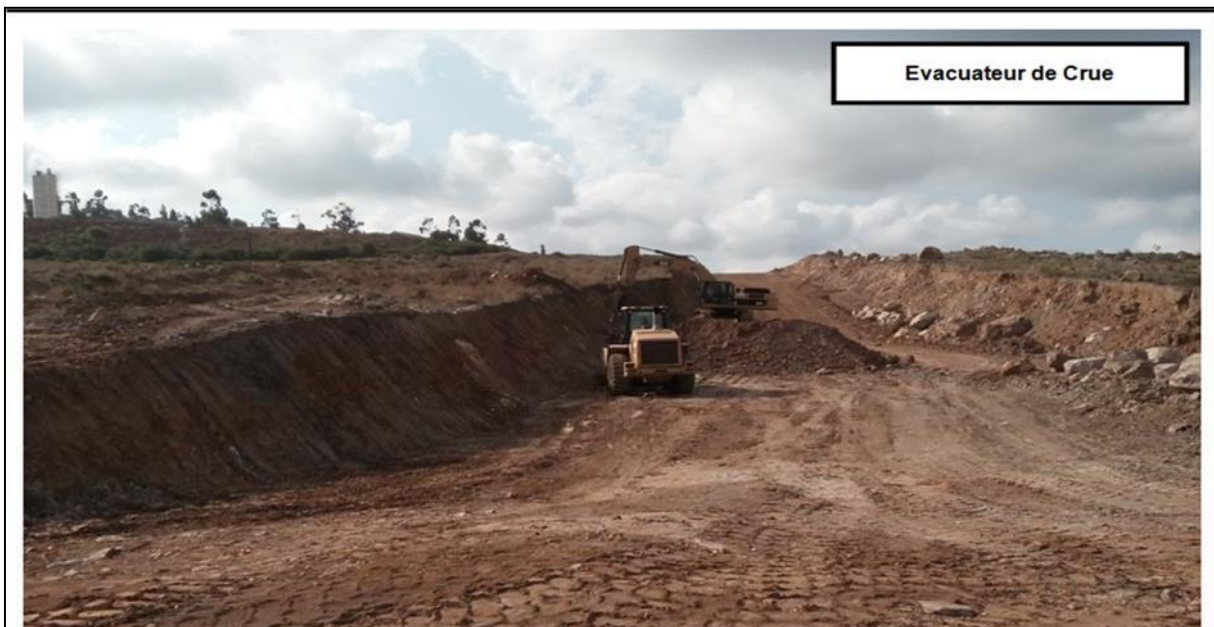
Le canal rapide est construit en béton armé et a une largeur de 12 mètres. En aval, il est suivi d'un dissipateur d'énergie et d'une risberme réalisée en béton et en enrochement. Les débits évacués sont ensuite conduits par un canal en déblai.

L'évacuateur est de type latéral et est construit en tranchée. Il est composé de trois tronçons distincts, reliés par un coursier d'une longueur de 406 mètres. De plus, un bassin d'amortissement est prévu pour absorber l'énergie de l'eau évacuée.

Les principaux éléments de l'évacuateur comprennent :

- 1- Coursier : Le coursier est la partie principale de l'évacuateur, avec une longueur totale de 406 mètres. Il est conçu pour canaliser l'eau de manière efficace et régulière.
- 2- Tronçons : Le coursier est divisé en trois tronçons, ce qui permet une gestion plus précise de l'écoulement de l'eau. Chaque tronçon peut avoir des caractéristiques légèrement différentes en termes de pente ou de structure pour s'adapter aux conditions spécifiques du site.
- 3- Bassin d'amortissement : Le bassin d'amortissement est situé à la fin du coursier et joue un rôle essentiel dans l'atténuation de la vitesse et de l'énergie de l'eau évacuée. Il est conçu pour réduire les risques d'érosion et d'endommagement des infrastructures en aval.

L'ensemble de ces éléments vise à garantir une évacuation sûre et contrôlée de la crue, en minimisant les risques d'inondation et de dommages aux structures environnantes.



**Figure III.6 Evacuateur de crues en cours de construction**

### **III.5 Conclusion**

En conclusion, les formations géologiques de l'assiette du barrage offrent une base solide, et le site est considéré comme stable. Cependant, il est essentiel de prévenir les problèmes d'érosion en protégeant les talus de la digue avec des enrochements. Les matériaux argileux disponibles sont adaptés pour assurer l'étanchéité de la digue et seront exploités de la zone d'emprunt située sur la cuvette du barrage, elle est constituée par des argiles peu plastiques et pratiquement imperméables.

# Chapitre VI

## Application sur le Barrage Boukhroufa



## VI.1 Introduction

Le développement des méthodes de calcul numérique sur ordinateur, telles que la méthode des différences finies et la méthode des éléments finis, a permis d'explorer des solutions beaucoup plus réalistes et générales pour modéliser le comportement des sols. Ces méthodes utilisés, basés sur des approches élastiques non-linéaires ou élastoplastiques, offrent une description assez précise du comportement des sols.

Le but de ce chapitre est de simuler numériquement l'effet des infiltrations sur la stabilité du Barrage en terre en utilisant le logiciel Midas GTS-NX, le choix a été motivé par leur disponibilité leur souplesse, ainsi que par leur performance du fait qu'il se répond bien aux objectifs fixés pour l'analyse de stabilité .

## VI.2 Présentation de logiciel

### VI.2.1 Introduction :

GTS NX est un programme de simulation développé pour l'évaluation de l'interaction sol structure basé sur la méthode des éléments finis. GTS -NX aide les ingénieurs à effectuer une analyse étape par étape de l'excavation, de l'inclinaison, du placement de la structure, du chargement et d'autres facteurs qui affectent directement la conception et la construction. Ce programme prend en charge diverses conditions (caractéristiques du sol, niveau d'eau, etc.) et des méthodologies analytiques pour simuler des phénomènes réels. (Figure VI.1 ) [21].

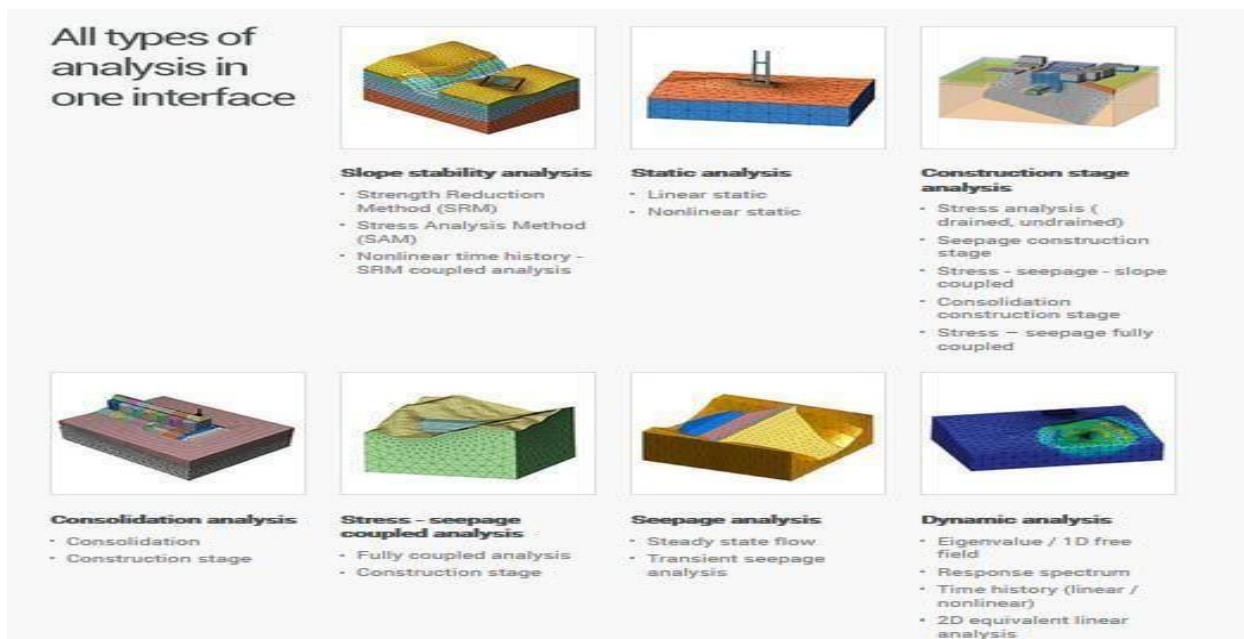
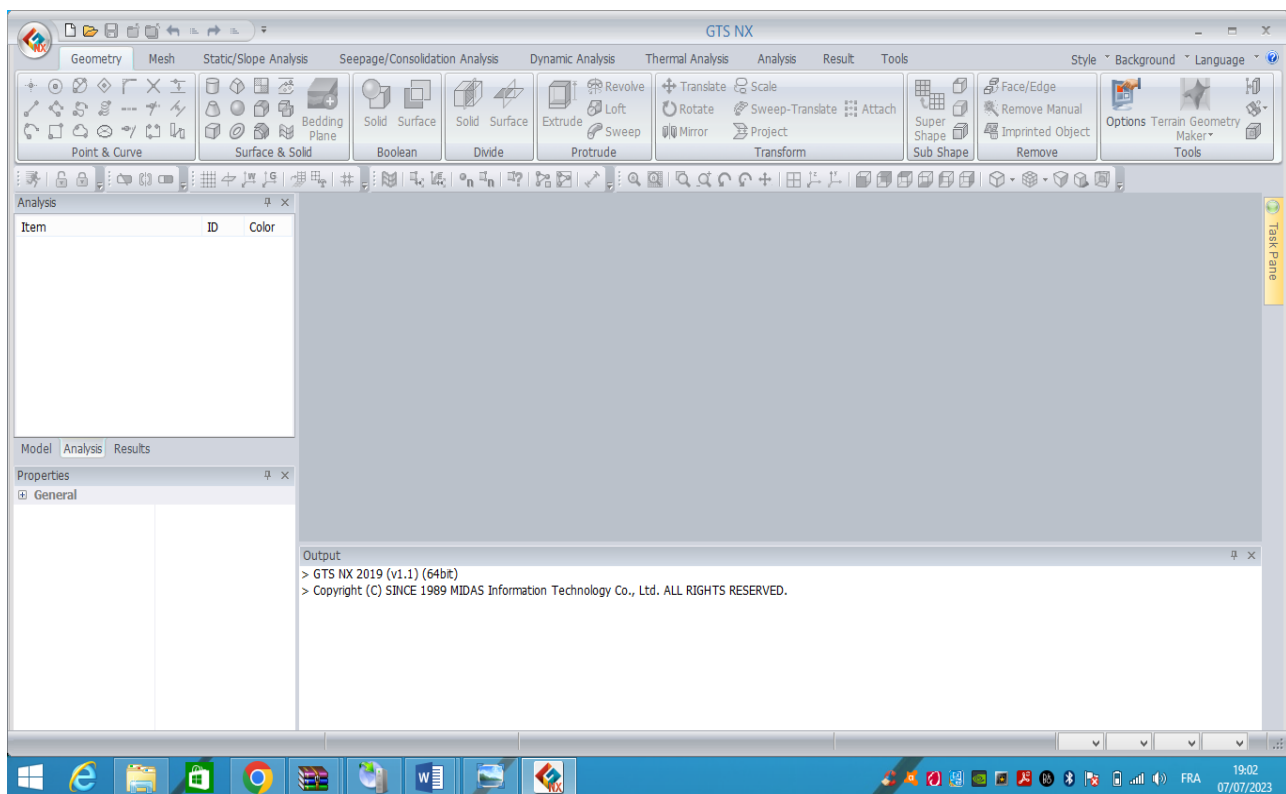


Figure VI.1 Solution pour tous les types d'analyse [21].

Les paramètres pour tous les types de conditions de terrain peuvent être simulés à l'aide de méthodes d'analyse non linéaires (telles que l'analyse statique linéaire / non linéaire, l'analyse dynamique linéaire / non linéaire, l'analyse d'infiltration et de consolidation, l'analyse de sécurité des pentes) et diverses analyses couplées (telles que en tant qu'analyse couplée entre la contrainte de suintement, la pente de contrainte, la pente de suintement et la pente dynamique non linéaire).

L'interface de GTS NX permet une invocation facile des outils de modélisation et d'analyse, créant un environnement de travail intuitif pour les concepteurs généraux et novices. (Figure VI.2) La base de plate-forme de nouvelle génération prise en charge par le système d'exploitation 64 bits et le nouveau moteur graphique permettent les meilleures performances de modélisation pour le calcul d'objets et la génération d'éléments, tandis que le solveur intégré 64 bits réduit considérablement le temps d'analyse pour les grands modèles.

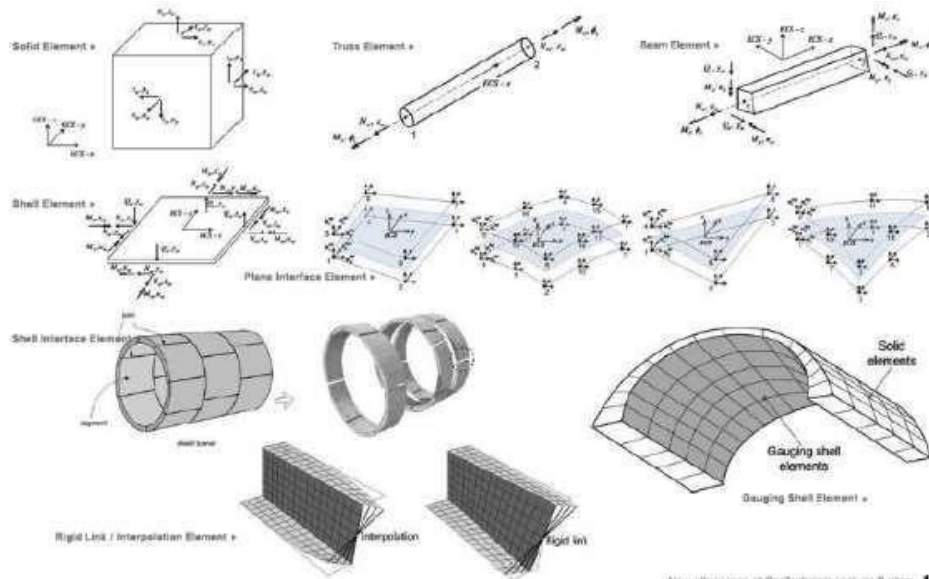


**Figure VI.2 Interface du programme MIDAS GTS NX [21].**

### VI.2.2 Géométrie

Le logiciel MIDAS GTS NX offre une interface permettant de créer la géométrie grâce à une approche DAO (dessin assisté par ordinateur), qui comprend des fonctions de base en 2D et 3D. Ces fonctions comprennent :

- Points et lignes : permettant de dessiner des lignes, des arcs, des rectangles, etc.
- Surfaces et solides : permettant de créer des plaques, des cylindres, des cônes, des sphères, etc.
- Opérations booléennes : permettant de réaliser des opérations de fusion, de découpe et d'intersection entre les objets géométriques.
- Division, extrusion et transformation : permettant de diviser des objets par surface, d'effectuer des extrusions, des révolutions, etc. (Figure VI.3)

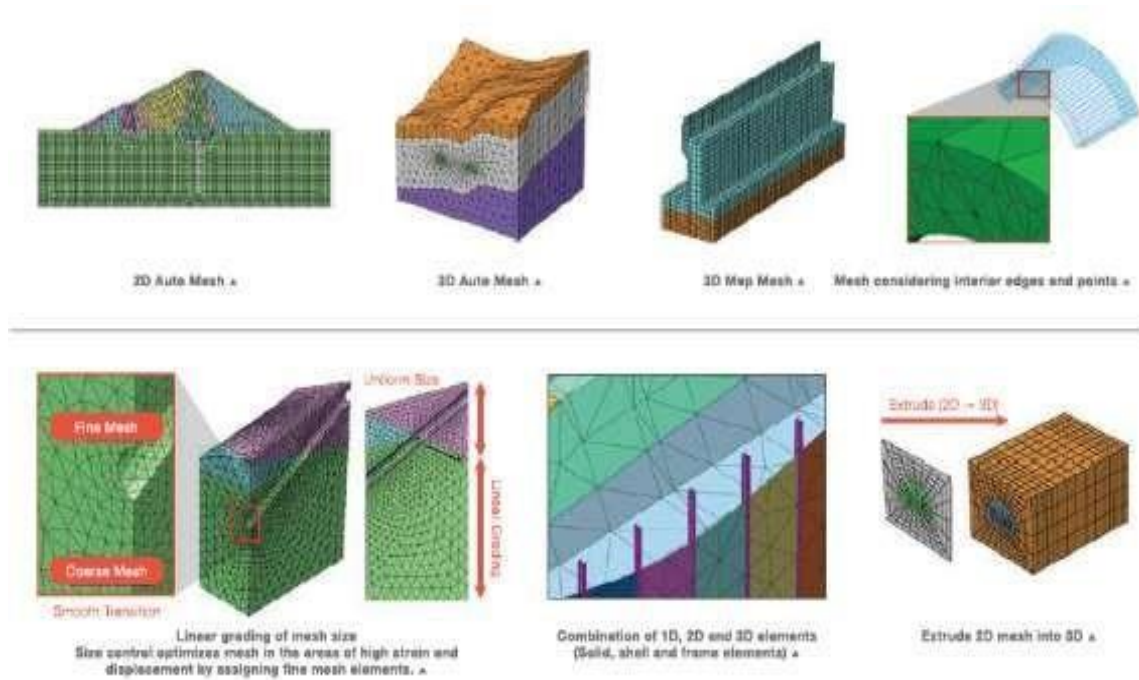


**Figure VI.3 Les Différents types d'éléments MIDAS GTS NX [21].**

### VI.2.3 Génération du Maillage

L'interface interactive du logiciel permet de générer des géométries et des maillages complexes, en fonction du cas à modéliser ( Figure VI.4), Cela comprend les fonctionnalités suivantes :

- Surface Auto-Mesher : permet de générer automatiquement un maillage sur les surfaces de la géométrie.
- Solide Auto-Mesher : permet de générer automatiquement un maillage dans les volumes solides de la géométrie.
- 2D-3D Elements Auto-Génération : permet de générer automatiquement des éléments en 2D et en 3D dans la géométrie.
- Protude Mesh (2D-3D) : permet de générer un maillage en faisant protrusion à partir d'un maillage 2D existant vers une géométrie 3D.



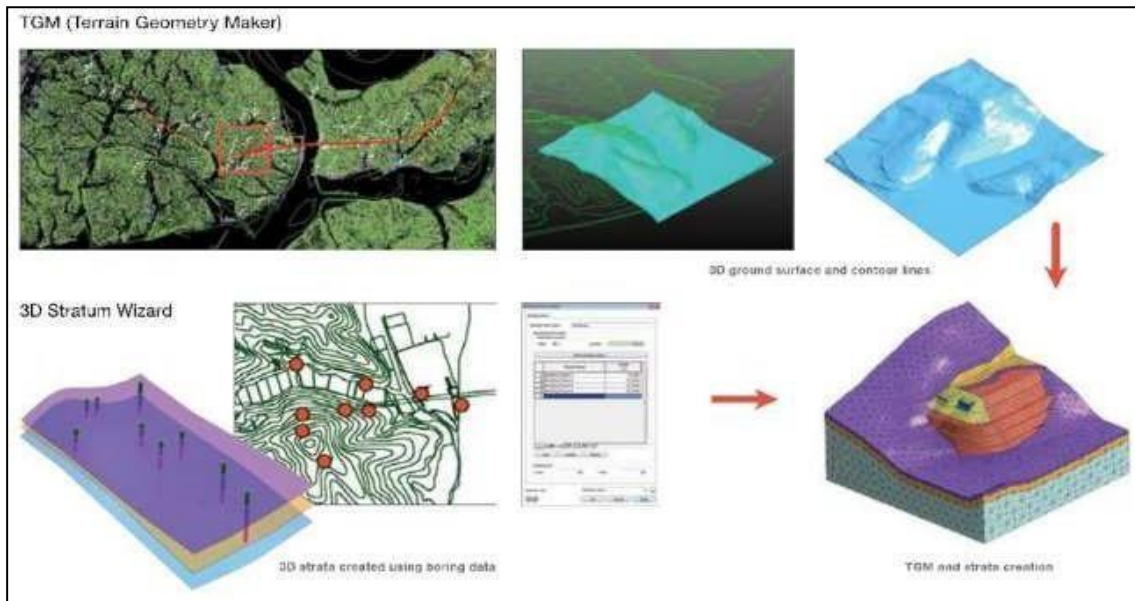
**Figure VI.4 Les types de maillages pour MIDAS GTS NX [21].**

En plus des fonctionnalités de base, MIDAS GTS-NX dispose de deux modules complémentaires pour la modélisation des terrains et la génération de cartes géologiques en 3D en sous-sol. Ces modules sont les suivants :

- TGM (Terrain Geometry Maker) : Ce module permet la génération automatique en 3D des terrains en créant un modèle géométrique à partir des courbes topographiques en 3D. Il facilite ainsi la représentation précise du relief du terrain dans le modèle. (Figure VI.5)
- Bedding Plane Wizard : Ce module permet de générer les couches géologiques à partir des données des puits de sondages. Il aide à créer un modèle géologique réaliste en identifiant et en définissant les différentes couches de roches et leurs propriétés.

Ces deux modules complémentaires permettent d'améliorer la modélisation des terrains et des couches géologiques dans MIDAS GTS NX, offrant ainsi une représentation plus précise et réaliste de la géométrie du modèle, y compris les caractéristiques du terrain et la composition des couches géologiques en sous-sol.





**Figure VI.5 Implémentation des modules TGM dans la création du modèle géométrique [21].**

#### VI.2.4 Modèles et propriétés structurels

GTS NX fournit une multitude de matériaux linéaires/non linéaires pour la simulation des comportements des sols sous différents chargements et niveaux d'eau.

Ces matériaux peuvent être classifiés sous :

- Elastic materials
- Plastic materials
- Undraind materials

#### VI.2.5 Conditions aux limites

GTS NX fournit diverses conditions aux limites pour tous les types d'analyse. Les conditions aux limites (Figure VI.6), essentielles pour l'analyse peuvent être définies automatiquement. En définissant la surface du niveau d'eau, la pression interstitielle de l'eau peut être prise en compte dans l'analyse des contraintes. Les niveaux d'eau en fonction du temps peuvent être définis pour simuler un abaissement rapide ainsi qu'une élévation progressive du niveau d'eau due aux précipitations.

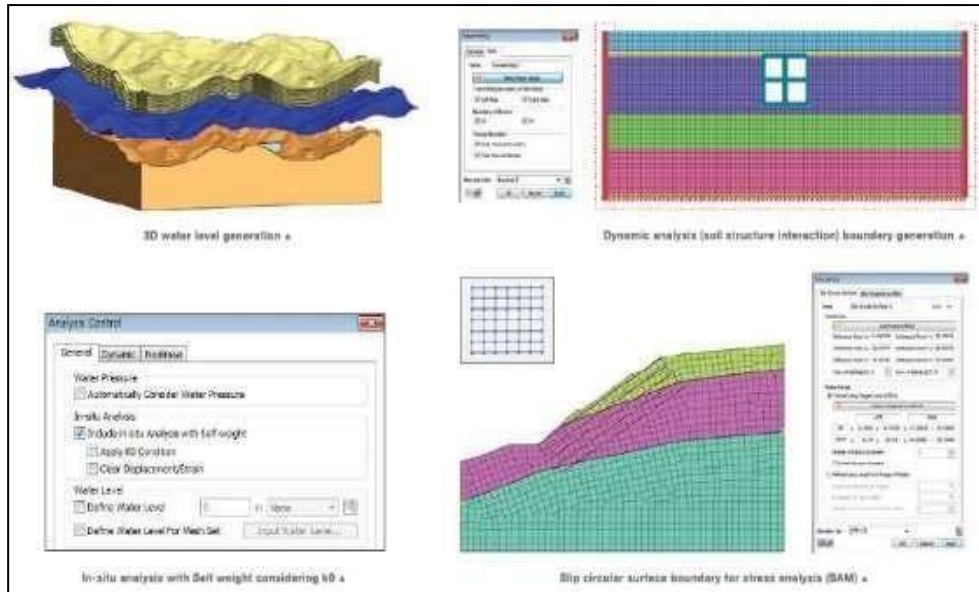


Figure VI.6 Conditions aux limites dans MIDAS GTS NX [21].

### VI.2.6 Résultats et outils d'analyses

Grâce à son moteur de traitement graphique avancé, GTS NX fournit une variété de méthodes de sortie permettant aux utilisateurs de visualiser et d'extraire leurs résultats d'analyse (figure VI.7). Les nombreuses options de sortie présentent les résultats sous une forme élégante et compréhensible.

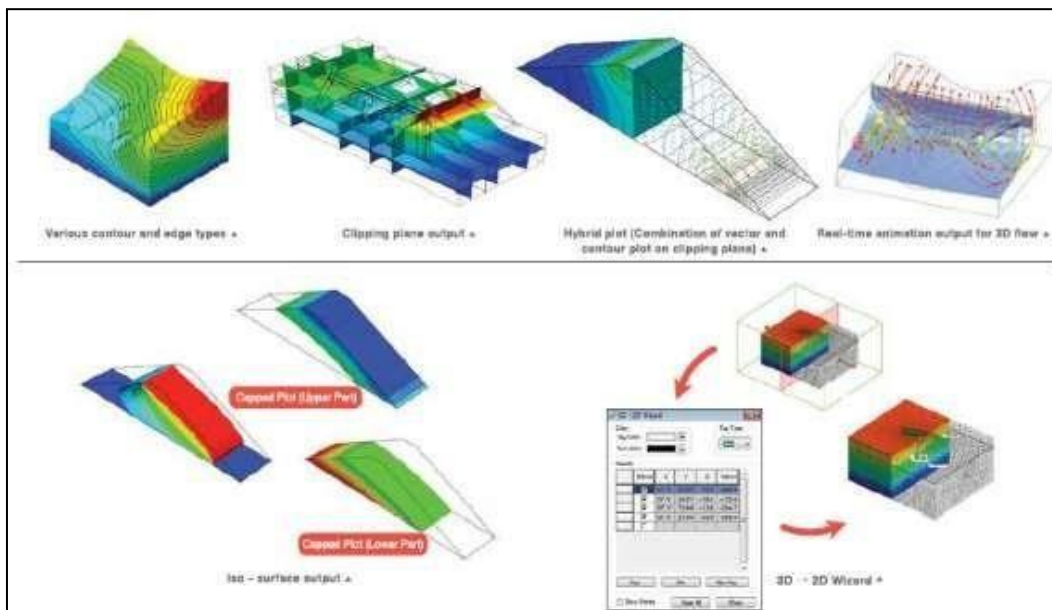


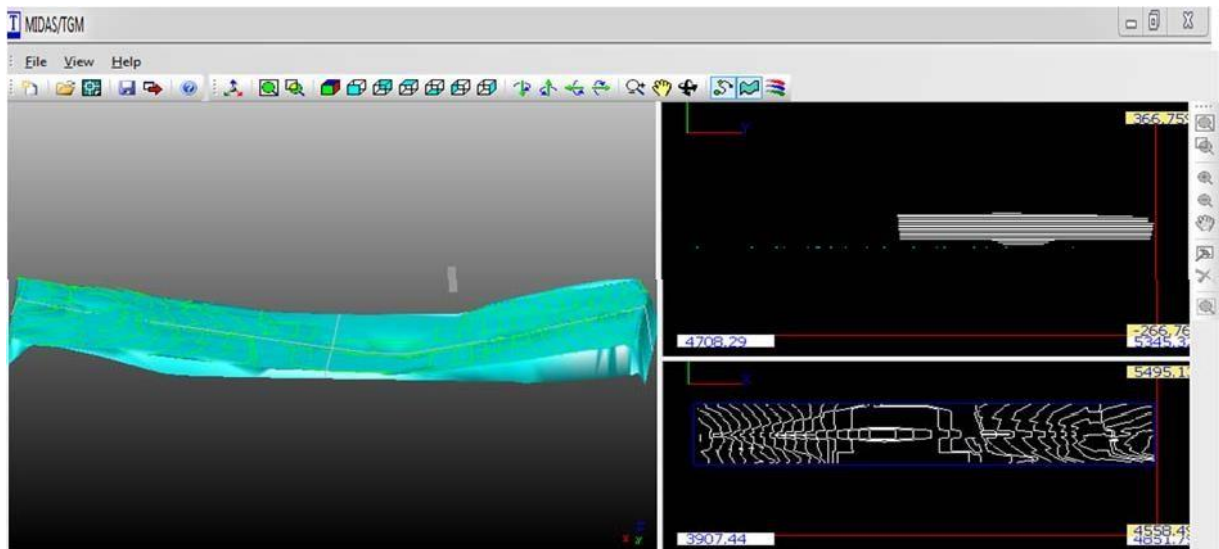
Figure VI.7 Exploitation des résultats [21].

## VI.3 Application sur le barrage

### VI.3.1 La géométrie

Dans un premier temps, nous effectuons la projection des différentes courbes de niveau sur Autocad afin de modéliser le terrain naturel sur lequel se situe le barrage étudié, à savoir le barrage de Boukhroufa. Une fois la partie Autocad est finalisée, nous pouvons passer à l'utilisation du module TGM (Terrain Geometry Maker) qui va analyser ces courbes et générer une surface représentant le terrain naturel. Cette surface est créée en connectant les points de chaque courbe de niveau et en les interpolant pour obtenir une représentation 3D continue du relief du terrain. (Figure VI.8)

Une fois la surface générée, elle peut être utilisée comme base pour la modélisation ultérieure du barrage de Boukhroufa dans MIDAS GTS NX. La surface du terrain naturel sera importante pour évaluer les contraintes, les déformations et les interactions entre le barrage et le sol environnant lors de l'analyse de la stabilité et du comportement du barrage

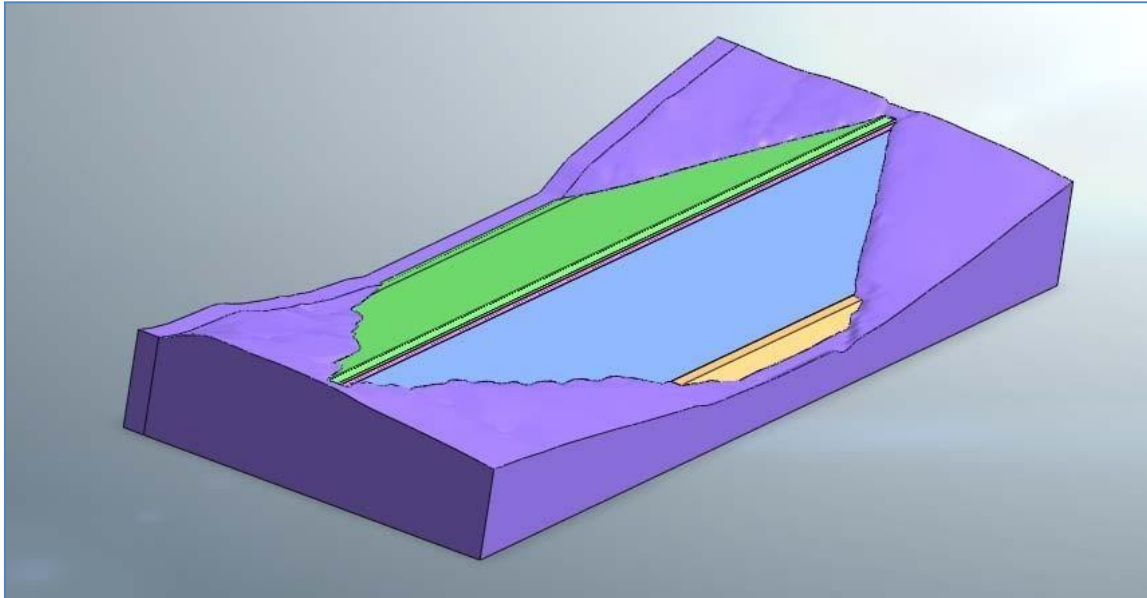


**Figure VI.8 Elaboration du modèle géométrique du barrage**

Dans la phase suivante, nous procédons à l'élaboration du modèle géométrique du barrage, qui comprend à la fois le terrain naturel et tous les éléments constitutifs du corps du barrage.

Le barrage en question est un barrage en terre zoné avec un noyau central en argile. Dans un souci d'optimisation du modèle, nous n'avons pas inclus les ouvrages en béton, car l'objectif final de la modélisation est de réaliser le calcul de stabilité de l'ouvrage, voir (Figure VI.9)

En utilisant le logiciel MIDAS GTS NX, nous importons la surface du terrain naturel créée précédemment à l'aide du module TGM. Ensuite, nous procédons à la modélisation du corps du barrage en ajoutant les différentes couches de matériaux, en respectant la géométrie et la zonation spécifiques au projet.



**Figure VI.9 Import TMS File**

### **VI.3.2 Génération du maillage et définition des matériaux**

Pour la réalisation du modèle numérique, nous avons utilisé un uniforme. Ce maillage a été généré automatiquement par défaut, en utilisant des éléments triangulaires à trois nœuds. Un maillage uniforme présente l'avantage de simplifier l'analyse numérique en réduisant les variations de taille des éléments, ce qui facilite le calcul des déformations et des contraintes dans le modèle. Cependant, il est important de noter que la taille et la densité du maillage peuvent être ajustées en fonction des besoins spécifiques de l'analyse et de la résolution souhaitée.

Le choix des éléments triangulaires à trois nœuds est courants dans les modèles géotechniques, car ils offrent une représentation efficace des géométries complexes et permettent une meilleure capture des déformations et des interactions entre les différents éléments du modèle.

En utilisant ce maillage, nous pourrons effectuer des calculs numériques pour évaluer la stabilité du barrage et analyser son comportement sous différentes sollicitations et conditions géotechniques.

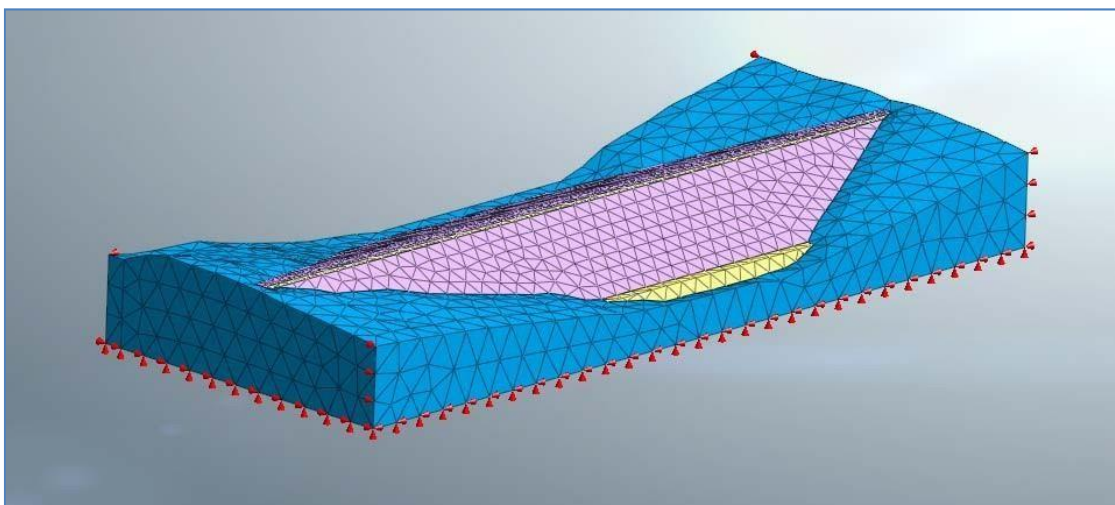
Les caractéristiques des matériaux sont résumées dans le tableau VI.1.

**Tableau VI.1 Récapitulation des caractéristiques des matériaux utilisées dans le modèle [19].**

Nom	Noyau	Filtre	Corps/ barrage	Roche en place
Type de modèle	MohrCoulomb	MohrCoulomb	MohrCoulomb	MohrCoulomb
Module élastique(E)	3.0E+04	4.0E+04	5.5E+04	2.5.0E+06
Coefficient de poisson( $\nu$ )	0.30	0.38	0.3	0.25
Poids spécifique(N/m <sup>3</sup> )	22	22	20	22
K <sub>0</sub>	0.5	0.5	0.70	0.65
Poids spécifique(N/m <sup>3</sup> )	23	24	24	25
Indice des videsinitial (e <sub>0</sub> )	0.6	0.6	0.6	0.6
K <sub>x</sub> (m/s)	1.90E-05	1.90E-05	0.01	1.10E -05
K <sub>y</sub> (m/s)	1.90E-05	1.90E-05	0.01	1.10E -05
K <sub>z</sub> (m/s)	1.90E-05	1.90E-05	0.01	1.10E -05
Cohésion (KPa)	3.5	0	0	0
Angle de Frottement (°)	36	34	39.5	42

### VI.3.3 Définition des conditions aux limites

Les conditions aux limites se sont des conditions à mettre aux frontières du volume de contrôle (géométrie du profil), et pour assurer la fermeture du système d'équations qui contrôle le phénomène, dont l'intérêt de trouver la solution unique La condition appliquée à labase du modèle consiste a la fixation du déplacement en x, y et z par des nœuds périphérique en translations et en rotation. (Figure VI.10)



**Figure VI.10 Modèle numérique du barrage**

### VI.3.4 Présentation des résultats

Dans le but d'analyser l'impact d'une vidange rapide sur le comportement du barrage, nous allons utiliser une fonction spatiale pour faire varier le niveau de l'eau en amont du barrage de 25 m à 10 m sur une période de 72 heures. Nous adopterons une approche de construction en plusieurs étapes, appelée "staged construction", qui consiste à modéliser le phasage du problème. (Figure VI.11)

La première étape consistera à représenter l'état initial du barrage, c'est-à-dire le barrage en état plein, en définissant sa géométrie et ses conditions initiales. Nous établirons les propriétés géotechniques des matériaux constituant le barrage et les contraintes initiales.

Ensuite, nous introduirons progressivement la fonction de vidange rapide, ce qui impliquera une diminution du niveau de l'eau en amont du barrage au fil du temps. Cette évolution sera déterminée par la fonction spatiale que nous avons définie précédemment. Nous observerons ainsi de manière dynamique l'écoulement de l'eau pendant la vidange rapide.

Il est important de souligner que cette modélisation nécessite une représentation précise des propriétés géotechniques des matériaux du barrage, la détermination des conditions aux limites, notamment en ce qui concerne les débits d'évacuation de l'eau pendant la vidange rapide.

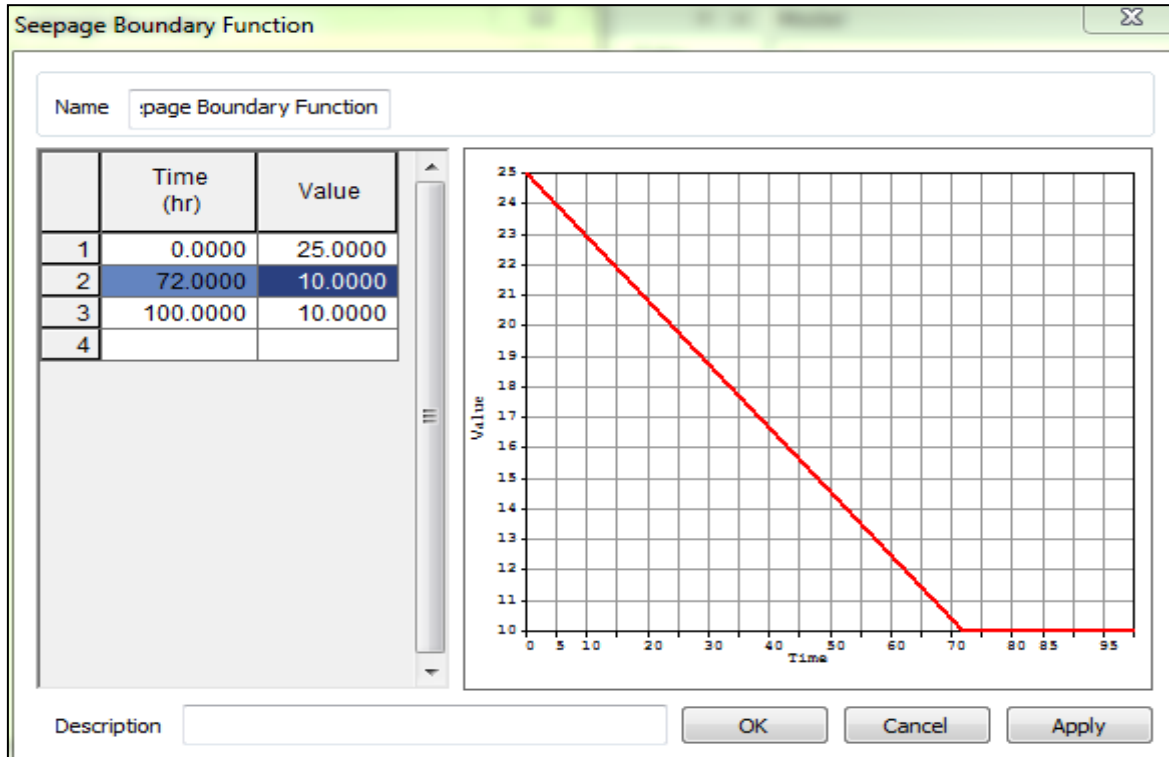


Figure VI.11 Fonction limite d'infiltration

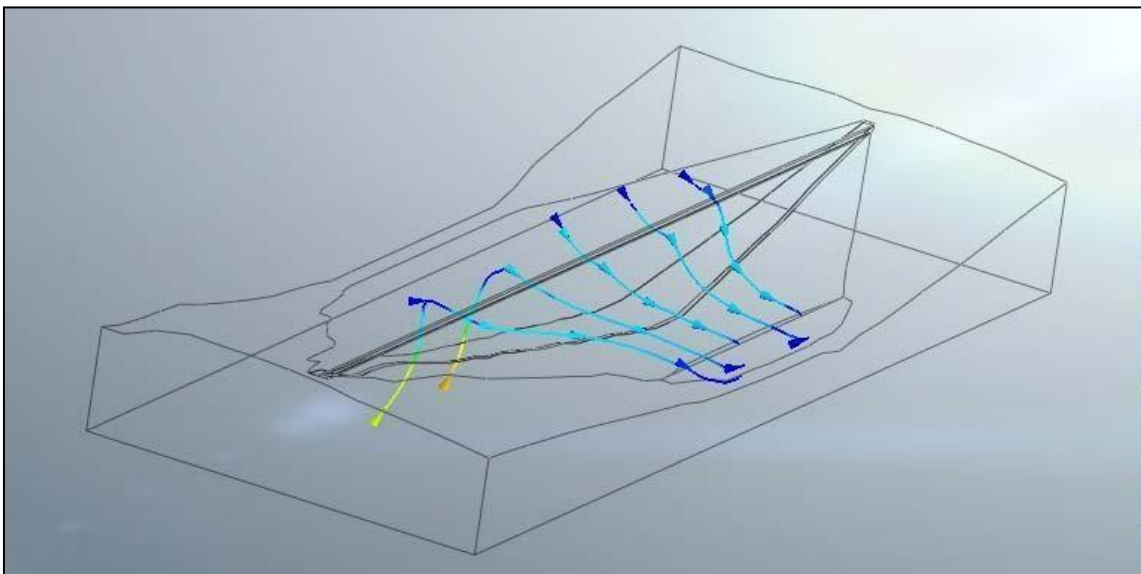
L'analyse peut être maintenant lancée, le problème étudié est défini par :

- ❖ Number of nodes : 2050
- ❖ Number of elements: 11425
- ❖ Number of equations: 13540

#### VI.3.4.1 Cas de vidange rapide :

La figure VI.12 présente les lignes d'écoulement à travers le corps du barrage, mettant en évidence la fonction du prisme de drainage. Cependant, après une baisse brusque du niveau de retenue, il peut y avoir une situation où les pressions interstitielles induites par la retenue ne se sont pas encore dissipées. Cela signifie que les forces exercées par l'eau retenue, qui n'est plus présente, n'ont pas eu suffisamment de temps pour se relâcher ou s'équilibrer. En conséquence, ces pressions interstitielles non dissipées peuvent causer une déstabilisation du remblai du barrage, principalement vers l'amont, voir Figure VI.13 et Figure VI.14

Cette déstabilisation peut entraîner des problèmes de stabilité du barrage, car les pressions interstitielles non dissipées peuvent exercer des forces supplémentaires sur le remblai. Cela peut potentiellement provoquer un glissement ou un affaissement du sol du côté amont du barrage.

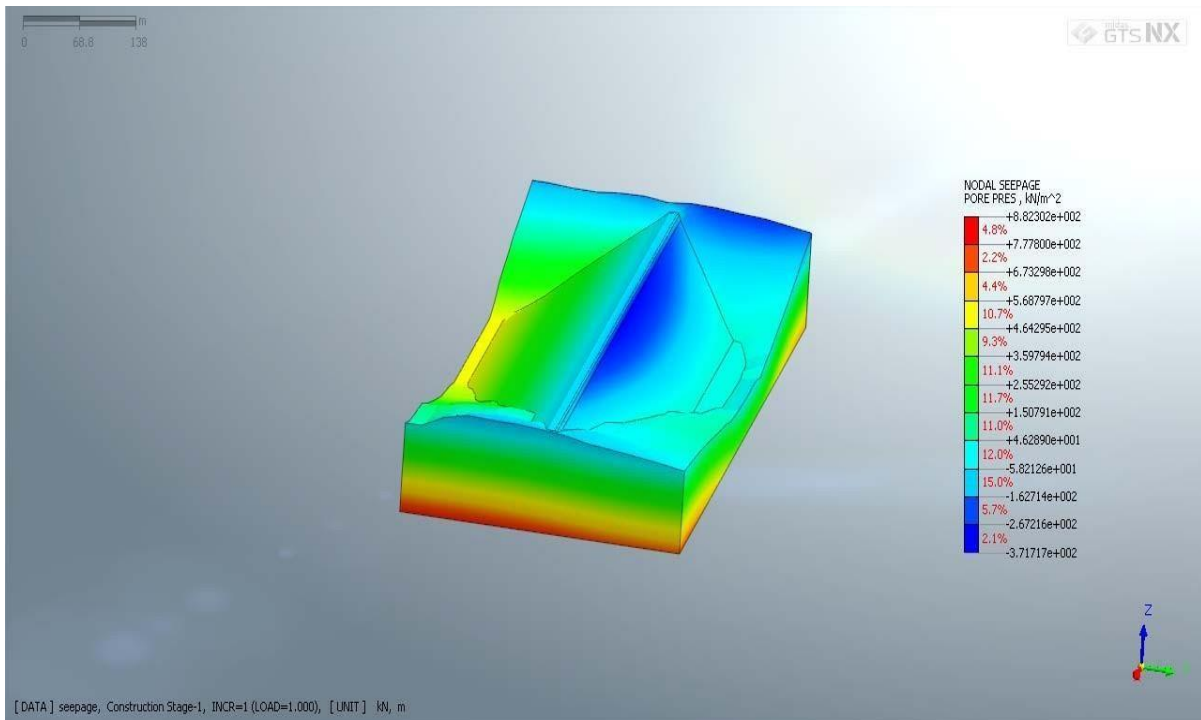


**Figure VI.12 Lignes d'Écoulement du barrage a l'état initial**

Lorsqu'il y a une vidange rapide du barrage, c'est-à-dire une baisse rapide du niveau d'eau en amont, les pressions interstitielles générées par l'eau retenue commencent à diminuer. Les pressions interstitielles se réfèrent aux forces exercées par l'eau sur les particules de sol dans les espaces entre elles. La diminution de la pression interstitielle est souvent observée lorsqu'il y a une baisse de la charge hydraulique.

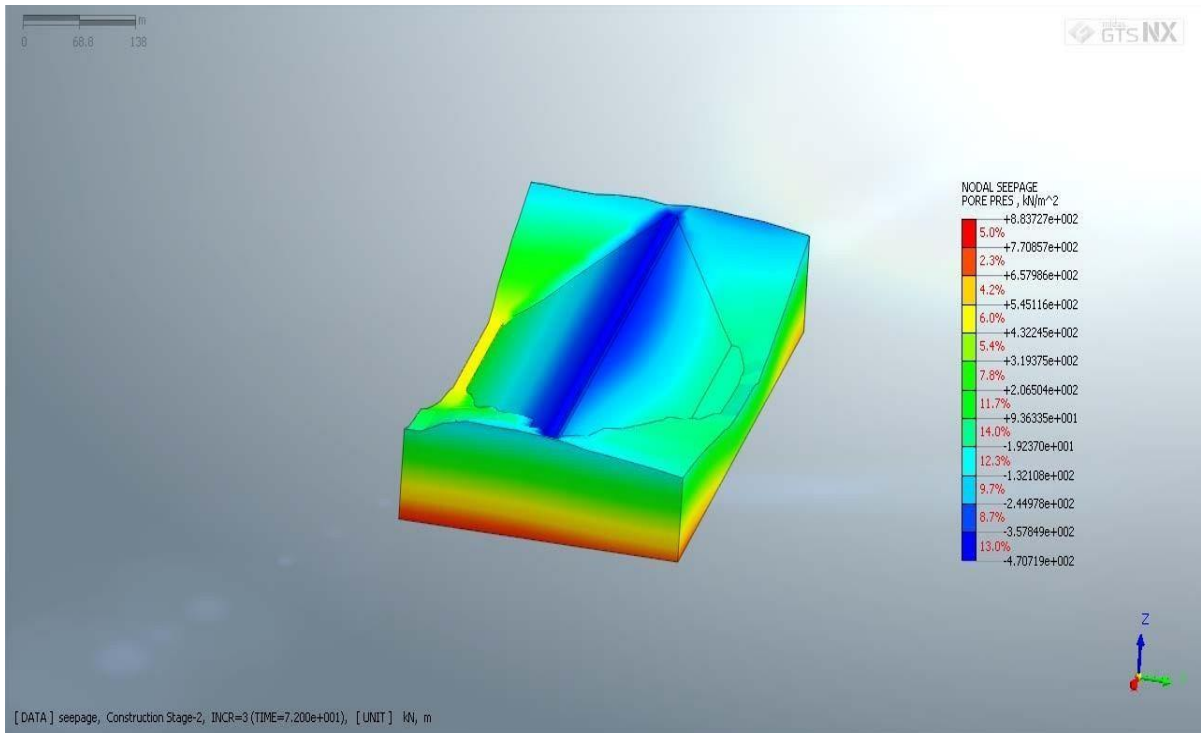
Cette diminution de la pression interstitielle peut être visualisée par le modèle numérique, montrant une évolution progressive vers des valeurs plus faibles à mesure que le niveau d'eau diminue en amont du barrage. Cela est dû au fait que la force exercée par l'eau sur les particules de sol diminue à mesure que la colonne d'eau se réduit.

Il est encourageant de constater que les résultats du modèle numérique sont cohérents avec la réalité physique, car cela renforce la confiance dans l'exactitude du modèle et sa capacité à prédire le comportement du système hydraulique. Ces informations peuvent être utilisées pour évaluer la stabilité du barrage, la répartition des contraintes et d'autres aspects importants de la conception et de la gestion des barrages.



**Figure VI.13 Pression interstitiel état initial (plein)**





**Figure VI.14 Pression interstitielle vidange rapide**

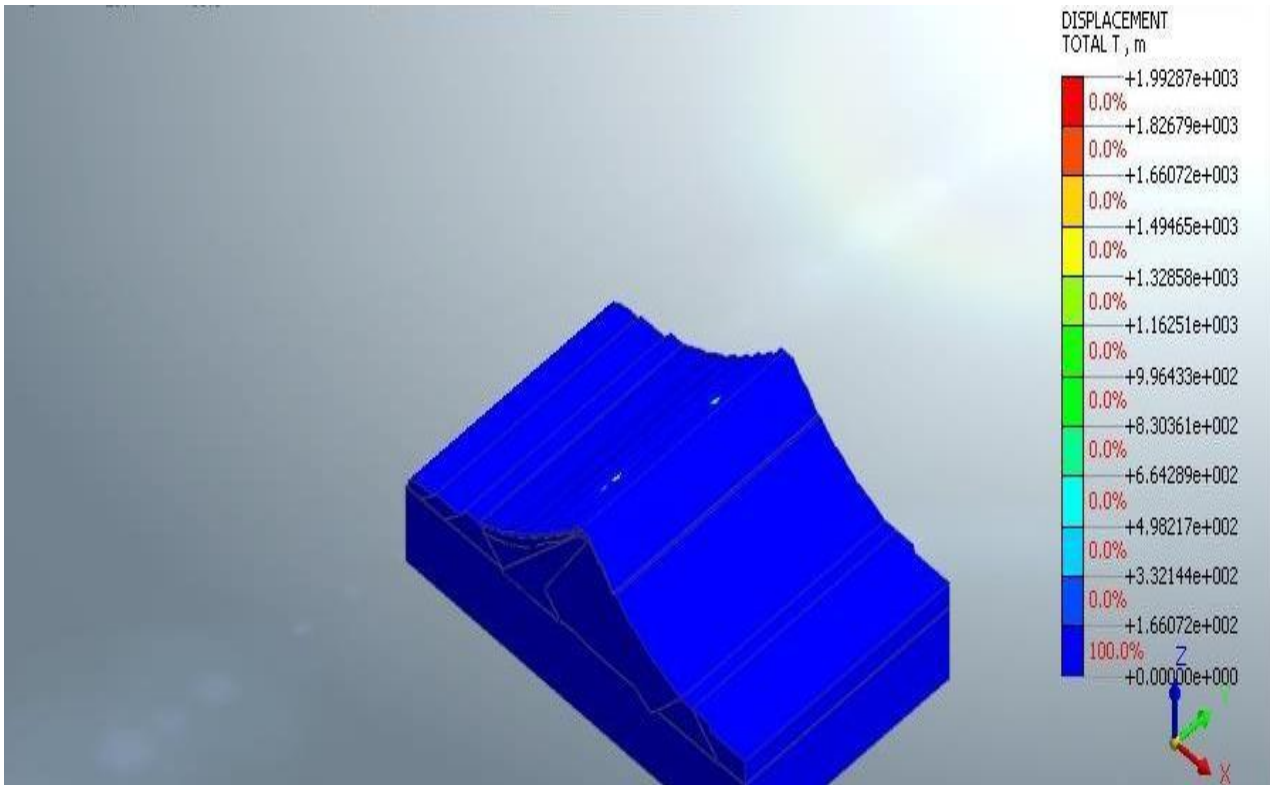
#### VI.3.4.2 Détermination du coefficient de sécurité

Nous allons maintenant procéder à l'analyse de la stabilité du barrage en déterminant son coefficient de sécurité. Pour cela, nous utiliserons la méthode de réduction des résistances, appelée Strength Reduction Method (SRM), qui offre une vision plus détaillée de la stabilité et permet de mettre en évidence une zonation de la stabilité.

En plus de fixer les nœuds périphériques en termes de translations et de rotations, notre deuxième condition consistera à ajouter la force de gravité en tant que charge extérieure appliquée sur le barrage. La variable que nous utiliserons dans notre analyse sera le niveau de l'eau appliqué en amont du barrage, ce qui fera varier la pression interstitielle et le poids de l'eau appliqué.

Cette approche nous permettra d'évaluer le coefficient de sécurité du barrage en considérant les différentes conditions de chargement, notamment les variations de pression interstitielle et de poids d'eau. Nous pourrions ainsi identifier les zones de stabilité et prendre des mesures appropriées pour garantir la sécurité du barrage.

La figure ci-dessous illustre l'évolution des déplacements à la fin de la construction du barrage, lorsque celui-ci est complètement vide. Les résultats montrent une cohérence, avec un déplacement maximal ne dépassant pas 2 cm au niveau des berges les plus éloignées du barrage voir, Figure VI.15.



**Figure VI.15 Déplacement barrage fin de construction**

Les figures suivantes Figure VI.16 Figure VI.17 représentent l'évolution du coefficient de sécurité en fonction du remplissage du barrage. Plusieurs points ont été sélectionnés pour illustrer la valeur du coefficient de sécurité. Dans l'ensemble, le barrage semble stable, avec un coefficient de sécurité supérieur à 1, à l'exception de la zone du prisme de drainage. Pour remédier à cette situation, il serait possible d'envisager des mesures de stabilisation du sol, telles que des modifications de la géométrie, l'utilisation de matériaux spécifiques ou la mise en œuvre de techniques de renforcement.

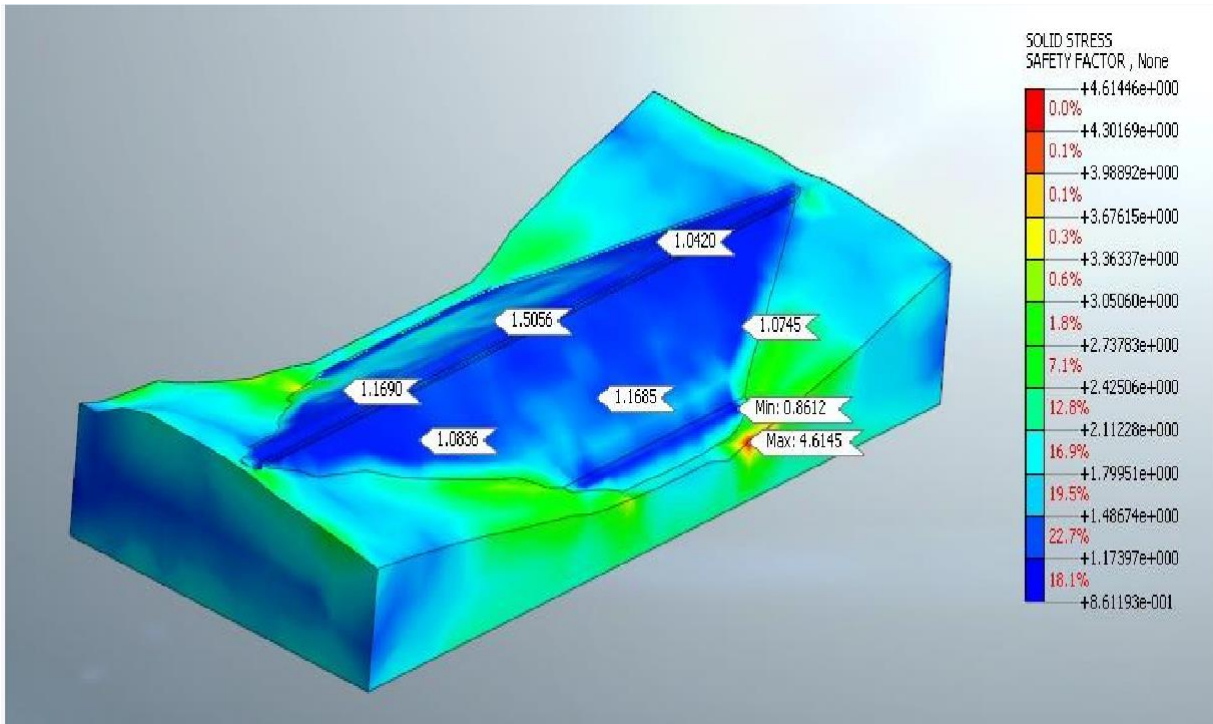


Figure VI.16 Facteur de sécurité - barrage vide

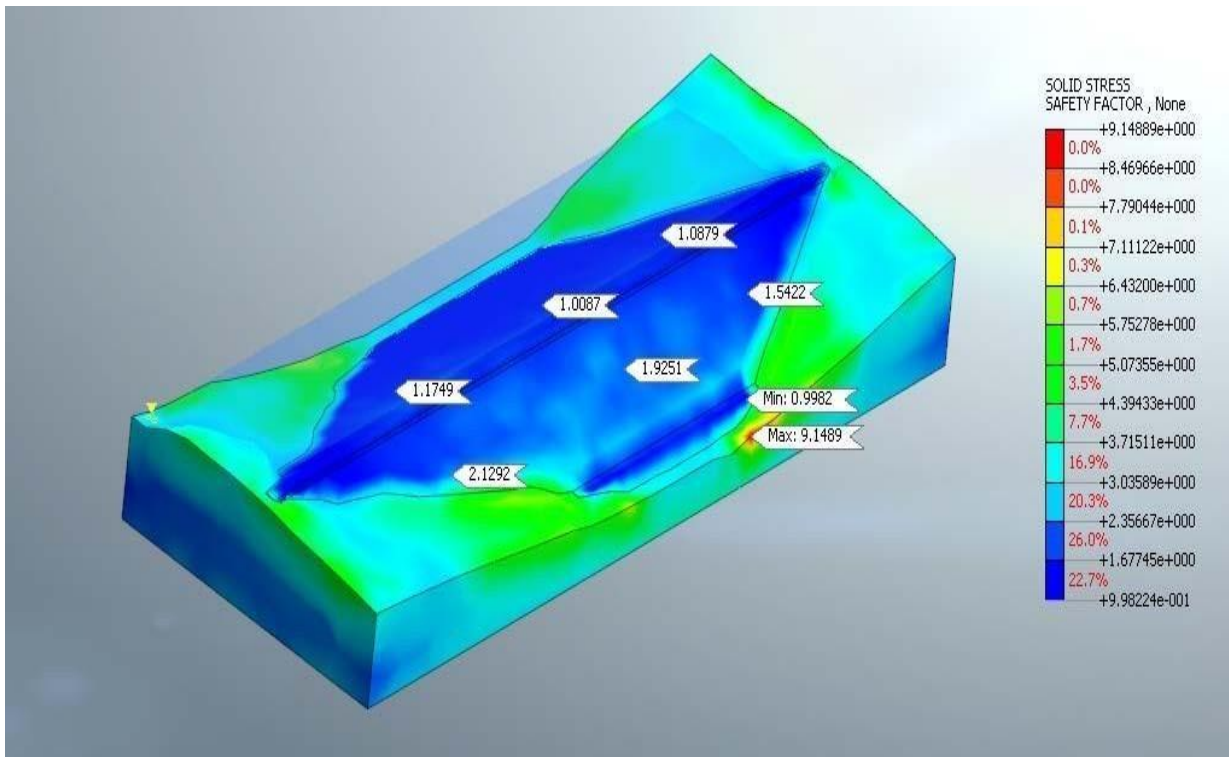


Figure VI.17 Facteur de sécurité - barrage plein

## **VI.4 Conclusion**

Ce chapitre a fourni une analyse exhaustive des résultats, en mettant particulièrement l'accent sur l'utilisation du logiciel Midas GTS-NX. Les résultats obtenus semblent cohérents à la réalité, ce qui est encourageant. Cependant, en raison de contraintes de temps et des besoins en puissance de calcul pour gérer un grand volume de données, nous n'avons pu exploiter qu'une partie des fonctionnalités du logiciel. Malgré cela, la stabilité générale du barrage semble assurée, à l'exception du prisme de drainage qui nécessiterait un renforcement supplémentaire.

## Conclusion Générale

Les barrages en remblai présentent des risques de rupture qui peuvent découler de plusieurs facteurs, tels que l'érosion des sols fins constituant le noyau, l'érosion des couches de fondation, les problèmes de stabilité liés aux fortes pressions interstitielles, les écoulements internes avec des gradients élevés, la submersion du barrage et les effets d'un séisme. L'étude des infiltrations dans le barrage Boukhroufa a révélé une forte corrélation entre le phénomène d'infiltration et les paramètres de sécurité du barrage. En d'autres termes, la manière dont l'eau s'infiltré à travers le barrage est un élément crucial à prendre en compte pour garantir sa sécurité.

Après avoir défini le modèle numérique, plusieurs simulations ont été effectuées pour évaluer les capacités du logiciel et valider la conception du barrage étudié, une fonction spatiale a été utilisée pour simuler une baisse du niveau de l'eau en amont du barrage, passant de 25 m à 10 m en seulement 72 heures. Cette simulation a permis d'analyser l'impact d'une vidange rapide sur le comportement du barrage.

Les résultats ont montré l'efficacité de l'approche de modélisation tridimensionnelle adoptée, qui a permis de représenter de manière plus réaliste le comportement du barrage en tenant compte de sa géomorphologie hétérogène. Cela met en évidence l'importance de créer des approches numériques pour chaque barrage, car cela offre une meilleure capacité d'analyse et constitue un outil précieux pour l'évaluation des risques et la planification.

Le choix du code de calcul Midas GTS NX a été primordial en vue de l'atteinte des objectifs fixés il offre une myriade de résultats exploitables, Nous nous concentrerons sur les éléments les plus pertinents liés au problème étudié.

-Les analyses effectuées avec le code Midas GTS NX ont clairement montré la nécessité de la définition claire et précise des conditions aux limites et ce en optant pour une analyse poussée des conditions de base pré-modélisation.

- Les lignes d'écoulement à travers le corps du barrage mettent en évidence la fonction du prisme de drainage, qui est une zone spécifique destinée à faciliter l'écoulement de l'eau à travers le barrage. Ces lignes d'écoulement représentent les chemins préférentiels empruntés par l'eau à l'intérieur de la structure.

-L'évolution des pressions interstitielles et du flux d'écoulement avant et après une vidange rapide du barrage confirme une fois de plus que le modèle numérique est cohérent avec la

réalité physique. Ces observations mettent en évidence une diminution de la pression en fonction de la diminution du niveau d'eau en amont du barrage.

-Les valeurs des coefficients de sécurité obtenues dans notre cas sont supérieures aux normes, ce qui satisfaisant et confirme la stabilité des talus.

-Les déplacements observés à la fin de la construction du barrage, lorsque celui-ci est complètement vide, indiquent que les résultats sont cohérents avec des déplacements maximaux ne dépassant pas 8 cm au niveau des berges extrêmes du barrage.

En prenant en compte le remplissage du barrage, il semble stable avec un coefficient de sécurité supérieur à 1, à l'exception de la zone du prisme de drainage. Cependant, cette instabilité potentielle peut être corrigée en procédant à une stabilisation du sol. Cela peut être réalisé en modifiant la géométrie du barrage, en utilisant des matériaux différents ou en appliquant des techniques de renforcement du sol.

## Références Bibliographiques

- [1] HERAGMI ALI ; Choix et Conception de L'organe de L'étanchéité des Barrages en Terre Barrage EL-AGREM JIJEL ; Mémoire de Magister, Université Badji-Mokhtar- Annaba ,2009.
- [2] BOUAKRIF .B , Mémoire fin d'étude "étude une digue d'un barrage" université de Jijel 2012.
- [3] Lakhdar Djemili ; Critères de choix de projet des barrages en terre ; Etanchéité par le masque en béton bitumineux ; Thèse de doctorat l'Université Colonel Hadj Lakhdar- Batna 2006.
- [4] Heragmi.A , Choix et conception de l'organe del'etancheite des barrages en terre barrage elagrem jijel. Diplôme de magister. Université Badji-Mokhtar- Annaba, 94p ,2009.
- [5] AMARA Fatma ; Optimisation de la largeur en crête des petits barrages et retenues collinaires ; Mémoire de master Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique -Arbaoui Abdellah 2018.
- [6] Messaid.B, Etude de la position efficace des drains dans les barrages en terre. Université de Batna, pp. 34-35, vol. 263,2009.
- [7] DAMIEN .S ,Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations» thèse de doctorat, Université de marne-lavallée,2005..
- [8] MESSAID Belkacem ; Etude de la position efficace des drains dans les barrages en terre ; Mémoire doctorat Université de batna -Algérie, 2009.
- [9] MASEKANYA Jean-Pierre ; Stabilité des pentes et saturation partielle etude expérimentale et modélisation numérique ; These doctorat Université de Liege -Belgique , 2008.
- [10] BAGHZIM Hassiba ; Etude numérique de la conception des barrages en terre, Mémoire de Magister Université Mohamed Khider– Biskra , 2015.
- [11] JANTZEN.J, MARCHE. C, MAHD T.F, Détermination de l'hydrogramme de rupture par déversement en crête pour barrages en terre et en enrochement disposant d'un rideau en béton. Dans: Canadian Journal of Civil Engineering / Revue canadienne de génie civil, v. 40, n. 6 (juin 2013), pp. 537-546.
- [12] [http://www.irma-grenoble.com/05documentation\(2020\)](http://www.irma-grenoble.com/05documentation(2020)).
- [13] DURAND Jean-mauris - ROYET paul - MERIAUX patrice; technique des petites barrage en afrique sahélienne et équatoriale; imprimé pr jouve, 18,rue saint-denis , 75001 paris, avril 1999.
- [14] BAGHZIM Hassiba; Etude numirique de la conception des barrage en terre; mémoire magister Université mohamed khider-biskra-Algérie, 2005.
- [15] [http://www.technique-des-barrages-en-amenagement-rural/Minister de l'agriculture français; technique des barrages en aménagement rural. 19/01/2012](http://www.technique-des-barrages-en-amenagement-rural/Minister_de_l'agriculture_français;_technique_des_barrages_en_aménagement_rural._19/01/2012)
- [16] [https://www.mementodumaire.net/risques-technologiques/rt-4-rupture-de-barrage/Le risque rupture de barrage, 21/05/ 2013.](https://www.mementodumaire.net/risques-technologiques/rt-4-rupture-de-barrage/Le_risque_rupture_de_barrage,_21/05/2013)
- [17] Le Delliou, P. (2003). Les barrages : conception et maintenance. Presses Universitaires

Lyon.

- [18] LABIDI Yasmina , LAKRID Hanifa , Choix et conception de l'organe de l'étanchéité des barrages en terre barrage el-agrem jijel : Universite badji-mokhtar-annaba , 2009.
- [19] MAMOUR Ismail; Modélisation de l'infiltration et de la stabilité du barrage ; Mémoire Master Université d'Annaba -Algérie, 2020.
- [20] Barrage boukhroufa expertise APD VOL III-Géologie-Géotechnique Annexe III 3.2 Labo.
- [21] MIDAS GTS NX, 2014, New experience of Geo-Technical analysis System, Manual documentation