



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



UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ-BOUIRA

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie Civil

Mémoire De Fin D'étude

Présenté par :

HAMITOUCHE Nihad

KEBIR Wahida

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Filière : Génie Civil

Option : Structure en Génie Civil

Thème :

**ÉTUDE DE COMPORTEMENT DYNAMIQUE D'UN
BARRAGE EN TERRE**

Devant le jury composé de :

	UAMOB	Président
Mr. REFFAS Brahim	UAMOB	Encadreur
Mr. ABBED Mourad	UAMOB	Co-Encadreur
	UAMOB	Examineur

Année Universitaire 2022/2023

Dédicace

Je dédie ce travail à :

A mes parents

A Abd el Djalil , Meriem , Mouhamed Ismail ,

A Redouane

A Noudjoud Wahida , Manel , Hadjer

A tous ma famille et mes proches .

Nihad

Dédicace

Je dédie ce travail à :

A mes parents

A Souhila , Adel ,Ahmed , Ishak

A Nihad , Manel , Hadjer , Meriem

A tous ma famille et mes proches .

Wahida

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mon directeur de mémoire, Mr.REFFAS pour son encadrement attentif et ses encouragements constants tout au long de ce processus. Vos remarques constructives et votre expertise dans le domaine ont été d'une valeur inestimable pour la réussite de mon mémoire.

Je souhaite également remercier chaleureusement les membres de mon jury de mémoire pour avoir accepté d'évaluer mon travail et Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers mes professeurs et mes enseignants, qui m'ont transmis des connaissances fondamentales tout au long de mon parcours académique.

Résumé

La compréhension du comportement dynamique est essentielle pour concevoir des barrages en terre capables de résister aux sollicitations statiques et dynamiques. Il est nécessaire de prendre en compte de nombreux facteurs tels que la résistance et les caractéristiques des matériaux utilisés, la géométrie du barrage et les charges sismiques potentielles . L'objectif de cette étude est d'évaluer le comportement dynamique d'un barrage en déterminant le facteur de sécurité et les déformations qui se produisent dans le cas d'une retenue d'eau normale et dans le cas d'une retenue maximale, en utilisant le logiciel de modélisation numérique PLAXIS 2D. Notre approche de modélisation numérique repose sur la méthode des éléments finis en utilisant le modèle de Mohr-Coulomb. Cette méthode nous permettra de simuler et d'analyser le comportement du barrage en réponse aux charges dynamiques, telles que les séismes, les variations du niveau de l'eau et d'autres sollicitations dynamiques pertinentes.

Mots clés

Barrage en terre - Drain - Mohr Coulomb - facteur de Sécurité - Stabilité – Déformation - Plaxis 2D

Abstract

Understanding the dynamic behavior is essential for designing earth dams capable of withstanding static and dynamic loads. It is necessary to consider various factors such as the strength and characteristics of the materials used, the dam's geometry, and potential seismic loads. The objective of this study is to evaluate the dynamic behavior of a dam by determining the safety factor and deformations occurring under normal water retention conditions and under maximum retention, using the PLAXIS numerical modeling software. Our numerical modeling approach is based on the finite element method using the Mohr-Coulomb model. This method enables us to simulate and analyze the dam's behavior in response to dynamic loads, such as earthquakes, water level variations, and other relevant dynamic loads.

Keywords

Earth dam - Drainage - Mohr-Coulomb - Safety factor - Stability - Deformation - PLAXIS 2D.

ملخص

فهم السلوك الديناميكي ضروري لتصميم سدود ترابية قادرة على مقاومة الأحمال السكونية والديناميكية. يتعين أخذ العديد من العوامل في عين الاعتبار مثل مقاومة وخصائص المواد المستخدمة، وهندسة السد والحمل الزلزالي المحتمل .

هدف هذه الدراسة هو تقييم السلوك الديناميكي للسد من خلال تحديد معامل الأمان والتشوهات التي تحدث في الاحتجاز العادي للمياه وفي حالة الاحتجاز الأقصى، باستخدام برنامج النمذجة العددية بلاكسيس 2 ب .

تعتمد منهجيتنا في النمذجة العددية على طريقة العناصر المحدودة باستخدام نموذج مور كولومب. ستمكننا هذه الطريقة من تحليل سلوك السد في استجابته للأحمال الديناميكية مثل الزلازل وتغيرات مستوى المياه وغيرها من الاجهادات الديناميكية ذات الصلة.

كلمات مفتاحية :

سد التربة - تصريف - مور كولومب - معامل الأمان - استقرار - تشوه - بلاكسيس 2 ب

Sommaire

Introduction générale I

I. Généralité sur les Barrages 21

I.1	Introduction.....	21
I.2	Les barrages en Algérie	21
I.3	Déférents types de barrages	22
I.3.1	Les barrages en béton	22
a-	Barrage en poids.....	23
b-	Barrages a contreforts	24
c-	Barrages voute.....	25
I.3.2	Barrages en remblai	25
a-	Barrage en enrochement	26
b-	Barrage en terre	27
I.3.3	Type de barrage en terre.....	27
I.3.3.1.	Barrage en terre homogène.....	27
I.3.3.2.	Barrage en terre a noyau	28
I.3.3.2.3.	Barrage à masque.....	30
I.4	Définition du profil général des barrages en terre.....	31
I.4.1	Hauteur du barrage	31
I.4.2	Niveau normal de la retenue.....	31
I.4.3	Niveau des plus hautes eaux	31
I.4.4	Revanche	31
I.4.3.1.	Largeur en crête	31
I.4.3.2.	Pente des talus :	32
I.5	Drain et filtre des barrages en terre.....	33
I.5.1	Drains et filtres	33
I.5.2	Drain	33
I.5.3	.Filtre.....	34
I.5.3.1.	Constitution des drains et filtre.....	35
I.5.3.2.	Types des drains et filtre dans un barrage en terre :	36
I.5.3.3.	Disposition des drains et des filtres	39
I.5.3.4.	Protection des talus :	39
I.6	Les risques de rupture des barrages	40
I.6.1	Cause technique	41

I.6.2	Cause humain	41
I.6.3	Cause naturelle	41
I.7	Type des ruptures.....	41
I.8	Les avantages et les particularités des barrages en terre	42
I.9	Fondations des barrages en terre	43
I.9.1	Renforcement des fondations :	44
I.9.2.	L'étanchéité en fondation	45
I.10	Conclusion	46
Méthodes de Stabilité des Barrages		47
II.	Méthodes de Stabilité des Barrages	48
II.1	Introduction.....	48
II.2	Différents types d'instabilités de pentes.....	48
II.3	phases de stabilité des barrages	49
II.4	Problèmes posés	50
II.4.1	Les infiltrations	50
II.4.1.1.	Définition de l'infiltration.....	50
II.4.1.2.	Etude des infiltrations dans un barrage en terre	51
II.4.2	Évaluation de la ligne de saturation par la méthode de Kozeny	52
II.4.3	Ecoulements dans un barrage en terre	54
II.4.4	Glissement dans les barrages.....	55
II.4.5	Tassement des barrages.....	56
II.5	Définition du facteur de sécurité F_s	56
II.5.1	Choix des facteurs de sécurité.....	57
II.5.2	Méthodes de calcul à la rupture	58
II.5.2.1.	Méthode de l'équilibre limite	59
II.5.2.2.	Méthodes des tranches.....	60
II.5.2.3.	Méthode de Fellenius.....	61
II.5.2.4.	Méthode de Bishop	62
II.5.2.5.	Méthodes de calcul de stabilité sous séisme	63
II.5.2.5.1.	Méthode pseudo-statique	64
II.5.2.5.2.	Méthode dynamique.....	65
II.5.2.5.3.	Méthode de la réponse spectrale	66
II.5.2.5.4.	Méthode des éléments finis :	66
II.6	Conclusion	67

ÉTUDE DE COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES BARRAGE EN TERRE 68

III. Étude De Comportement Dynamique Des Barrage En Terre 69

III.1	.Introduction :	69
III.2	Comportement sismique des barrages en terre	69
III.2.1	Effet des séismes sur les barrages en terre	69
III.2.1.1	Cas de ruptures observées lors de séismes historiques	70
III.3	.Méthodes dynamiques	71
III.3.1	Méthode de NEWMARK (1965)	71
III.3.2	Méthode de SEED et MARKDISI (1978)	72
III.4	Comportement cyclique des sols	73
III.4.1	Pour les sables	73
III.4.2	Pour les argiles	74
III.5	Modélisation du comportement cyclique du sol	74
III.5.1	Définition du module de cisaillement G et de facteur d'amortissement D	76
III.5.2	Paramétrés cycliques équivalents	77
III.6	Caractéristiques dynamique des sols	79
III.6.1	Module de cisaillement G sous conditions de chargements cycliques	81
III.6.2	Facteur d'amortissement D sous conditions de chargements cycliques	82
III.6.3	Fonction de pression interstitielle	84
III.7	Conclusion	85

MODELISATIONS NUMERIQUES Et EXPÉRIMENTATIONS RESULTATS ET DISCUSSIONS 87

IV. Modélisations Numériques et Expérimentations- Résultats et Discussions 88

IV.1	Introduction	88
IV.2	Description et situation de l'ouvrage	88
IV.3	Conception et caractéristiques de barrage	89
IV.3.1	Caractéristiques de la crête :	89
IV.3.2	Caractéristiques des talus :	89
IV.3.3	Caractéristiques du corps du Barrage:	89
IV.3.4	Caractéristique des matériaux utilisés dans la modélisation numérique:	90
IV.4	Géométrie du modèle numérique	90
IV.4.1	Introduction	90
IV.4.2	Modèle numérique	91
IV.4.3	Génération du maillage	91
IV.4.4	Maillage et conditions aux limites	92

IV.4.5	Procédure de modélisation	93
IV.4.6	Niveau de remplissage de la retenue	93
IV.4. 6.2.	Résultats obtenus :	119
A-	Pour la retenue normale (RN) :	119
B-	Pour le niveau des plus hautes des eaux (PHE) :	119
IV.4.7	Discussions et interprétations des résultats	120
1-	Facteurs de sécurité :	120
1-a-	Facteur de sécurité dans le cas du chargement de la mise en eau :	120
1-b-	Facteur de sécurité dans le cas de niveau de remplissage (PHE) et (RN) :	120
1-c-	Facteur de sécurité dans le cas du chargement dynamique :	121
1-d-	Facteur de sécurité dans le cas du chargement de vidange rapide :	121
2-	Les déplacements :	121
2-a-	déplacements dans le cas du chargement de la mise en eau :	121
2-b-	déplacements dans le cas du chargement dynamique :	122
2-c-	déplacements dans le cas du chargement (vidange rapide) :	122
Conclusion générale		124
Références bibliographiques :		127

Liste des Figures

Figure I.1 : Barrage de Beni Haroun la Wilaya de Mila Algérie.....	22
Figure I.2 : Les différents variétés de barrage en béton	23
Figure I.3 : coupe d'un barrage-poids.....	24
Figure I.4 : barrage a contrefort.....	25
Figure I.5 : différents types de barrage en remblai.....	26
Figure I. 6 : barrage El HAMIZ de BOUMERDES.....	26
Figure I.7 : Barrage en terre homogène avec drain.....	27
Figure I.8. dimensionnement de noyaux.....	28
Figure I.9 : barrage à noyau central	29
Figure I.10 : Coupe du barrage à noyau incliné.....	30
Figure I.11 : Barrage à masque amont.....	30
Figure I.12 : drain de barrage.....	34
Figure I.13 : coupe transversale de drain superficiel.....	36
Figure I.14 : Drain tapis interne.....	37
Figure I.15 : Drain vertical.....	37
Figure I.16 : Prisme de drainage.....	38
Figure I.17 : type d'un barrage à étanchéité.....	38
Figure I.18 : protection d' un barrage par enrochement.....	40
Figure I.19 : Rupture de barrage.....	42
Figure.II.1 : barrage de la Grande Renaissance vu ici en décembre 2019, a commencé en 2011	49
Figure II.2 : Infiltration dans le sol.....	51
Figure II.3 : Trajectoire de l'eau à travers le barrage.....	52
Figure.II.4 : Ligne de saturation pour barrage homogène sans drain sur sol imperméable.....	53
Figure.II.5 : Ligne de saturation pour barrage homogène avec drain sur sol imperméable.....	53

Figure II.6: présentation d'analyse de stabilité à la rupture.....	59
Figure II.7 : Méthode des tranches.....	61
Figure II .8 : Forces appliquées sur une tranche dans la méthode de Fellenius.....	62
Figure II.9 : Représentation des forces(méthode de Bishop).....	62
Figure II.10 : Forces pseudo-statiques	64
Figure III.1 : Intégration de l'accélérogramme afin de déterminer les vitesses et les déplacements.....	72
Figure III.2: Méthode de Makdisi-Seed.....	73
Figure III.3 : Evolution du module de cisaillement G en fonction de la déformation de cisaillement cyclique et des propriétés de plasticité.....	75
Figure III.4 : Évolution de l'amortissement D en fonction de la déformation de cisaillement et des propriétés de plasticité.....	75
Figure III.5: Schématisation de la réponse du sol lors d'un chargement Cyclique...	76
Figure III.6: Changement de G avec chaque itération.....	77
Figure III.7: Variation des contraintes de cisaillement en fonction du temps.....	78
Figure III.8 : Cycles uniformes équivalents en fonction des magnitudes.....	79
Figure III.9 : Contraintes de cisaillement cycliques équivalentes.....	79
Figure III.10: Fonction G / G max/pour le sable (QUAKE/W).....	80
Figure III.11 : Fonction G / Gmax pour le sable (ProShake).....	80
Figure III.12: Fonction G / Gmax / pour l'argile (QUAKE/W.....	81
Figure III.13: Fonction G / Gmax pour l'argile (ProShake.....	81
Figure III.14 : Module de cisaillement dans les conditions de chargement cyclique.	82
Figure III.15: Fonction facteur d'amortissement pour le sable (QUAKE/W).....	83
Figure III.16: Fonction facteur d'amortissement pour le sable (ProShake).....	83
Figure III.17: Fonction facteur d'amortissement pour l'argile (QUAKE/W.....	84
Figure III.18: Fonction facteur d'amortissement pour l'argile (ProShake).....	84
Figure III.19 : Variation du Rapport nombre de cycles N/NL en fonction du coefficient de pression interstitielle ru.....	85

Figure IV.1 : Situation du barrage oued lekhal.....	89
Figure IV.2 : Profil du barrage en terre d'oued lekhal.....	92
Figure IV.3 : Maillage et conditions aux limites.....	93
Figure IV.4 : Distribution des pressions interstitielles au niveau du sol de la fondation.....	94
Figure IV.5 : Distribution des contraintes initiales au niveau du sol de la fondation.....	94
Figure IV.6 : ligne et degré de saturation.....	95
Figure IV.7 : déformation de Maillage.....	96
Figure IV.8 : Déplacement total dans le barrage.....	96
Figure IV.9 : Champs de déplacement vertical.....	97
Figure IV.10 : Champs de déplacement vertical.....	97
Figure IV.11 . Déplacement vertical au niveau de la crête.....	98
Figure IV.12 . Champs de déplacement horizontal.....	98
Figure IV.13 : Courbe de facteur de sécurité (Fs) de barrage.....	99
Figure IV.14 : Accélérogramme.....	99
Figure IV.15 : Application de la charge dynamique a la base du modèle géométrique.....	100
Figure IV.16 : Déformation de Maillage.....	100
Figure IV.17 : Champs de déplacement total.....	101
Figure IV.18 : Champs de déplacement Vertical	101
Figure IV.19 : Champs de déplacement vertical (vue en flèche).....	102
Figure IV.20 : Tassement (déplacement vertical) et soulèvement de fondation de côté aval.....	102
Figure IV.21 : Champs de déplacement horizontal.....	103
Figure IV.22 : Courbe de facteur de sécurité (Fs) de barrage.....	103
Figure. IV.23 : Champ d'écoulement (cas de vidange rapide).....	104
Figure IV.24 : Déformation de maillage.....	104
Figure IV.25 : Déplacement total et cercle de rupture.....	105

Figure IV.26 : déplacement vertical.....	105
Figure IV.27 : Déplacement vertical (vue en flèche).....	106
Figure IV.28 : Soulèvement et Tassement du sol de fondation de côté amont.....	106
Figure IV.29 : déplacement horizontal.....	107
Figure IV.30 : courbe de facteur de sécurité (Fs).....	108
Figure IV.31 : Déformation de maillage.....	109
Figure IV.32 Déplacement total.....	109
Figure IV.33 : déplacement vertical.....	110
Figure IV.34 : Déplacement vertical dans la crête.....	110
Figure IV.35 : Déplacement horizontal.....	111
Figure IV.36 : Courbe de facteur de sécurité Fs.....	111
Figure IV.37 : Déformation de maillage.....	112
Figure IV.38 : Déplacement total.....	112
Figure IV.39 : Déplacement vertical.....	113
Figure IV.40 : Déplacement vertical (vue en flèche).....	113
Figure IV.41 : Soulèvement et tassement de fondation de côté aval.....	114
Figure IV.42 : Déplacement horizontal.....	114
Figure IV.43 : Courbe de facteur de sécurité (Fs).....	115
Figure IV.44 : déformation de maillage.....	115
Figure IV.45 : Déplacement total.....	116
Figure IV.46 : Déplacement vertical.....	116
Figure IV.47 : Déplacement vertical (vue en flèche).....	117
Figure IV.48 : Soulèvement et tassement de sol de fondation de côté amont.....	117
Figure IV.49 :.Déplacement horizontal.....	118
Figure IV.50 : Courbe de facteur de sécurité (Fs).....	118

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Dimension de la largeur de la crête en fonction des catégories de la route.....32

Tableau I.2: Valeurs indicatives des fruits de talus (valeurs devront être vérifiées par calcul de stabilité).....33

Tableau II.1 :Valeurs de FS en fonction de l'importance de l'ouvrage.....58

Tableau II.2 : Classification des sites sismiques.....65

Tableau III.1 : Effet induit par les séismes sur quelques barrages en terre.....70

Tableau IV.1: propriété des matériaux.....90

Tableau IV.2 : résultats des calculs RN.....119

Tableau IV.3 : résultats des calculs PHE.....119

Liste des notations

B_{ber} : largeur de la berme

b : la projection horizontal

C_i / c : cohésion du sol

c' : Cohésion effective

d : distance horizontal

F_s : facteur de sécurité

F : longueur du fetch en km

h : hauteur de niveau normal de la retenue

H : hauteur du barrage

H_{dr} : hauteur de prisme de drainage

H_n : hauteur de la tranche n

H_2 : hauteur du niveau d'eau

H_c : Hauteur critique

H : hauteur réel

K_h : coefficients de perméabilité horizontale

K_v : coefficients de perméabilité verticale

L : La largeur en crête

L_t : Longueur du couche de drain

L' : distance horizontal entre le point b et l'axe qui passe par la limite de drain

L : l'emprise du barrage

m_1 : La pente des talus amont

m_2 : La pente du talus aval

M : résistant moment résistant

m'_{dr} et m''_{dr} : pente des talus a valet et amont du prisme de drainage

M_{moteur} : moment moteur

N_i : la composante normal

R : La revanche

U_i : la composante interstitielle due a l'eau

V_p : La vitesse de propagation des vagues

V : la vitesse du vent en km/h

W_i : le poids de la tranche

γ_{sat} : Poids volumique du sol saturé

γ_w : Poids volumique de l'eau

γ_{unsat} : Le poids volumique du sol

τ_n : Contraintes de cisaillement sur la tranche n

τ : Contraintes de cisaillement s'exerçant réellement sur la surface

τ'_{max} : Contraintes de cisaillement maximal

σ_n : Contrainte total sur la tranche n

σ'_m : la contrainte principale moyenne effective de confinement une profondeur h :

σ : composante normale de la contrainte total

σ' : composante normale de la contrainte effective

$\Delta\sigma_1$: la variation de la contrainte totale

u : pression interstitielle

u : vecteur déplacement réel (petits déplacements)

α_i : inclinaison segment de surface de glissement

ν : Angle de frottement du sol

ψ : Angle de dilatance du sol

Introduction Générale

Introduction générale

Les barrages en terre sont des ouvrages hydrauliques construits pour retenir l'eau. Ils sont généralement constitués d'un monticule de terre compactée ou de roches, renforcé par des matériaux tels que du béton, des géotextiles ou des enrochements. Ces barrages ont de multiples utilisations, allant de la gestion des ressources en eau à la production d'énergie hydroélectrique, en passant par la régulation des crues, l'irrigation agricole et la création de réserves d'eau potable. Parmi les types les plus anciens et les plus répandus de barrages dans le monde, les barrages en terre offrent des avantages tels qu'un coût de construction relativement bas par rapport aux autres types, une adaptabilité à différents types de sols et une capacité à stocker de grandes quantités d'eau. Ils peuvent être construits en utilisant des vallées naturelles ou en créant des digues artificielles pour retenir l'eau. La stabilité des barrages est un aspect important pour assurer leur fonctionnement sécurisé et prévenir les risques de défaillance. La stabilité d'un barrage fait référence à sa capacité à résister aux différentes forces qui agissent sur lui, telles que la pression de l'eau, les forces sismiques et l'érosion et facteurs influencent la stabilité des barrages tel que le séisme qui sont une source de forces dynamiques qui affectent la dynamique d'un barrage, les ondes sismiques générées par un séisme peuvent induire des vibrations et des mouvements du sol, qui sont transmis au barrage ces vibrations peuvent provoquer des déformations, des oscillations et des contraintes importantes dans la structure du barrage. Les réponses dynamiques des barrages aux séismes sont évaluées par des études de dynamique des structures, qui permettent de déterminer leur comportement et leur résistance aux forces sismiques et pour cela le comportement dynamique d'un barrage est un sujet d'étude essentiel dans le domaine de génie civil et de l'ingénierie des barrages. L'étude du comportement dynamique de la digue permet de déterminer les caractéristiques fondamentales, telles que sa fréquence naturelle, sa réponse modale, sa résistance aux charges dynamiques et sa capacité à absorber et à dissiper l'énergie. Elle permet également d'identifier les zones critiques de déformation, les risques de défaillance et les besoins de renforcement ou de modification de barrage.

Notre travail consiste à étudier le comportement dynamique d'un barrage en terre en exploitant le logiciel de calcul PLAXIS 2D. Ce mémoire contient quatre chapitres, introduction et conclusion générale, le premier chapitre est un rappel sur différentes définitions concernant les barrages en général et les barrages en terre particulièrement, de leur conception et de leur caractéristique, le deuxième chapitre présente les méthodes de stabilité des barrages comme la méthode des tranches, méthode de réponse spectrale, méthode

de l'équilibre limite, le troisième chapitre sera consacré à parler sur le comportement dynamique des barrages et a la présentation des méthodes dynamique et le quatrième chapitre est une présentation de l'ouvrage étudié et une modélisation numérique et une expérimentation pour le but d'assurer la sécurité de barrage et de prévenir les risque potentiels lies a son fonctionnement.

CHAPITRE 1

Généralité sur les Barrages

I. Généralité sur les Barrages

I.1.Introduction

Un barrage est un ouvrage hydraulique conçu pour retenir de grandes quantités d'eau destinées à l'alimentation en eau potable de plusieurs villes limitrophe, l'irrigation des grandes surfaces de cultures agricoles, produire de l'énergie hydroélectrique et cela se fait par l'exploitation et la correction des cours d'eau, les barrages peuvent être construits en utilisant divers matériaux tels que la pierre, le béton, la terre, ou une combinaison de ceux-ci, Les barrages peuvent être de différentes tailles, depuis de petits barrages en remblai jusqu'à de grandes structures comme le barrage des Trois-Gorges en Chine, qui est actuellement le plus grand barrage du monde. Les barrages peuvent avoir des impacts environnementaux significatifs, notamment en affectant le débit des cours d'eau, la qualité de l'eau, les écosystèmes et les populations locales. Cependant, les barrages peuvent également offrir de nombreux avantages, tels que la régulation des inondations, la production d'électricité renouvelable, la fourniture d'eau pour l'irrigation et la consommation, et la création de zones récréatives pour les activités de plein air. La construction de barrages doit donc être soigneusement planifiée et évaluée pour équilibrer les avantages et les impacts environnementaux et sociaux potentiels.

I.2.Les barrages en Algérie

L'Algérie possède plusieurs barrages construits pour répondre aux besoins de l'irrigation, de la production d'électricité, de la fourniture d'eau potable et de la régulation des cours d'eau, le barrage de Beni Haroun, situé dans la wilaya de Mila, est l'un des plus grands barrages d'Algérie et a été construit pour fournir de l'eau potable à la région d'Alger. Il a une capacité de stockage de 960 millions de mètres cubes d'eau, le barrage de Koudiat Acerdoune, situé dans la wilaya de Bouira, est le plus grand barrage d'Algérie en termes de production d'électricité. Il est équipé d'une centrale hydroélectrique de 132 mégawatts et fournit environ 8% de la production totale d'électricité en Algérie, Le barrage de Tichy Haf, situé dans la wilaya de Béjaïa, est utilisé pour l'irrigation et la production d'électricité. Il a une capacité de stockage de 320 millions de mètres cubes d'eau et est équipé d'une centrale hydroélectrique de 48 mégawatts, d'autres barrages notables en Algérie incluent le barrage de Ghrib dans la wilaya de Tiaret, le barrage de Foug El-Gherza dans la wilaya de Tindouf et le barrage de Boughezoul dans la wilaya de Médéa.

En Algérie, le secteur de l'eau comprend actuellement 80 barrages, qui sont du Ministère des Ressources en Eau et de l'Environnement (MRE), avec 5 autres en cours de

réalisation. Ces barrages sont distribués sur tout le territoire national. Ils sont sous la responsabilité des 58 Directions de Wilayas et sont gérés par l'Agence nationale des Barrages et Transferts (ANBT). L'approvisionnement en eau potable à partir de ces barrages est assuré par l'Algérienne des Eaux (ADE). Les projections pour le secteur d'ici 2030 prévoient la construction de 139 barrages [1].



Figure.I.1 : Barrage Beni Haroune de la Wilaya de Mila

I.3. Différents types de barrages

Il existe plusieurs types de barrages, chacun ayant ses bénéfices et ses désavantages en termes de coûts, de durabilité, de sécurité et d'efficacité pour la régulation des cours d'eau, la production d'énergie hydroélectrique, la fourniture d'eau potable et l'irrigation, le choix du type de barrage dépendra des besoins spécifiques du projet, de la géologie et topographie du site, ainsi que des considérations environnementales et économiques. Les barrages sont classés en deux catégories :

I.3.1. Les barrages en béton

Un barrage en béton est un type de barrage construit en utilisant du béton armé ou du béton précontraint. ce type de barrage est conçu pour retenir l'eau d'un cours d'eau et la stocker dans un réservoir pour divers usages comme la production d'électricité, l'irrigation,

l'approvisionnement en eau potable, les barrages en béton peuvent être construits en utilisant différents types de béton en fonction des conditions du site et des exigences du projet. Le béton est coulé dans des coffrages en acier pour former la structure du barrage. Des armatures en acier sont ensuite placés dans le béton pour renforcer sa résistance aux contraintes hydrauliques, les barrages en béton ont une longue durée de vie et sont généralement moins sujets à l'érosion que les barrages en terre. Ils sont également moins vulnérables aux dommages causés par les inondations, les séisme et les glissements de terrain. Cependant, ils sont plus coûteux à construire que les barrages en terre et nécessitent des compétences techniques spécialisées pour leur construction et leur entretien. Les barrages en béton peuvent également être équipés d'un système de décharge d'eau pour réguler le niveau de l'eau et prévenir les dommages causés par les inondations. Des mesures de sécurité, telles que des systèmes de surveillance et de détection des fuites, peuvent également être mises en place pour réduire les risques d'accidents. Dans cette catégorie il existe trois groupes des barrages représenté dans la figure suivant :

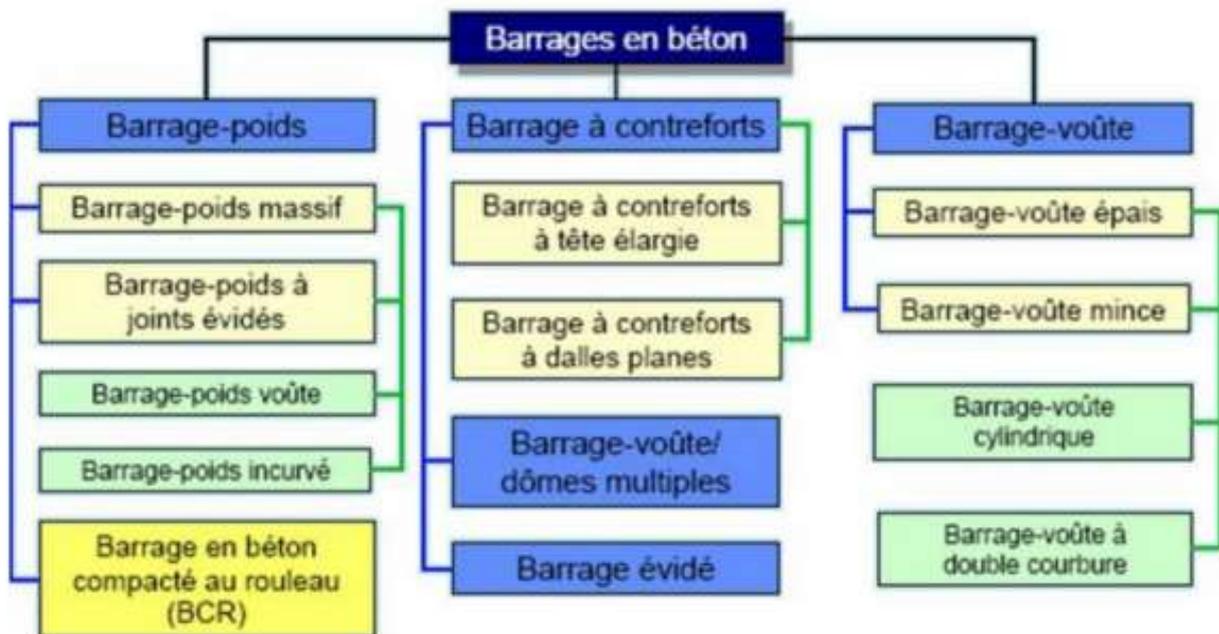


Figure I.2: Les différentes variétés de barrages en béton

a- Barrage en poids

Les barrages de type poids sont conçus pour résister à la pression de l'eau grâce à leur propre poids. Ils sont généralement massifs, pleins et ont une forme triangulaire. Le côté exposé à l'eau est soit vertical, soit légèrement incliné, tandis que le côté opposé est incliné avec un

angle de talus de 75 à 80 pourcent. Bien que leur construction soit coûteuse, ces barrages sont souvent plus durables et adaptés aux projets de grande envergure

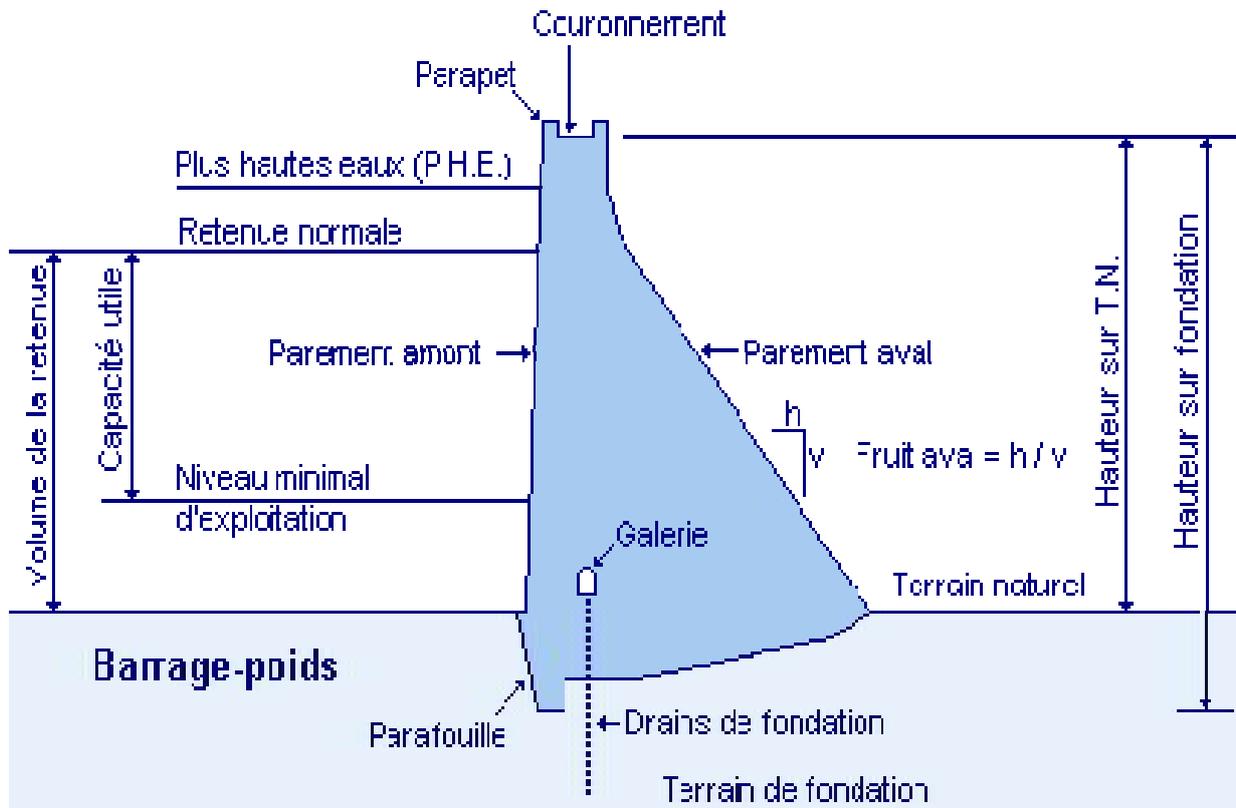


Figure I.3 : coupe d'un barrage-poids^[3].

b-Barrages a contreforts

Les barrages à contreforts sont des types de barrages en béton qui utilisent des contreforts pour résister à la pression de l'eau. Ils sont construits dans la vallée de manière parallèle à l'axe de la rivière. Ces contreforts, qui sont des murs de soutien, sont espacés le long de la longueur du barrage et servent à absorber et à transférer la force exercée par l'eau. Ils permettent ainsi de renforcer la structure et de maintenir la retenue d'eau en toute sécurité.



Figure I.4 : barrage a contrefort ^[4].

c-Barrages voûte

Sont des types de barrages en béton qui tirent leur résistance principalement de leur forme incurvée ou en voûte. Contrairement aux barrage-poids qui résistent à la pression de l'eau par leur propre poids, les barrages voûte utilisent la force de la voûte pour contrebalancer la poussée de l'eau. ^[5].

I.3.2.Barrages en remblai

Un barrage en remblai est un type de barrage en terre construit en utilisant des matériaux tels que la terre, le gravier et les roches, qui sont excavés sur place ou apportés de l'extérieur. Les matériaux sont empilés en couches horizontales et compactés pour former une structure solide qui peut retenir l'eau d'un cours d'eau et créer un réservoir. Les barrages en remblai peuvent être conçus avec une variété de profils en fonction des exigences spécifiques du projet, tels que la hauteur du barrage, la longueur du sommet et la pente. Les couches de matériaux utilisées dans la construction doivent être compactées et nivelées pour assurer la stabilité du barrage. Il existe deux groupes dans cette catégorie :

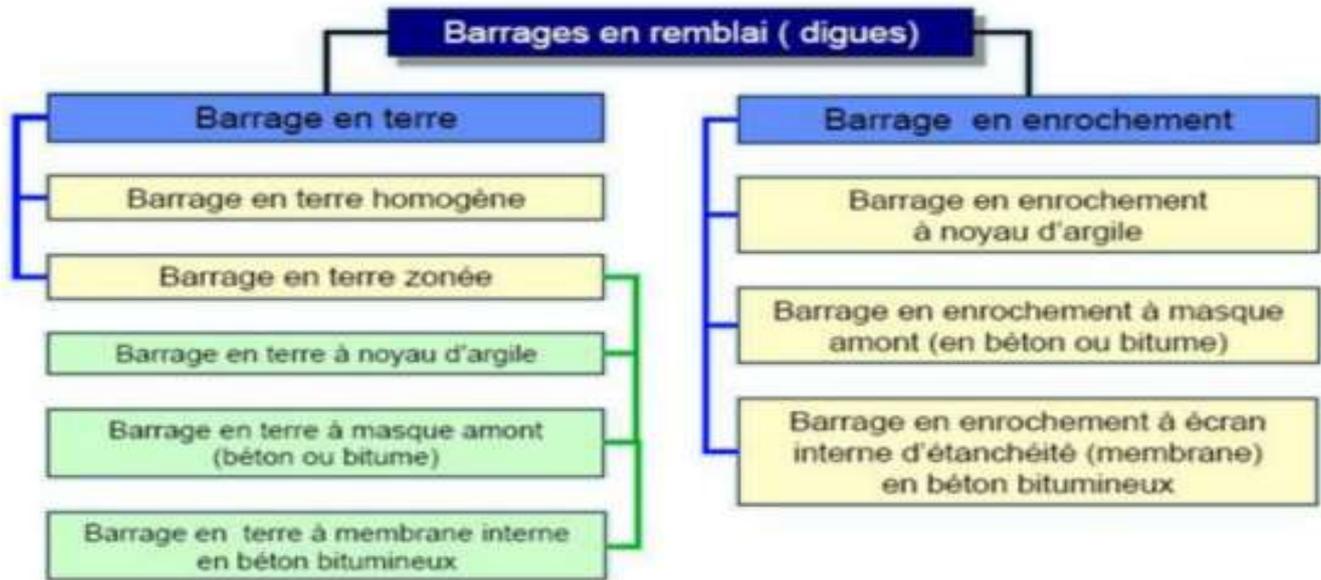


Figure I.5 : différents types de barrage en remblai^[6].

a- Barrage en enrochement

Également appelé barrage en remblai ou barrage enroché, est un type de barrage construit en utilisant des matériaux granulaires, tels que des rochers, des pierres et des graviers, pour former une structure de retenue d'eau, ils sont couramment utilisés lorsque les conditions du site ne sont pas propices à la construction de barrages en béton ou en terre compactée^[7].

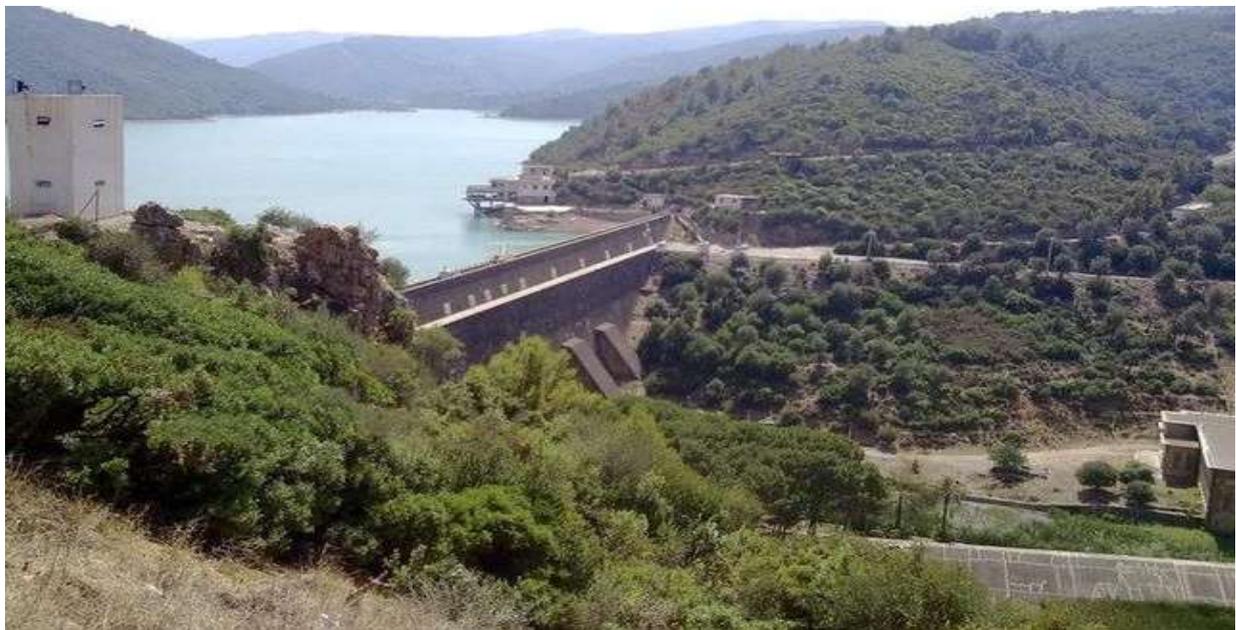


Figure I. 6 : Barrage El HAMIZ de BOUMERDES^[8].

b- Barrage en terre

Cette catégorie est constituée généralement en matériaux naturels composés d'un noyau étanche ou d'un masque amont^[9].

I.3.3.Type de barrage en terre

Ces barrages sont construits en empilant des matériaux tels que des roches, de la terre ou des graviers sur un noyau central en argile ou en béton. Ils sont généralement moins chers à construire que les barrages en béton et peuvent être construits sur des sols plus souples, les barrages en terre sont souvent moins coûteux à construire que les barrages en béton ou en acier, mais ils nécessitent des travaux d'entretien réguliers pour maintenir leur intégrité structurelle. Ils peuvent également être vulnérables aux dommages causés par les inondations, les tremblements de terre et les glissements de terrain, et peuvent donc nécessiter des mesures de sécurité supplémentaires pour prévenir les accidents^[10]. Nous distinguons deux groupes de barrages en terre qui sont :

I.3.3.1.Barrage en terre homogène

Connu sous le nom de barrage en terre non zonée, est un type de barrage construit en utilisant uniquement des matériaux de terre homogènes, tels que de l'argile, du sable, du limon ou des mélanges de ceux-ci. Contrairement aux barrages en enrochement ou en béton, les barrages en terre homogène ne font pas appel à des matériaux granulaires ou à des couches distinctes de différentes caractéristiques.

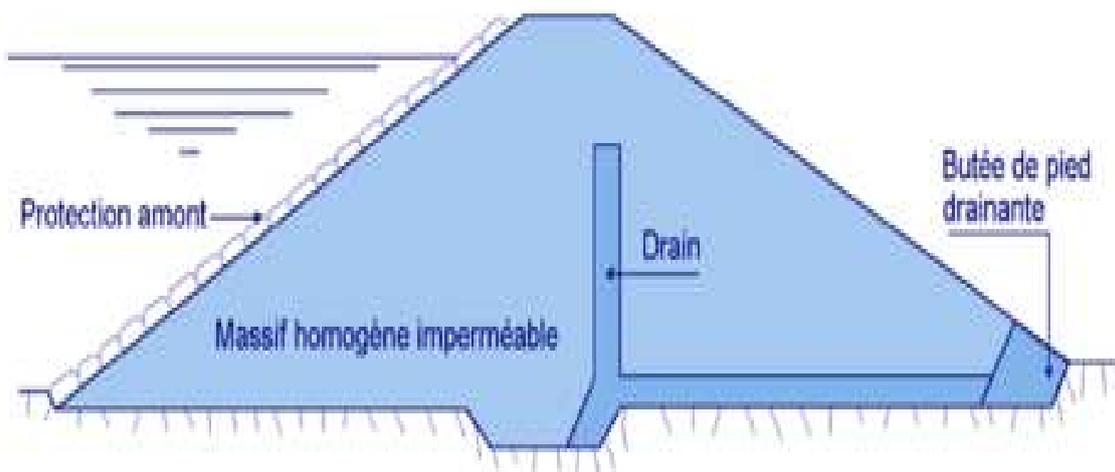


Figure I.7: Barrage en terre homogène avec drain

I.3.3.2. Barrage en terre à noyau

Appelé barrage en terre avec noyau étanche, est un type de barrage qui utilise un noyau imperméable au centre de la structure pour prévenir les fuites d'eau. Ce type de barrage est généralement construit en utilisant des matériaux de terre tels que de l'argile, du limon ou de l'argile compactée mélangée à des additifs imperméables et le noyau étanche est constitué de couches ou de sections de matériau imperméable, placées au centre du barrage dans le sens de la hauteur. Ces couches sont généralement constituées d'argile spécialement sélectionnée ou d'autres matériaux étanches. L'objectif principal du noyau étanche est d'empêcher l'eau de s'infiltrer à travers le barrage et de réduire les risques de fuites, les couches de terre de part et d'autre du noyau étanche, appelées "zones de transition", sont souvent composées de matériaux plus perméables qui permettent le drainage des eaux de percolation. Ces zones de transition aident également à répartir les charges et les forces à travers le barrage. ^[11].

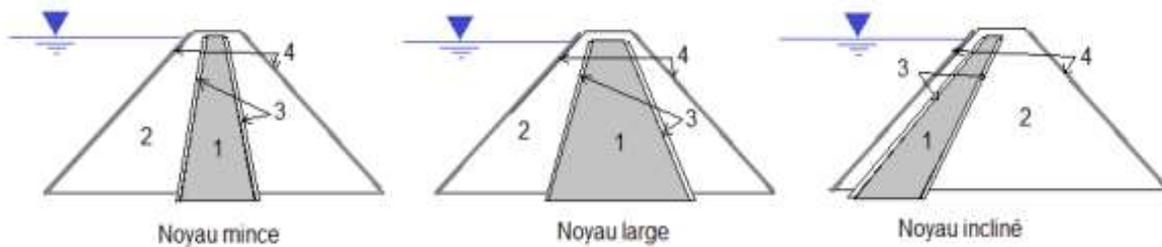


Figure. I.8 : dimensionnement de noyaux

Données de la figure :

N° de l'élément	Désignation de l'élément sur la figure
1	Noyau
2	Recharges
3	Filtres
4	Protection de talus Rip-rap

I.3.3.2.1 Barrage a noyau central

Sont utilisés dans diverses applications, notamment pour la gestion des eaux pluviales, la prévention des inondations, l'irrigation agricole et la production d'énergie hydroélectrique on la choisit lorsque la roche de fondation est imperméable, est interne.

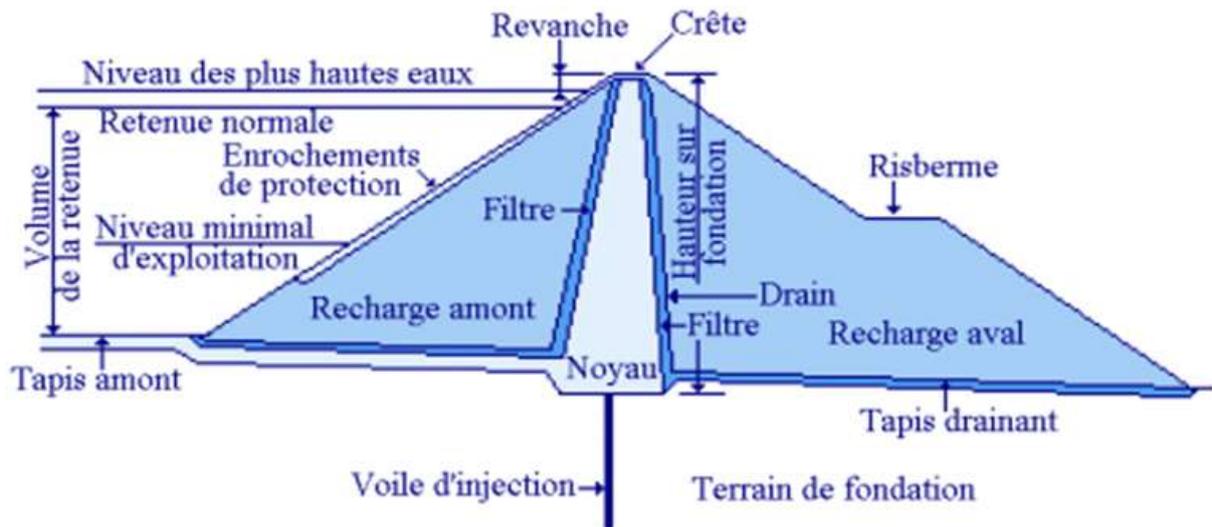


Figure I.9: barrage à noyau central ^[12].

I.3.3.2.2. Barrage a noyau incliné

Appelé barrage à noyau en pente, est un type de barrage qui utilise un noyau central incliné pour renforcer sa structure et réduire les risques de fuites d'eau et dans ce type des barrages, le noyau central est constitué de matériaux imperméables, tels que de l'argile spécialement sélectionnée ou des géotextiles, et est disposé en une pente inclinée par rapport à la verticale. Le noyau incliné est généralement placé au centre du barrage, s'étendant sur toute la hauteur de la structure^[13].

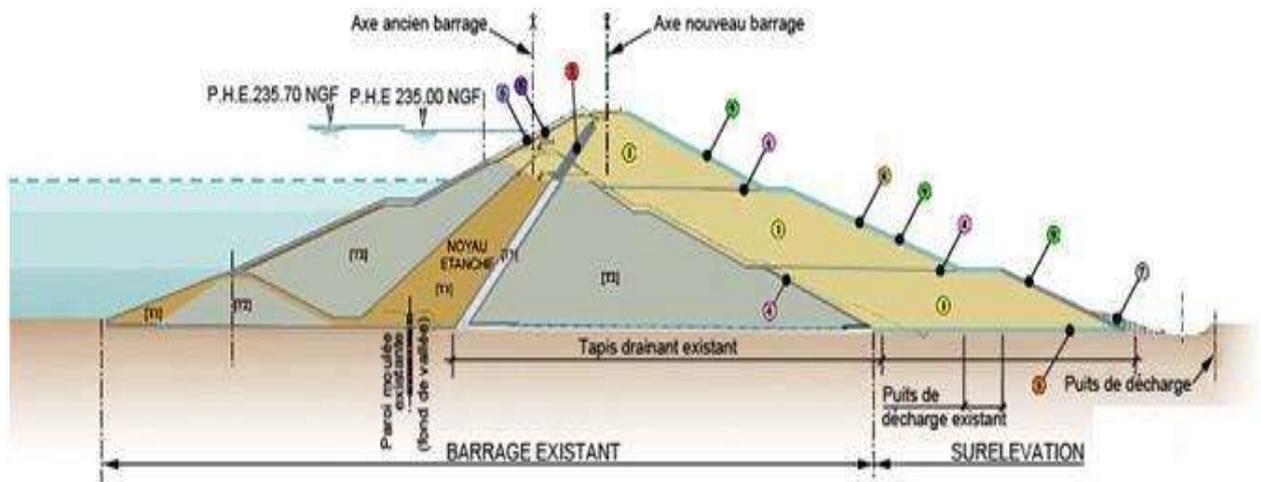


Figure I.10: Coupe du barrage à noyau incliné.

I.3.3.2.3. Barrage à masque

Composé par un massif en enrochements et aussi par une couche d'étanchéité appelé masque qui doit être souple de manière à s'adopter sans détérioration aux mouvements du massif qui se tasse sous son propre poids à cause de mouvements des fondations et l'effet de la poussée de l'eau, Le barrage à masque amont offre des avantages tels que la direction favorable de la poussée de l'eau qui renforce la stabilité en améliorant la résistance au glissement des talus. De plus, le corps d'appui du barrage est situé hors de l'eau, ce qui élimine les problèmes potentiels d'infiltration et de variations de pressions interstitielles. Cependant, il présente également des inconvénients, notamment sa sensibilité aux sollicitations dynamiques.

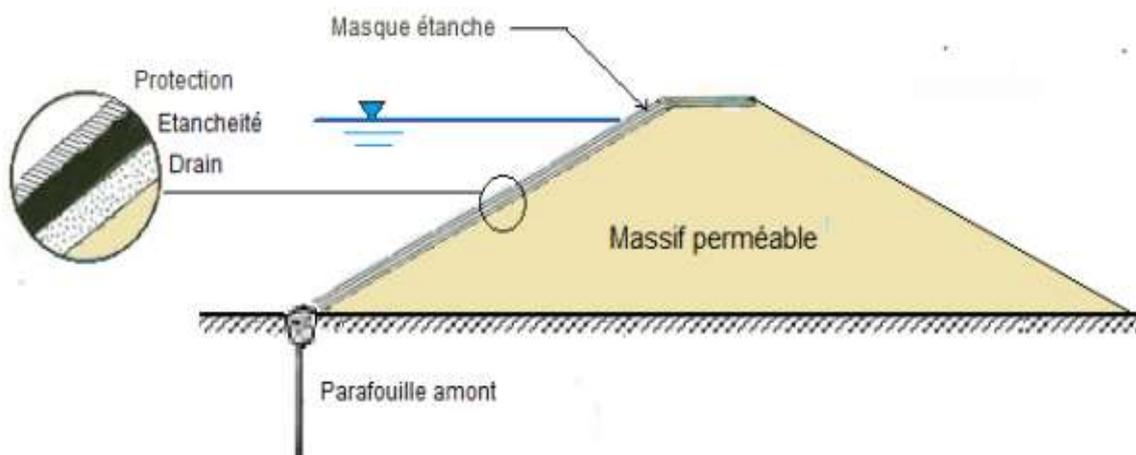


Figure. I.11 : Barrage à masque amont.

I.4. Définition du profil général des barrages en terre

Après le choix de type de barrage, l'étape de la détermination du profil de barrage est importante pour définir les éléments constituent un barrage :

I.4.1. Hauteur du barrage

La hauteur totale de la digue est déterminée en calculant la différence entre la cote du lit du cours d'eau et la cote de la crête du barrage. À cette valeur de base, on ajoute la charge maximale au-dessus du seuil du déversoir et la revanche pour obtenir la hauteur totale de la digue. ^[14].

I.4.2. Niveau normal de la retenue

La hauteur totale de l'eau est calculée en fonction de la capacité de stockage du réservoir en fonction de l'importance des pertes pouvant être dues aux fuites et à l'évaporation.

I.4.3. Niveau des plus hautes eaux

Le niveau des plus hautes eaux, également appelé niveau des hautes eaux ou niveau de crue, désigne la hauteur atteinte par les eaux lors d'une crue ou d'une inondation. Il s'agit du point le plus élevé que les eaux atteignent pendant un événement de crue.

I.4.4. Revanche

La détermination de la revanche, qui correspond à la différence de cote entre le niveau des plus hautes eaux de crue projetée et la crête nécessaire pour éviter la submersion du remblai par les vagues ^[15].

La formule de calcul de la revanche est la suivante :

$$\text{Formule de Stevenson : } H = 0,76 + 0,036 (VF)^{1/2} - 0,26(F)^{1/4}$$

avec **V** : la vitesse du vent en km/h et **F** : fetch en Km

$$\text{Formule de Gaillard : vitesse de propagation des vagues : } V_p = 1,5 + 2H$$

$$R = 0,75H + V_p^2 / 2g.$$

$$\text{Formule simplifiée } R = 1 + 0,3\sqrt{F}$$

I.4.3.1. Largeur en crête

La largeur en crête d'un barrage est effectivement dimensionnée pour assurer sa stabilité hydraulique et mécanique, en tenant compte également du type de route qui passe au-dessus. Les recommandations courantes pour la largeur en crête varient en fonction de la taille du barrage. Pour les petits barrages, une largeur en crête de 3 mètres ou plus est couramment

utilisée. Pour les digues de plus de 10 mètres de hauteur, la recommandation générale est que la largeur en crête soit égale à 1/3 de la hauteur de la digue, mais il est souvent recommandé d'avoir une largeur de 4 à 6 mètres.

Tableau 1.1 : 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)	≥ 27.5	15	12	12	8
Largeur de la partie de passage	≥ 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.4.3.2. Pente des talus :

La pente des talus d'un barrage fait référence à l'inclinaison ou à la raideur des pentes de la structure du barrage. Elle est généralement exprimée en pourcentage ou en rapport horizontal/vertical (H/V). La pente des talus est un élément important dans la conception et la stabilité du barrage. Elle détermine la forme et la géométrie de la structure et influence sa capacité à résister aux forces hydrauliques, au poids du matériau et à d'autres charges. Il convient de noter que les pentes des talus peuvent varier le long de la hauteur du barrage. Par exemple, la pente du talus amont peut être différente de celle du talus aval, en fonction des contraintes hydrauliques, géotechniques et de conception spécifiques.

Tableau I.2: Valeurs indicatives des fruits de talus (valeurs devront être vérifiées par calcul de stabilité)^[16].

Hauteur de la digue (barrage)	Type de barrage (m)	Fruit des talus	
		Amont (m ₁)	Aval (m ₂)
H < 5m	-Homogène	2.5	2
	-zoné	2	2
5 ≤ H < 10 m	-Homogène granulométrie étendue	2	2
	- Homogène à fort % d'argile	2.5	2,5
	- Zoné	2	2,5
10 ≤ H < 20 m	-Homogène granulométrie étendue	2.5	2,5
	- Homogène à fort % d'argile	3	2,5
	- Zoné	2	3
H ≥ 20	- Homogène granulométrie étendue	3	2,5
	- Zoné	3	3

I.5. Drain et filtre des barrages en terre

I.5.1. Drains et filtres

Ce qui concerne, la charge hydraulique à l'amont du barrage l'eau s'infiltré dans le massif, bien que le choix de l'implantation de l'ouvrage aient été fait de manière à limiter les débits d'infiltration et choisir les matériaux de construction.

I.5.2. Drain

Un drain est un canal ou un système de canaux qui permet d'évacuer l'eau ou les fluides à partir d'un endroit donné. Dans le contexte de la construction de barrages, les drains sont utilisés pour évacuer l'eau de la fondation et du corps du barrage, ainsi que pour réduire les pressions hydrostatiques sur les parois du barrage.

Les drains sont souvent constitués de matériaux poreux, tels que des graviers ou des pierres concassées, qui permettent à l'eau de s'écouler facilement à travers eux. Ils sont placés de manière à intercepter les nappes d'eau souterraines et à les évacuer de manière efficace vers des canaux de drainage ou des collecteurs, ils peuvent être conçus selon différentes configurations et tailles, en fonction des caractéristiques géologiques et géotechniques du site du barrage et des besoins spécifiques du projet. Des études géotechniques approfondies doivent être réalisées pour déterminer la taille, la disposition et le nombre de drains nécessaires pour garantir une évacuation efficace de l'eau et une stabilité globale de l'ouvrage, donc les drains sont des éléments importants dans la construction de barrages et dans de nombreuses autres applications, car ils permettent d'évacuer les fluides de manière efficace et de maintenir la stabilité de l'ouvrage.



Figure I.12 : drain de barrage.

I.5.3. Filtre

Un filtre de barrage est une couche de matériaux granulaires, tels que des graviers, des sables ou des géotextiles, qui est placée entre la fondation du barrage et le corps du barrage. Le filtre est conçu pour empêcher les particules fines du sol environnant de pénétrer dans la fondation du barrage, tout en permettant l'écoulement de l'eau à travers lui. Les filtres de barrage sont souvent utilisés pour protéger la fondation contre l'érosion et l'affouillement causés par les pressions hydrostatiques, ainsi que pour empêcher le colmatage des drains de fondation. Ils sont placés dans des couches successives, chacune avec une granulométrie différente, pour garantir une filtration efficace des particules fines et une résistance à l'érosion, la conception

et la taille des filtres de barrage varient en fonction des caractéristiques géologiques et géotechniques du site du barrage, ainsi que des besoins spécifiques du projet. Des études géotechniques approfondies doivent être réalisées pour déterminer la granulométrie optimale et la disposition des filtres, ainsi que pour assurer leur efficacité à long terme.

I.5.3.1. Constitution des drains et filtre

-Constitution des drains : sont constitués de matériaux poreux et perméables, tels que des graviers, des pierres concassées, des gravillons ou des sables, qui permettent l'écoulement de l'eau à travers eux. Les matériaux choisis dépendent des caractéristiques géologiques et géotechniques du site du barrage et des exigences spécifiques du projet. Ils peuvent être construits en couches successives de différents matériaux, chacune avec une granulométrie différente, pour assurer une filtration et une perméabilité efficaces. Des études géotechniques approfondies sont nécessaires pour déterminer la taille, la disposition et le nombre de drains nécessaires pour garantir une évacuation efficace de l'eau et une stabilité globale de l'ouvrage.

-Constitution des filtres : Les filtres sont des éléments importants dans la conception et la construction des barrages. Ils sont utilisés pour empêcher le lessivage des fines du matériau de la structure du barrage et pour assurer la stabilité hydraulique en permettant l'écoulement des eaux interstitielles. La constitution des filtres comprend généralement les éléments suivants, du bas vers le haut, du bas vers le haut :

1-La couche de fondation : une couche de matériaux granulaires grossiers qui est placée sur la fondation du barrage. Cette couche permet de répartir uniformément les charges du barrage sur le sol sous-jacent et de protéger la fondation contre l'érosion.

2-La couche de transition : une couche de matériaux granulaires de granulométrie intermédiaire qui est placée au-dessus de la couche de fondation. Cette couche permet de faciliter la transition de la fondation vers le corps du barrage et de réduire les différences de contraintes entre ces deux éléments.

3-La couche de filtration : une couche de matériaux granulaires de granulométrie fine qui est placée au-dessus de la couche de transition. Cette couche permet de filtrer les particules fines et de maintenir la perméabilité du filtre.

4-La couche de protection : une couche de matériaux granulaires grossiers qui est placée au-dessus de la couche de filtration. Cette couche permet de protéger la couche de filtration contre l'érosion causée par les pressions hydrostatiques.

Des études géotechniques approfondies sont nécessaires pour déterminer la granulométrie optimale et la disposition des filtres, ainsi que pour assurer leur efficacité à long terme^[17].

I.5.3.2. Types des drains et filtre dans un barrage en terre :

-Drain en tapis superficiel: un drain en tapis superficiel est utilisé pour la protection du talus aval d'un enrochement ou d'une structure similaire. Il permet le drainage des eaux de ruissellement et prévient l'érosion du talus. Cependant, contrairement aux autres types de drains, il n'est pas conçu pour abaisser la ligne de saturation ou collecter l'eau infiltrée

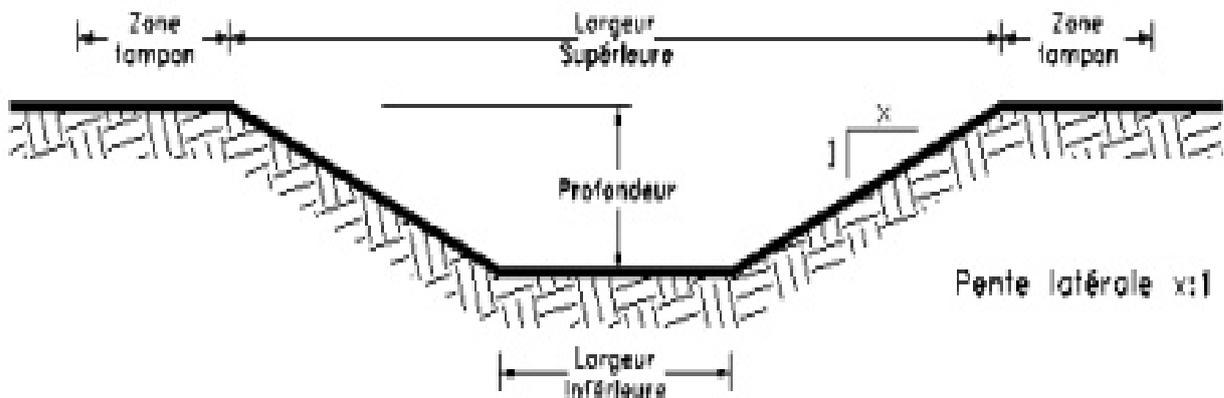


Figure I.13 : coupe transversale de drain superficiel^[18].

- **Drain horizontal (tapis interne) :** également appelé tapis interne ou drain de base, est un système de drainage utilisé dans la construction de barrages. Il consiste en un tuyau perforé disposé horizontalement à l'intérieur de la structure du barrage, entouré d'un matériau de drainage. Son rôle est de collecter et d'évacuer l'eau infiltrée à l'intérieur du barrage, réduisant ainsi les pressions interstitielles et améliorant la stabilité de la structure.

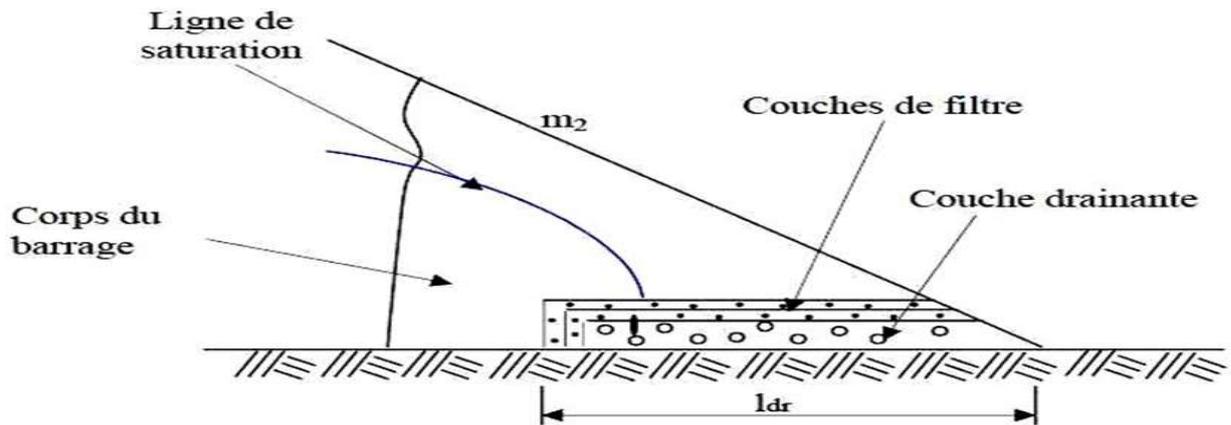


Figure I.14 : Drain tapis interne ^[19].

-Drain vertical (drain cheminée) : également appelé drain cheminée, est un élément de drainage utilisé dans la construction de barrages et d'autres ouvrages géotechniques. Il consiste en un tuyau perforé inséré verticalement dans le matériau du barrage, entouré d'un matériau de drainage. Le drain vertical permet d'éliminer l'eau accumulée à l'intérieur du barrage, réduisant les pressions interstitielles et améliorant la stabilité de la structure.

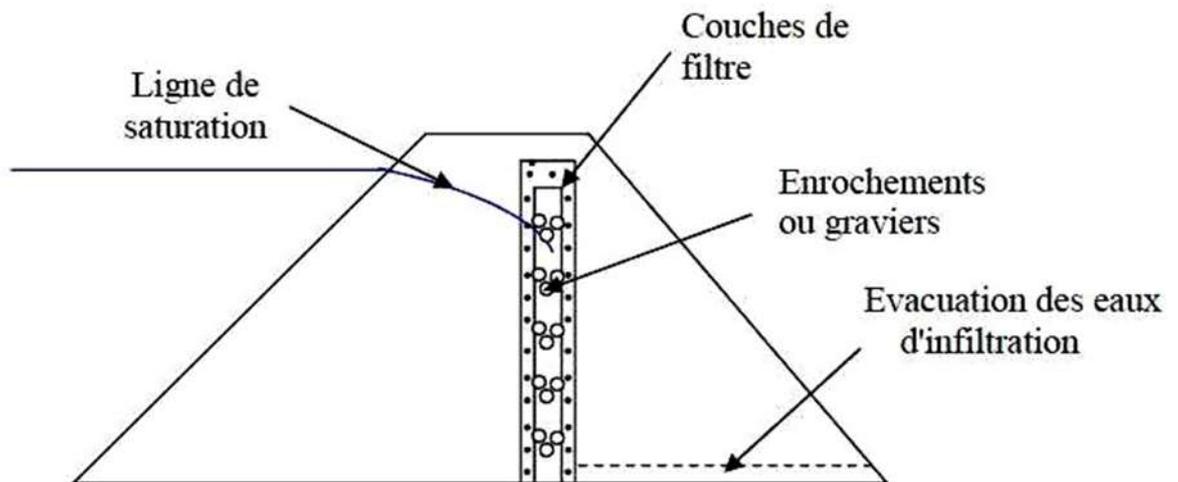


Figure I.15: Drain vertical ^[19].

-Prisme de drainage : un prisme de drainage est un système de drainage utilisé dans la construction de barrages et d'autres ouvrages géotechniques. Il est composé d'un matériau de drainage qui forme une zone perméable autour de la structure pour gérer les eaux souterraines et les pressions interstitielles. Son objectif est de contrôler les pressions interstitielles, d'éviter la saturation du sol et d'améliorer la stabilité de l'ouvrage.

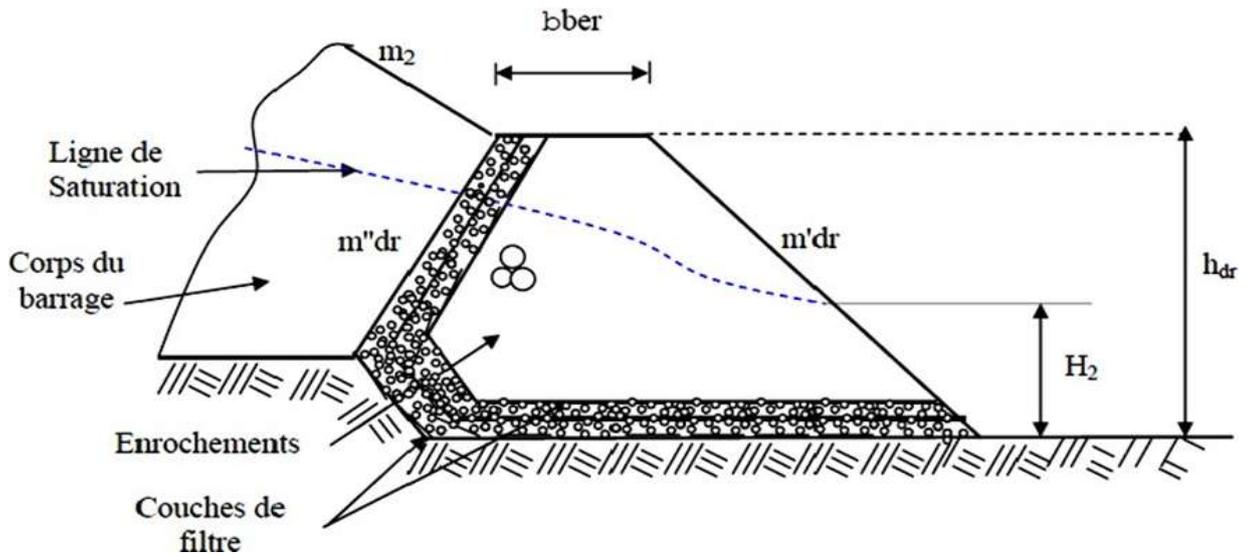


Figure I.16 : Prisme de drainage^[19].

Avec :

bber : Largeur de la berme ;

hdr : Hauteur du prisme de drainage ;

m'dr et m''dr : Pente des talus a valet et amont du prisme de drainage ;

m₂ : Pente du talus aval du barrage;

H₂ : Hauteur d'eau à l'aval du barrage.

et la Figure suivante représente un barrage à étanchéité :

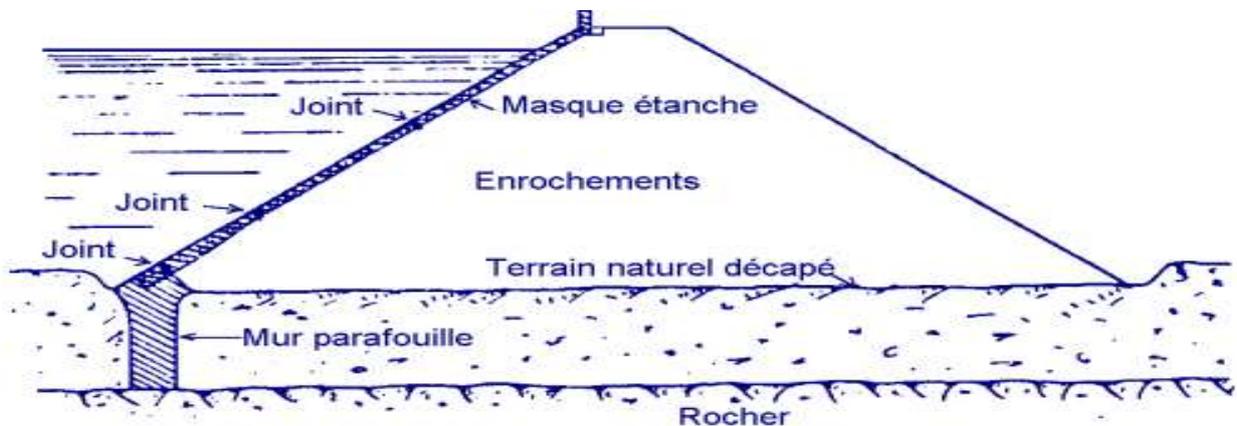


Figure I.17: Type d'un barrage à étanchéité^[20].

I.5.3.3. Disposition des drains et des filtres

La disposition des drains et des filtres doit être conçue de manière à garantir l'efficacité du drainage et la stabilité du barrage. Les drains doivent être placés de manière à intercepter les nappes d'eau souterraines et à les évacuer de manière efficace, tout en évitant les zones à faible perméabilité qui pourraient ralentir le flux d'eau, les filtres doivent être disposés de manière à garantir une filtration efficace des particules fines dans les sols environnants, tout en évitant les zones à forte perméabilité qui pourraient causer une érosion sous-jacente du barrage. En général, les filtres sont disposés en couches successives, chacune avec une granulométrie différente, afin de garantir une filtration efficace et une résistance à l'érosion et il est important de noter que la disposition des drains et des filtres doit être adaptée aux caractéristiques géologiques et géotechniques du site du barrage, ainsi qu'aux conditions hydrauliques locales, des études géotechniques et hydrauliques approfondies doivent donc être réalisées avant la conception de la disposition des drains et des filtres donc la disposition des drains et des filtres est une étape importante dans la construction d'un barrage, qui doit être conçue avec soin afin de garantir la sécurité et la stabilité de l'ouvrage.

I.5.3.4. Protection des talus :

La protection des barrages est une préoccupation majeure pour les concepteurs et les exploitants de barrages donc les talus des barrages en terre doivent être protégés des actions extérieures telles que l'érosion due aux ruissellements des eaux de pluie, l'effet de renard provoqué par le ressuyage des eaux de saturation du barrage et l'agression des vagues de la retenue du côté amont, les inondations, les tremblements de terre, les glissements les éruptions volcaniques.

a- Côté amont : la protection est atteinte par une couche d'engrochements mis sur un filtre de transition (le rip rap) qui dépend de la hauteur de la pente et des vagues peut dépasser 1 m. Les composants de l'engrochement doivent être des pierres et 50% de ces pierres doit avoir un diamètre supérieur à 20cm et pour les éléments les plus petit doit avoir un diamètre supérieure plus de 10 cm et si il n'existe pas d'engrochements disponibles on peut les remplacer par des blocs artificiels en béton.



Figure I.18 : protection d'un barrage par enrochement

b-Coté aval : la protection dans ce coté est par gazonnement qui ce réalisée après l'achèvement des travaux de réalisation

I.6. Les risques de rupture des barrages

Les barrages peuvent présenter des risques de rupture, qui peuvent avoir des conséquences désastreuses pour les personnes, les biens et l'environnement en aval. Les risques de rupture peuvent être causés par plusieurs facteurs, notamment :

-Les défaillances structurelles : des défauts de conception ou de construction, des erreurs de maintenance ou des dommages causés par des événements climatiques extrêmes peuvent causer des défaillances structurelles qui peuvent compromettre l'intégrité du barrage.

-Les déversements incontrôlés : un déversement incontrôlé peut se produire lorsque le débit de l'eau dépasse la capacité de stockage du barrage, ce qui peut entraîner une surcharge des structures du barrage et causer une rupture.

-Les glissements de terrain : ils peuvent se produire autour des barrages en remblai ou en terre, ce qui peut entraîner une déstabilisation des structures du barrage.

-Les séismes : les séismes peuvent causer des dommages aux structures du barrage, ce qui peut entraîner une rupture.

En cas de rupture de barrage, les conséquences peuvent être catastrophiques. Les dégâts peuvent inclure des inondations soudaines, des pertes de vies humaines, des destructions de

biens matériels et des impacts sur l'environnement en aval du barrage. Pour minimiser les risques de rupture de barrage, il est essentiel de mettre en place des mesures de sécurité appropriées, telles que des systèmes de surveillance en temps réel, des plans d'urgence et des procédures de maintenance régulières ^[21].

Il existe trois causes de rupture : cause technique, cause naturel et cause humaine

I.6.1.Cause technique

Elles peuvent être vieillissement des installations ou un défaut fonctionnement des vannes permettant l'évacuation des eaux aussi elle peut être vices de conception, de construction ou de matériaux.

I.6.2.Cause humain

Des activités humaines telles que des travaux de construction ou des activités minières à proximité du barrage peuvent causer des mouvements de terrain ou des vibrations qui peuvent affecter la stabilité du barrage aussi comme des erreurs des calculs ou d'exécution ou exploitation comme peuvent être Insuffisance des études préalables.

I.6.3.Cause naturelle

Tels que des glissements de terrain ou des séismes, des mouvements de terrain peuvent se produire autour du barrage et causer des déformations dans les structures du barrage. Les séismes peuvent également causer des fissures et des déformations dans les structures du barrage, augmentant ainsi le risque de rupture aussi Des conditions climatiques extrêmes comme les précipitations abondantes ou les fontes de neige peuvent augmenter le niveau ede l'eau dans le réservoir du barrage et augmenter la pression exercée sur les structures du barrage. Si cette pression dépasse la capacité de résistance du barrage, il peut se rompre.

I.7.Type des ruptures

Les ruptures de barrages peuvent être classées en deux types principaux : les ruptures partielles et les ruptures totales.

-Ruptures partielles : Les ruptures partielles sont des fissures ou des brèches dans les structures du barrage qui permettent à l'eau de s'écouler. Ces ruptures peuvent être causées par des problèmes de construction ou de maintenance, des conditions météorologiques extrêmes, des séismes ou d'autres facteurs. Les ruptures partielles peuvent entraîner des inondations locales et des dommages matériels importants, mais elles peuvent souvent être réparées avant que la situation ne devienne critique.

-Ruptures totales : Les ruptures totales se produisent lorsque le barrage se rompt complètement, libérant toute l'eau contenue dans le réservoir. Ces ruptures peuvent être causées par des défaillances structurelles, des conditions climatiques extrêmes, des séismes, des glissements de terrain ou d'autres facteurs. Les ruptures totales peuvent causer des inondations soudaines catastrophiques, entraînant des pertes de vies humaines, la destruction de biens matériels et des impacts environnementaux graves en aval du barrage. Il est important de noter que la rupture d'un barrage peut également entraîner des ondes de submersion ou des inondations en cascade, où l'eau peut dévaler à grande vitesse et causer des dommages importants même à des endroits éloignés du barrage initial. Les conséquences des ruptures de barrage sont donc très graves et doivent être prises au sérieux.



Figure I.19: Rupture de barrage

I.8. Les avantages et les particularités des barrages en terre

Les barrages en terre sont des structures de barrage construites en utilisant des matériaux naturels tels que le sol, les roches, les graviers et les sables. Voici quelques avantages et particularités des barrages en terre :

Avantage :

-Coût : les barrages en terre sont généralement moins coûteux à construire que les barrages en béton ou en acier ;

-Flexibilité : les barrages en terre peuvent être construits dans des formes et des tailles variées en fonction de l'emplacement et des conditions du terrain ;

-Éco-responsabilité : les barrages en terre sont plus écologiques que les barrages en béton car ils utilisent des matériaux naturels qui ne nécessitent pas d'être extraits et transportés sur de longues distances ;

-Stabilité : les barrages en terre peuvent être conçus pour résister aux tremblements de terre et aux glissements de terrain en utilisant des techniques de conception appropriées.

Particularités :

-Les barrages en terre nécessitent un matériau de qualité pour assurer leur stabilité et leur sécurité. Les caractéristiques géologiques et géotechniques du sol doivent être soigneusement étudiées pour garantir la qualité et la résistance du matériau utilisé pour la construction du barrage ;

-Les barrages en terre nécessitent une attention particulière en matière de drainage et de filtration pour éviter les fuites et les voies d'eau qui pourraient endommager le barrage. Des techniques de conception appropriées, telles que les filtres et les drains, doivent être utilisées pour garantir l'intégrité et la sécurité du barrage ;

-Les barrages en terre ont une durée de vie limitée par rapport aux barrages en béton et en acier. Des efforts doivent être faits pour entretenir et inspecter régulièrement les barrages en terre pour éviter les défaillances prématurées et les risques pour la sécurité ;

En résumé, les barrages en terre sont une option populaire pour les projets de barrage en raison de leur flexibilité, de leur coût et de leur caractère écologique, mais ils nécessitent une attention particulière en matière de conception, de construction, d'entretien et d'inspection pour garantir leur sécurité et leur durabilité.

I.9.Fondations des barrages en terre

Les fondations des barrages en terre sont une partie critique de la construction du barrage. Les fondations doivent être conçues pour résister aux forces hydrostatiques et hydrauliques, ainsi qu'aux forces sismiques et gravitaires. Voici quelques-unes des méthodes couramment utilisées pour la construction de fondations pour les barrages en terre :

1-Excavation et décapage : Les fondations sont généralement construites en excavant la zone de fondation jusqu'à atteindre une couche de sol stable ou une roche saine. Toute couche de sol instable ou imprégnée d'eau doit être décapée et remplacée par un matériau plus résistant.

2-Compactage : Le compactage du sol est une étape importante dans la construction de fondations pour les barrages en terre. Le sol doit être compacté avec soin pour réduire les espaces vides et les pores dans le matériau.

3-Construction de structures de confinement : Les structures de confinement sont des murs en béton ou en acier qui sont construits pour contenir les matériaux de la fondation. Les structures de confinement peuvent être utilisées pour créer des zones étanches à l'eau pour empêcher l'eau de s'infiltrer dans la fondation.

4-Drainage : Un système de drainage doit être installé pour évacuer l'eau de la fondation. Cela peut être réalisé en installant des canalisations de drainage ou en utilisant des matériaux de drainage tels que les graviers.

5-Préparation de la surface de la fondation : La surface de la fondation doit être préparée avant de poser les matériaux de la fondation. Les roches saillantes ou les débris doivent être enlevés pour assurer une surface plane et uniforme.

6-Utilisation de matériaux spéciaux : Dans certains cas, des matériaux spéciaux tels que des géotextiles, des géo-membranes ou des couches de sol traitées chimiquement peuvent être utilisés pour améliorer la stabilité et l'étanchéité de la fondation.

La construction de fondations pour les barrages en terre est une tâche complexe qui nécessite une planification et une exécution minutieuses pour garantir la stabilité et la sécurité du barrage. Les techniques couramment utilisées pour la construction de fondations pour les barrages en terre comprennent l'excavation et le décapage, le compactage, la construction de structures de confinement, le drainage, la préparation de la surface de la fondation et l'utilisation de matériaux spéciaux.

I.9.1.Renforcement des fondations :

Le renforcement des fondations des barrages est une étape importante pour assurer la stabilité et la durabilité à long terme du barrage. Il peut être nécessaire d'envisager le renforcement des fondations des barrages pour plusieurs raisons, telles que :une augmentation de la charge du barrage due à la croissance des populations et des besoins en eau , l'identification de défauts géologiques dans les fondations, tels que des zones de faiblesse ou des failles qui peuvent compromettre la stabilité du barrage et des changements dans les conditions environnementales, tels que des tremblements de terre ou des inondations, qui peuvent affecter la stabilité des fondations.

Les techniques courantes utilisées pour renforcer les fondations des barrages :

1-Injections de ciment : Les injections de ciment sont utilisées pour renforcer les zones faibles dans les fondations. Cette technique consiste à injecter un mélange de ciment et d'eau dans le sol pour le renforcer ;

2-Jet grouting : Le jet grouting est une technique qui consiste à utiliser une buse pour injecter un mélange de ciment et d'eau dans le sol à haute pression. Cette technique est utilisée pour créer des colonnes de sol renforcées qui peuvent supporter la charge du barrage ;

3-Pieux : Les pieux sont des éléments de fondation verticaux qui sont enfoncés dans le sol pour renforcer la capacité portante de la fondation. Les pieux peuvent être en béton ou en acier et peuvent être utilisés en combinaison avec d'autres techniques de renforcement ;

4-Ajout de matériaux : Des matériaux tels que des couches de sol traitées chimiquement ou des géotextiles peuvent être ajoutés aux fondations pour renforcer leur capacité portante.

I.9.2.L'étanchéité en fondation

L'étanchéité en fondation est consistée à empêcher l'eau de s'infiltrer à travers les fondations et d'endommager la structure du barrage. Les barrages en terre sont particulièrement sensibles à l'infiltration d'eau car le sol peut être perméable et la structure peut être sujette à la déformation. Et parmi les techniques couramment utilisées pour assurer l'étanchéité en fondation des barrages :

1-Étanchéité à base de bentonite : La bentonite est un matériau argileux gonflant qui peut être utilisé pour sceller les fondations des barrages. Elle est souvent mélangée à de l'eau et injectée dans le sol pour former une barrière étanche ;

2-Étanchéité à base de géo-membrane : Les géo-membranes sont des matériaux synthétiques en PVC ou en polyéthylène qui peuvent être utilisés pour recouvrir les fondations des barrages et former une barrière étanche. Les géo-membranes sont souvent utilisées en combinaison avec une couche de bentonite pour une étanchéité renforcée ;

3-Étanchéité à base de béton projeté : Le béton projeté est une technique qui consiste à projeter du béton sur une surface pour la recouvrir et la rendre étanche. Cette technique peut être utilisée pour créer une étanchéité sur les fondations des barrages;

4-Étanchéité à base de produits de scellement : Des produits de scellement tels que des mortiers, des résines époxy ou des produits d'injection peuvent être utilisés pour colmater les fissures et les joints dans les fondations des barrages afin d'assurer une étanchéité renforcée.

I.10.Conclusion

En conclusion, les barrages sont des ouvrages hydrauliques qui ont une importance considérable dans le développement économique et social de nombreuses régions du monde. Ils permettent de stocker l'eau pour l'irrigation, la production d'électricité, la régulation des cours d'eau et la protection contre les inondations. Cependant, leur construction, leur maintenance et leur utilisation peuvent présenter des risques et des défis importants. La sécurité des barrages doit être prise en compte tout au long de leur cycle de vie, depuis leur conception jusqu'à leur démantèlement, en passant par leur construction, leur exploitation et leur maintenance. Les risques associés aux barrages peuvent être réduits grâce à des mesures de prévention et de gestion des risques appropriées, telles que la surveillance régulière de l'état du barrage, la mise en place de plans d'urgence et de contingence et la formation des intervenants sur la sécurité des barrages. Les barrages sont des infrastructures essentielles pour de nombreuses régions du monde, mais leur utilisation doit être responsable et s'accompagner d'une gestion rigoureuse des risques pour garantir la sécurité des populations et des écosystèmes environnants.

CHAPITRE 2

Méthodes de Stabilité des Barrages

II.Méthodes de Stabilité des Barrages

II.1.Introduction

La stabilité d'un barrage en remblai dépend de la capacité de ses talus à résister aux glissements, quelles que soient les sollicitations auxquelles il peut être soumis. Il est essentiel d'étudier la stabilité du barrage, car cela permet principalement de définir sa géométrie et de dimensionner le drainage. Ces facteurs déterminent le volume et la nature des matériaux nécessaires, ce qui a un impact direct sur le coût total de l'aménagement. De plus, il est évident qu'un barrage mal dimensionné est instable, ce qui compromet la sécurité des populations environnantes. Cela peut également entraîner des travaux d'entretien, tels que le renforcement des talus, voire une reconstruction complète.

II.2.Différents types d'instabilités de pentes

Il existe différentes classifications des mouvements qui affectent les pentes, basées sur divers critères tels que la morphologie, la cinématique et les propriétés des matériaux. Ces mouvements varient en fonction de leur dimension, de leur évolution et de leur comportement il existe trois famille est le principal phénomène de déplacement important de matériaux sur les talus et les pentes, il est possible de distinguer ^[22]:

1-Glisement de terrain : Cela se produit lorsque des matériaux tels que le sol, la roche et la végétation glissent le long d'une pente. Les facteurs tels que la pente, la texture des matériaux et la saturation en eau du sol peuvent influencer la probabilité d'un glissement de terrain.

2-Éboulement : Cela se produit lorsqu'un bloc de roche ou de sol se détache de la pente et tombe vers le bas. Cela peut être causé par des processus tels que l'érosion, les vibrations dues à l'activité humaine, les tremblements de terre, ou les changements climatiques.

3-Coulée de boue : Cela se produit lorsqu'une grande quantité de matériaux comme la boue, les pierres, les roches et l'eau se déplacent rapidement sur une pente. Les précipitations abondantes, les changements brusques de température, ou la fonte des neiges peuvent causer une coulée de boue.

4-Chutes de blocs : Cela se produit lorsqu'un grand bloc de roche se détache et tombe sur une pente. Les chutes de blocs sont souvent causées par des changements dans la composition géologique, l'érosion, les vibrations et l'activité sismique.

5-Solifluxion : Cela se produit lorsque le sol gorgé d'eau se déplace lentement le long d'une pente. Les sols gelés sont particulièrement vulnérables à la solifluxion.

Ces différents types d'instabilités de pentes peuvent être dangereux pour les populations vivant à proximité et peuvent causer des dommages importants aux infrastructures et aux habitations. Les experts en géologie et en génie civil travaillent ensemble pour évaluer les risques d'instabilité de pentes et prendre des mesures préventives pour minimiser les risques pour la sécurité publique [23].

II.3. Phases de stabilité des barrages

Les phases de stabilité des barrages sont les différentes étapes de la vie d'un barrage au cours desquelles la stabilité de la structure doit être assurée. Ces phases peuvent varier en fonction du type de barrage, de sa conception, de sa construction et de son environnement. Les principales phases de stabilité des barrages :

1-Phase de construction : Cette phase commence dès la conception du barrage et se poursuit jusqu'à la fin des travaux de construction. Pendant cette phase, la stabilité du barrage doit être maintenue à tout moment pour éviter tout risque d'effondrement ou de rupture.

2-Phase de remplissage initial : Après la construction, le barrage doit être rempli d'eau pour la première fois. Pendant cette phase, la stabilité du barrage peut être affectée par l'augmentation de la pression de l'eau et la présence d'éléments tels que les fuites et les tassements différentiels.



Figure.II.1 : barrage de la Grand Renaissance vu ici en décembre 2019, a commencé en 2011^[24].

3-Phase de fonctionnement normal : Après la phase de remplissage initial, le barrage entre dans une phase de fonctionnement normal. Pendant cette phase, la stabilité du barrage doit être surveillée régulièrement pour détecter tout signe de défaillance, tels que les mouvements de terrain, l'érosion interne ou les fuites.

4-Phase d'entretien et de réparation : Au fil du temps, le barrage peut subir des dommages ou des défauts qui peuvent compromettre sa stabilité. Pendant cette phase, des travaux d'entretien et de réparation doivent être effectués pour maintenir la stabilité du barrage et prolonger sa durée de vie.

5-Phase de démantèlement :. Pendant cette phase, la stabilité du barrage doit être maintenue pour éviter les ruptures ou de pollution de l'environnement. Pour garantir la sécurité des individus et de l'environnement, il est impératif de réaliser les travaux de démantèlement en respectant les normes et réglementations en vigueur ^[25].

II.4.Problèmes posés

Pour résoudre un problème de stabilité en général, il est effectivement nécessaire de prendre en compte les équations d'équilibre et les relations constitutives qui décrivent le comportement du sol. Les sols sont des matériaux complexes et leur comportement peut varier en fonction de leur état de saturation et de la présence de plusieurs phases (eau, air, solides). Lorsque le sol est sec ou lors d'analyses en conditions drainées, il est possible de simplifier les équations en considérant le sol comme un système monophasique. Cependant, dans la plupart des cas, le sol est au moins biphasique lorsqu'il est saturé, ce qui rend les équations d'équilibre plus complexes à résoudre. Pour simplifier les équations, il est courant d'utiliser des modèles constitutifs simplifiés. Par exemple, le modèle rigide parfaitement plastique est souvent utilisé, où la résistance du sol est exprimée par les paramètres de cohésion (c) et d'angle de frottement interne (ϕ), qui sont considérés constants pour le matériau dans son état plastique. Dans ce cas, le critère de rupture de Mohr-Coulomb est souvent utilisé pour déterminer les conditions de rupture. ^[26].

II.4.1.Les infiltrations

II.4.1.1.Définition de l'infiltration

Les infiltrations dans un barrage en terre peuvent être un problème important car elles peuvent compromettre la stabilité de la structure et augmenter les risques de rupture. Les barrages en terre sont construits en compactant des couches de terre pour former une digue qui peut stocker l'eau. Cependant, le sol n'est pas toujours étanche, ce qui permet aux eaux souterraines de s'infiltrer dans la digue, ils peuvent être causés par des fissures dans le sol, une porosité élevée du sol, une perte de compacité du sol due à l'érosion, ou des défauts dans la conception du barrage. Les infiltrations peuvent également être causées par des fluctuations de niveaux d'eau, qui peuvent entraîner des pressions hydrauliques et pousser l'eau à travers les fissures du sol ^[27]. Les infiltrations peuvent être détectées par des méthodes de surveillance telles que

la mesure des niveaux d'eau souterraine, l'observation de l'écoulement de l'eau à la surface du barrage ou la surveillance de la déformation de la digue. Pour remédier aux infiltrations, il est important de prendre des mesures préventives dès la conception du barrage. Cela peut inclure des méthodes de construction appropriées, telles que le compactage du sol, l'utilisation de membranes étanches, l'installation de drains et de puits de décompression pour évacuer l'eau souterraine. Les systèmes de drainage doivent également être maintenus en bon état pour éviter l'accumulation d'eau et la saturation du sol.

Si des infiltrations sont détectées, des mesures correctives peuvent être prises, telles que la réparation des fissures, la consolidation du sol, ou l'installation de drains pour évacuer l'eau infiltrée. La surveillance régulière des infiltrations est également importante pour prévenir les problèmes futurs et garantir la stabilité du barrage.



Figure II.2 : Infiltration dans le sol

II.4.1.2. Etude des infiltrations dans un barrage en terre

Est une étape importante pour évaluer la stabilité et la durabilité de la structure. Les infiltrations d'eau peuvent affecter la stabilité des matériaux constitutifs du barrage, augmenter les pressions interstitielles, provoquer des mouvements du sol et causer des problèmes tels que l'érosion interne, la perte de résistance du sol, la détérioration des matériaux.

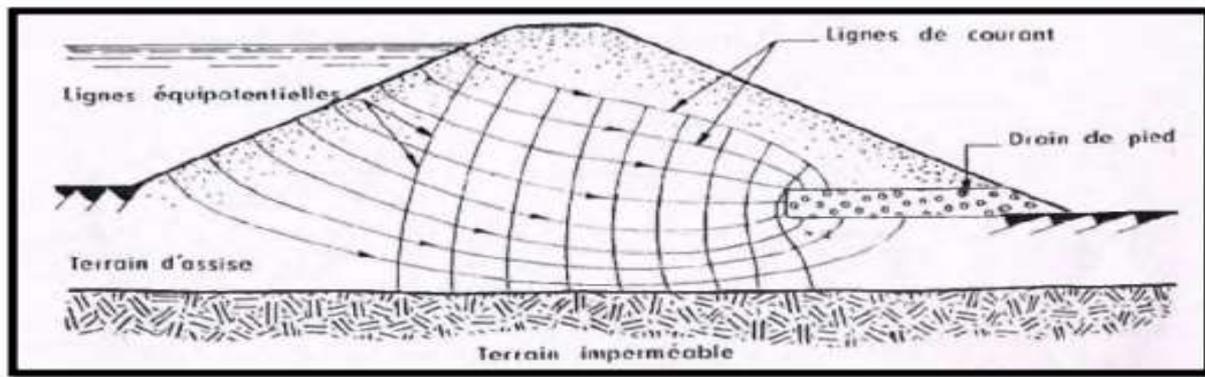


Figure II.3: Trajectoire de l'eau à travers le barrage

Le phénomène de l'infiltration doit être abordé sous trois angles différents qui sont [28]:

- La ligne phréatique du barrage, qui sépare la partie saturée et la partie sèche ou humide du barrage.

- La pression interstitielle est la pression qui existe dans l'eau interstitielle à un point donné du massif de sol. Elle peut être positive dans le cas de l'eau libre, c'est-à-dire lorsque l'eau peut s'écouler librement à travers les pores du sol, ou elle peut être négative dans le cas de l'eau capillaire.

- Le débit de fuite dû aux infiltrations peut être estimé en utilisant le concept des lignes de courant. Les lignes de courant sont des lignes imaginaires.

L'étude de l'infiltration peut être déterminée par des calculs numériques avec plusieurs méthodes représentées dans :

- Méthodes graphiques : Les méthodes simplifiées font appel à des approximations et à des propriétés graphiques du réseau d'écoulement pour effectuer les calculs.

- Méthodes analogiques : méthodes électriques et magnétiques

- Méthodes de simulation numérique : est la méthode d'Euler où l'on assimile la tangente et la courbe à condition que la base ne soit pas trop grande [28]

II.4.2. Évaluation de la ligne de saturation par la méthode de Kozeny

Dans une coupe transversale, la ligne de saturation est une surface où la pression est équivalente à la pression atmosphérique.

1- Pour un barrage homogène sans drainage dans un sol imperméable:

Kozeny a démontré que dans les barrages en remblai homogènes non drainés, le milieu de la ligne de saturation peut être comparé à une parabole sur l'axe horizontal de foyer O au bas de la face aval du barrage. L'équation de cette parabole s'écrit :

$$y^2 - 2y y_0 - 2x y_0 = 0 \quad \text{avec :} \quad y_0 = x = \sqrt{h^2 + d^2} - d$$

h : hauteur du niveau normal de l'eau

d : distance horizontale entre l'axe qui passe par la limite du tapis et la verticale qui passe par le point (0.7b)

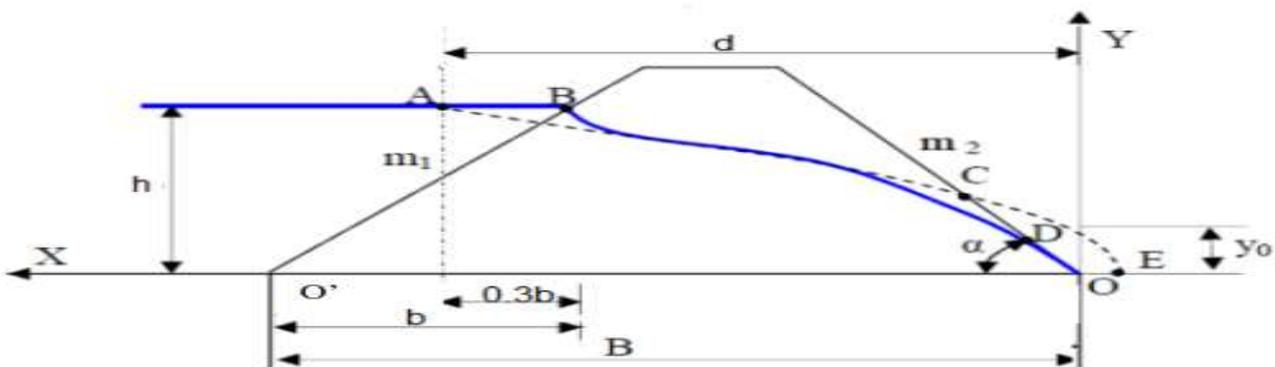


Figure.II.4: Ligne de saturation (barrage homogène sans drain sur sol imperméable)

2-Ligne de saturation pour un barrage homogène avec drain :

En générale, les drains sont faites dans les barrages pour déminer e la ligne de saturation dans le digue.

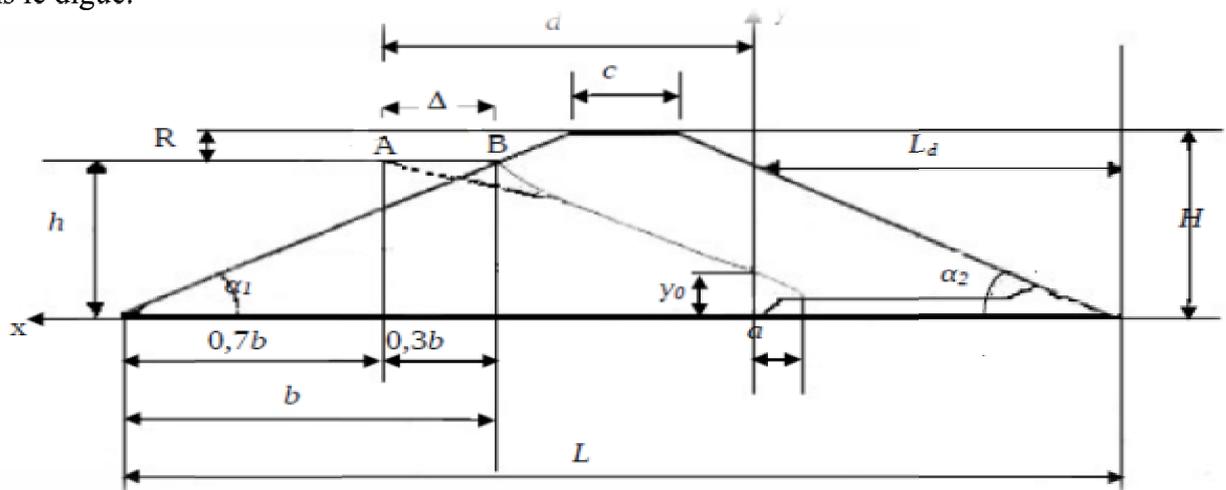


Figure.II.5: Ligne de saturation (barrage homogène avec drain sur sol imperméable)

Pour tracer la ligne de saturation on doit calculer $y = f(x)$ par l'équation

$$\sqrt{h^2 - (h^2 - h'^2) \frac{x}{L'}}$$

Avec : $h' = \sqrt{h^2 + d^2} - d$

$L = L - b - L_t$ et

h : hauteur du niveau normal de l'eau.

L : l'emprise du barrage.

$L_t (L)$: longueur du couche de drain

d : distance horizontale entre l'axe qui passe par la limite du tapis de drain et la verticale qui passe par le point (0.7b).

b : la projection horizontale de la partie mouillée du talus amont.

L' : distance horizontale entre le point B et l'axe qui passe par la limite du drain

$a = h'/3$ [29]

II.4.3.Écoulements dans un barrage en terre

Les écoulements dans un barrage en terre peuvent se produire lorsque l'eau retenue dans le réservoir du barrage s'infiltré dans le sol sous-jacent ou s'écoule le long de la surface de la digue elles peuvent être causés par des pressions hydrauliques excessives, des fissures dans la digue, une porosité élevée du sol, une perte de compacité du sol due à l'érosion, ou des défauts dans la conception du barrage, ils peuvent être classés en deux types les écoulements internes et les écoulements externes. Les écoulements internes se produisent à l'intérieur de la digue et peuvent être causés par une saturation excessive du sol. Les écoulements externes se produisent sur la surface de la digue et peuvent être causés par des précipitations abondantes ou des écoulements de surface, Les écoulements peuvent être détectés par des méthodes peuvent être classées comme méthodes expérimentales, analytiques et numériques, pour remédier aux écoulements, il est important de prendre des mesures préventives dès la conception du barrage. Cela peut inclure l'utilisation de méthodes de construction appropriées, telles que le compactage du sol, l'utilisation de membranes étanches, l'installation de drains et de puits de décompression pour évacuer l'eau souterraine. Les systèmes de drainage doivent également être maintenus en bon état pour éviter l'accumulation d'eau et la saturation du sol [11].

II.4.4. Glissement dans les barrages

Le glissement dans les barrages fait référence à un phénomène où la masse de terre ou de roche sur laquelle le barrage est construit se déplace de manière non contrôlée, entraînant des risques de rupture ou d'endommagement du barrage lui-même. Les glissements peuvent être causés par différents facteurs notamment :

1-Instabilité géologique : Certains sites de construction de barrages peuvent présenter une géologie instable, telle que des sols argileux ou des roches fissurées. Ces conditions peuvent entraîner un affaissement ou un glissement du sol sous l'effet des forces gravitationnelles.

2-Saturation du sol : Lorsque le sol est saturé en eau, sa capacité à supporter la charge du barrage peut être réduite, ce qui peut entraîner un glissement. Cela peut se produire en raison de fortes précipitations, de fuites dans le barrage ou d'une mauvaise gestion des eaux de surface et des eaux souterraines.

3-Tremblements de terre : Les séismes peuvent provoquer des mouvements du sol qui peuvent compromettre la stabilité des barrages. Les forces sismiques peuvent déstabiliser le sol sous le barrage et déclencher des glissements.

4-Conception inadéquate : Une conception déficiente du barrage peut également contribuer aux glissements. Des erreurs dans la conception, telles qu'une évaluation incorrecte de la stabilité du sol, des calculs de charge inappropriés ou des défauts de construction, peuvent entraîner des défaillances structurelles et des glissements.

5-Érosion : L'érosion progressive du sol autour du barrage, causée par les eaux de surface ou les fuites, peut affaiblir le terrain et entraîner un glissement.

Pour prévenir les glissements dans les barrages, il est essentiel de réaliser des études géotechniques approfondies lors de la conception et de la construction du barrage. Ces études permettent d'évaluer la stabilité du sol et de prendre les mesures appropriées pour renforcer la structure en conséquence.

De plus, la surveillance continue des barrages est cruciale pour détecter tout signe de mouvement ou de déformation du sol. Des capteurs géotechniques et des dispositifs de surveillance sont utilisés pour mesurer les changements de pression, de déformation ou de niveau d'eau, ce qui permet d'alerter rapidement en cas de problèmes potentiels.

II.4.5. Tassement des barrages

Le tassement des barrages se produit principalement en raison de la compression du sol de fondation sous l'effet du poids de la structure du barrage et de l'eau retenue. Voici les principales étapes par lesquelles le tassement se produit :

1-Construction initiale : Lors de la construction d'un barrage en terre, le sol de fondation est généralement excavé pour créer une surface de fondation solide. Ensuite, des couches de matériaux de remblai, souvent composées de sols compactés, sont placées et compactées pour former la structure du barrage. Au cours de cette phase, le sol de remblai est densifié et les vides d'air sont éliminés, ce qui peut initier un tassement initial.

2-Mise en eau : Une fois la construction terminée, le barrage est mis en eau. L'accumulation d'eau crée une charge supplémentaire sur le sol de fondation et les matériaux du barrage. Cette charge provoque une compression supplémentaire du sol de fondation, ce qui entraîne un tassement supplémentaire.

3-Consolidation primaire : Dans les premiers mois ou les premières années après la mise en eau, le tassement est principalement dû à la consolidation primaire. Pendant cette phase, les particules de sol se réorganisent sous l'effet des charges appliquées, ce qui entraîne une compression progressive du sol.

4-Consolidation à long terme : Après la consolidation primaire, un tassement à long terme plus lent se produit pendant de nombreuses années, voire des décennies. Ce tassement à long terme est généralement dû à la compression continue du sol de fondation sous l'effet de la charge permanente du barrage et de l'eau retenue.

II.5. Définition du facteur de sécurité F_s

Le facteur de sécurité (F_s) est une mesure de la marge de sécurité dans la conception d'une structure ou d'un système. Il est défini comme le rapport entre la charge maximale qu'un système ou une structure peut supporter avant de subir une défaillance et la charge de travail ou la charge de service pour laquelle il a été conçu, le facteur de sécurité (F_s) est utilisé pour garantir la sécurité et la fiabilité des structures ou des systèmes. Dans les domaines de l'ingénierie civile et de la construction, le facteur de sécurité est souvent utilisé pour concevoir des structures telles que des ponts, des barrages, des bâtiments, des routes, des tunnels. Un facteur de sécurité plus élevé indique une plus grande marge de sécurité dans la conception de la structure ou du système. Cela signifie que la structure ou le système est capable de supporter des charges supplémentaires au-delà de la charge de travail ou de la charge de

service pour laquelle il a été conçu, ce qui réduit le risque de défaillance ou de rupture. En revanche, un facteur de sécurité plus faible indique une marge de sécurité plus faible et une plus grande probabilité de défaillance ou de rupture de la structure ou du système ^[32]. Le principe du calcul de la stabilité des pentes est de déterminer le facteur de sécurité (Fs). Parmi les différentes définitions possibles du facteur de sécurité, chacune présente ses bénéfices et ses désavantages. :

1-Rapport de grandeurs : $FS = \frac{\sum \text{moments des forces résistant au mouvement}}{\sum \text{moments des forces provoquant le mouvement}}$ (définition de Fröhlich)

2-Rapport des forces : $FS = \frac{\tau_{max}}{\tau}$ avec

τ_{max} = résistance au cisaillement maximale mobilisable et

τ = résistance de cisaillement nécessaire à l'équilibre

3- Rapport de moments : $f_s = \frac{\text{effort résistant}}{\text{effort moteur}}$

4- $FS = \frac{H_c}{H}$ avec H_c = hauteur critique et H = hauteur réel

L'application de ces différentes définitions conduit à des valeurs différentes du facteur de sécurité pour une même géométrie, ce qui signifie que chaque définition peut aboutir à une valeur différente de 1 au point de rupture ($F = 1$) ^[33].

II.5.1. Choix des facteurs de sécurité

Pour assurer une sécurité adéquate, il est important que les forces résistantes à la surface de rupture potentielle soient supérieures aux forces motrices. Dans ce contexte, on considère généralement qu'une stabilité suffisante est assurée lorsque le facteur de sécurité (Fs) est supérieur à 1 ($F_s > 1$), le tableau ci-dessous présente des valeurs typiques de facteur de sécurité (FS) en fonction de l'importance de l'ouvrage et des conditions environnementales spécifiques :

Tableau 2.1 : Valeurs de F_S en fonction de l'importance de l'ouvrage^[34].

F_S	État de l'ouvrage
<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

II.5.2.Méthodes de calcul à la rupture

L'analyse de stabilité d'un barrage repose sur des calculs à la rupture dans une surface bidimensionnelle. On suppose que la pente est infiniment longue et que la surface de rupture potentielle est cylindrique. Dans cette analyse, on compare les contraintes de cisaillement σ le long de la surface de rupture potentielle avec la résistance maximale au cisaillement du sol σ_{max} . On admet un comportement rigide-plastique du sol et on cherche à déterminer si le sol est capable de résister aux contraintes de cisaillement ou s'il va se rompre.. On estime que la rupture se produit simultanément dans toutes les points, $F_S = \frac{\tau_{max}}{\tau}$

Si $F_S < 1$ La pente est instable le long de la surface S

Si $F_S = 1$ Il y'un risque de rupture le long de S

L'objectif est de déterminer la surface (S) correspondant à un facteur de sécurité spécifique pour le barrage . En réalité il existe plusieurs méthodes à la rupture. a chacun des bénéfices et des désavantages, tant théoriquement que pratiquement.et la fiabilité d'une méthode spécifique dépend principalement de l'expérience qu'on en a acquise^[34].

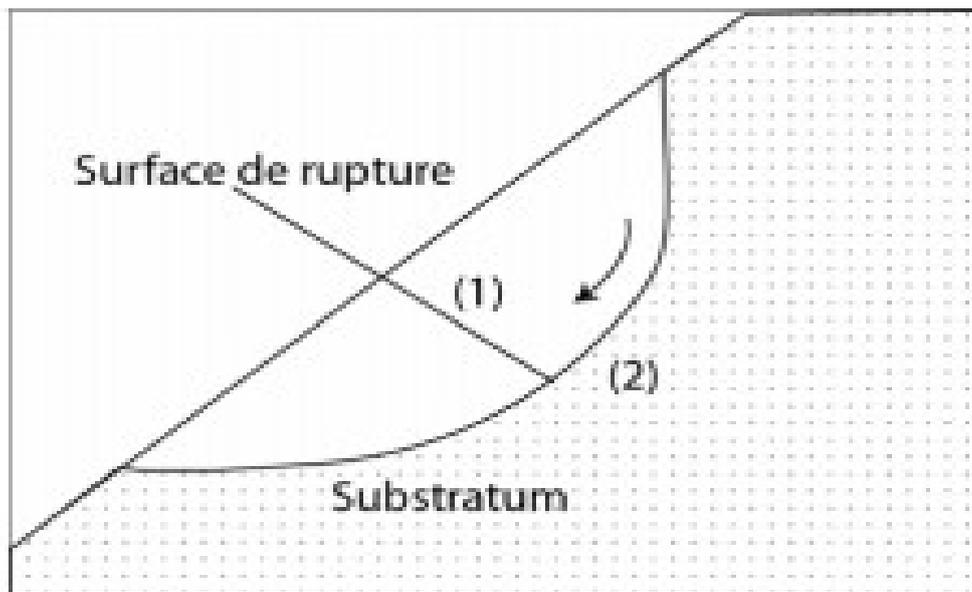


Figure II.6: présentation d'analyse de stabilité à la rupture.

II.5.2.1. Méthode de l'équilibre limite

Cette méthode est conçue pour analyser l'équilibre d'un objet rigide ou bien consiste à étudier la stabilité de talus, elle prend en compte à la fois le poids propre du pentes et, éventuellement, les forces internes résultant des interactions entre les différentes tranches, on calcule les contraintes de cisaillement (τ) par la loi de Mohr- Coulomb et on les compare à la résistance disponible (τ_f), Cette méthode permet de définir la surface critique de rupture et de évaluer le facteur de sécurité correspondant (F_s). Plusieurs méthodes d'équilibre partagent la même difficulté, qui consiste à trouver une solution qui satisfasse à la fois :

-La zone critique

-Les contraintes normales et tangentielles dans cette surface

-Le facteur de sécurité en partant des équations d'équilibre il y a deux cas qui peuvent se présenter quand on étudie de stabilité d'un talus :

1- Soit aucune surface de glissement spécifique, ce qui est le cas pour des sols proportionnellement homogènes sans aucune discontinuité géologique, et la présence éventuelle de surfaces fracturées est inconnu. Elle est alors définie en termes de coefficients de sécurité minimaux et de ruptures cinématiquement possibles. Pour spécifier les surfaces de

rupture les plus critiques et les facteurs de sécurité associés, On applique des méthodes itératives basées sur l'équilibre limite de manière répétée.

2- Un objet rigide en mouvement de glissement se déplace le long d'une surface présentant une géométrie clairement définie, ^[34].

Dans les deux cas, la réaction du matériau géotechnique est probable obéir à la loi de Mohr-Coulomb qui donne la résistance au cisaillement à la rupture : $\tau = c' + \sigma' \tan \varphi'$. La méthode dite de l'équilibre limite est très appropriée car les équations reliant les variables peuvent être facilement écrites, mais les inconnues sont supérieures aux équations dans tous les cas sauf les plus simples. Pour solutionner les équations, Il est nécessaire de formuler des hypothèses simples, telles que l'égalité du nombre d'inconnues au nombre d'équations.

Dans l'équation de stabilité. dernièrement, les outils numériques ont permis de les numériser tout en offrant la possibilité d'inclure plusieurs variables. Les hypothèses fondamentales de la méthode de l'équilibre limite sont les suivantes :

- Le poids et les surcharges sont Les forces extérieures d'entraînement ;
- Le problème doit être statique ;
- Analyse bidimensionnelle ;
- L'application des lois des milieux continus au sol ;
- Vérification de loi de Terzaghi $\sigma' = \sigma - u$;
- La rigidité de sol ; .
- Un coefficient de sécurité est déterminé en divisant la résistance au cisaillement maximale du sol par la contrainte mobilisable ;
- L'application de la loi de Colomb a la rupture $\tau = c' + (\sigma - u) \tan \varphi$ ^[36].

II.5.2.2.Méthodes des tranches

La méthode des tranches ; il a été étudié par Petterson et développé par Fellenius, Bishop et Nonveiller. Son principe repose sur la division de la masse délimitée par la géométrie et les éventuelles lignes de glissement en tranches verticales, pour lesquelles les équations d'équilibre sont écrites séparément et finalement les équations de la masse globale sont dérivées aussi , cette méthode comprend la considérations des forces qui visent à retenir un volume de terrain, défini, par les forces libres du pente et une surface de rupture potentielle.

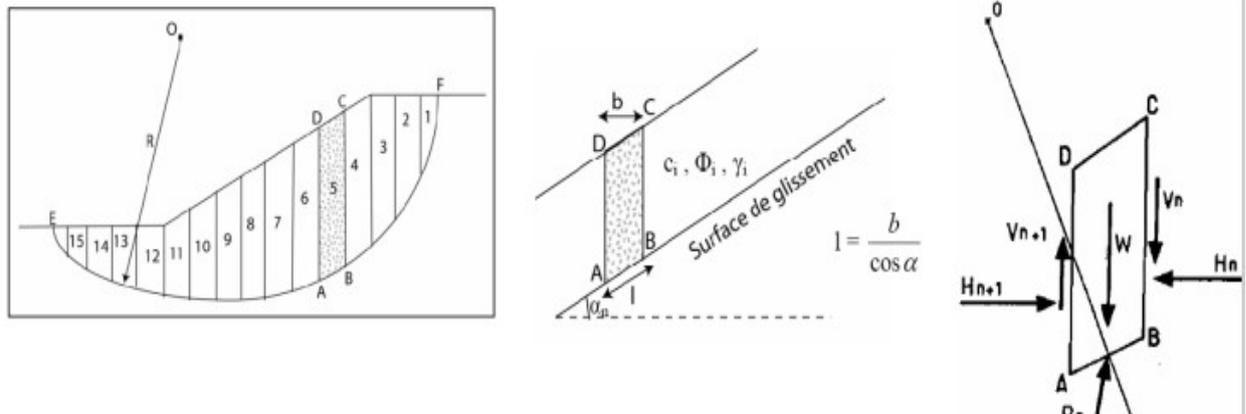


Figure II.7 : Méthode des tranches

Dans la pratique de la recherche sur la construction de barrages en terre, la méthode Fellenius est généralement utilisée car elle offre une précision suffisante et facile à utiliser. Avec l'évolution des outils informatiques, on préfère utiliser la méthode de Bishop [36].

II.5.2.3.Méthode de Fellenius

C'est la plus simple méthode des tranches pour l'étude de la stabilité des pentes. Elle considère la topographie des pentes et le volume de glissement sont subdivisés en tranches, qui sont considérées comme des solides indéformables en équilibre le long d'une ligne de glissement, dans cette méthode néglige les forces de cisaillement et normales entre les blocs H_n et V_n , et Quand l'inclinaison de la base des tranches adjacentes sont différentes, cette hypothèse simplificatrice conduit à des erreurs, Le coefficient de sécurité FS écrit par l'expression suivante [37] :

$$FS = \frac{1}{\sum W t. \sin \alpha_i} \cdot \sum_i [c_i \cdot l_i + (N_t - U_i \cdot l_i) \cdot \tan \phi_i]$$

Avec : W_i : le poids de la tranche

- α_i : inclinaison du segment de la zone de glissement

- c_i, ϕ_i : valeurs effectives des caractéristiques du sol

- u_i : la composante interstitielle causé par l'eau.

- N_i : la composante normale.

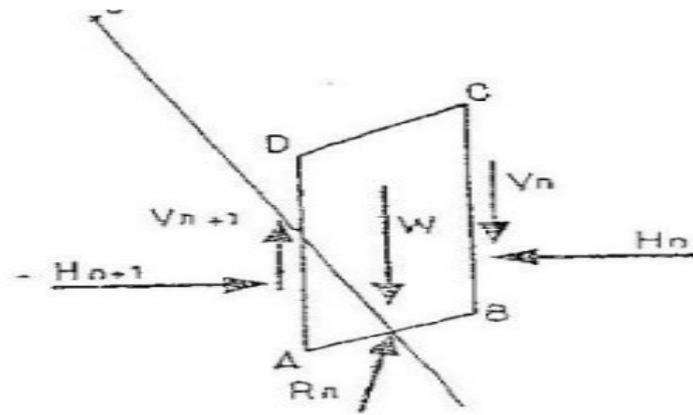


Figure II.8 : Forces appliquées (sur une tranche dans la méthode de Fellenius) [38].

II.5.2.4.Méthode de Bishop

Dans la méthode simplifiée de Bishop, les forces de chaque côté de la tranche sont supposées être horizontales (les forces de cisaillement entre les tranches sont nuls). Afin d'assurer l'équilibre dans la direction verticale, les forces sont combinées et sommées dans cette direction, ce qui permet d'obtenir une expression reliant la contrainte normale à chaque tranche, dans la figure ci-dessous et en déterminant la force dans la direction verticale, l'équation d'équilibre suivante peut être écrite pour la force dans la direction verticale.

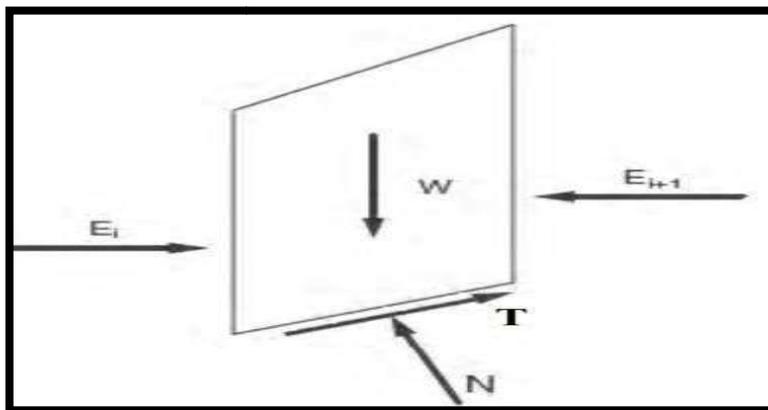


Figure II.9 : présentation des forces (méthode de Bishop)

Donc le coefficient de sécurité F_s de la méthode de bishop (simplifiée) s'écrit par l'expression suivant :

$$FS = \frac{1}{\sum_i W_i \cdot \sin \alpha_i} \cdot \sum_i \frac{c_i \cdot b_i + (W_i - u_i \cdot b_i) \cdot \tan \varphi_i}{\cos \alpha_i + \frac{\tan \varphi_i \cdot \sin \alpha_i}{FS}}$$

Avec :

- W_i : charge de la tranche. ;
- N_i : Composante normale ;
- u_i : Composante interstitielle ;
- c_i, ϕ_i : caractéristiques du sol ;
- α_i : cote de l'arc de la tranche ;
- b_i : Largeur de la tranche.

Le calcul du facteur de sécurité (F_s) est effectué par des itérations successives, avec la première itération utilisant la valeur initiale F_{s0} obtenue à l'aide de la méthode de Fellenius. [37]

II.5.2.5.Méthodes de calcul de stabilité sous séisme

La stabilité des structures telles que les barrages, les ponts, les bâtiments, etc. sous les séismes est une préoccupation importante pour les ingénieurs civils et les concepteurs de structures. Les méthodes de calcul de stabilité sous séisme sont basées sur les principes de la dynamique des structures et de la sismologie. Les méthodes courantes comprennent :

1-Méthode pseudo-statique (la méthode statique équivalente) : Cette méthode consiste à calculer les forces sismiques en utilisant un coefficient de réponse sismique qui est multiplié par le poids de la structure. Le coefficient de réponse sismique est calculé en fonction de la zone sismique et des propriétés du sol.

2-La méthode dynamique : Cette méthode utilise les équations de la dynamique des structures pour calculer la réponse de la structure aux séismes. Elle tenir en compte les caractéristiques dynamiques de la structure et les propriétés du sol pour calculer les forces sismiques.

3-La méthode des éléments finis : Cette méthode consiste à modéliser l'ouvrage et à calculer la réponse de la structure aux séismes. Elle prend en compte les caractéristiques dynamiques de la structure, les propriétés du sol et les effets de la non-linéarité.

4-La méthode de la réponse spectrale : Cette méthode utilise la réponse spectrale pour calculer la réponse de la structure aux séismes. Elle prend en compte les caractéristiques dynamiques de la structure, les propriétés du sol et la distribution spectrale des accélérations sismiques.

Toutes ces méthodes ont leurs avantages et leurs limites et doivent être utilisées en fonction des caractéristiques de la structure et des conditions de conception [39].

II.5.2.5.1. Méthode pseudo-statique

Est une méthode très simple pour évaluer la stabilité des pentes sous vibration sismique, elle a été modifiée pour intégrer, les forces horizontales et verticales de séisme afin de simuler les forces d'inertie potentielles causées par l'accélération du sol lors des tremblements de terre, les forces d'inertie induites par un séisme sont calculées à partir du produit de la masse et de l'accélération. Du fait de la flexibilité de la structure, l'amplification dynamique des forces d'inertie est ignorée. Le système barrage-fondation-réservoir est considéré comme un système rigide à période de vibration nulle, la force pseudo-statique est représentée par deux coefficients k_H et k_V , représentant respectivement la composante horizontale orientée vers le bas et verticales descendantes ou ascendantes des forces exercées sur le versant [36].

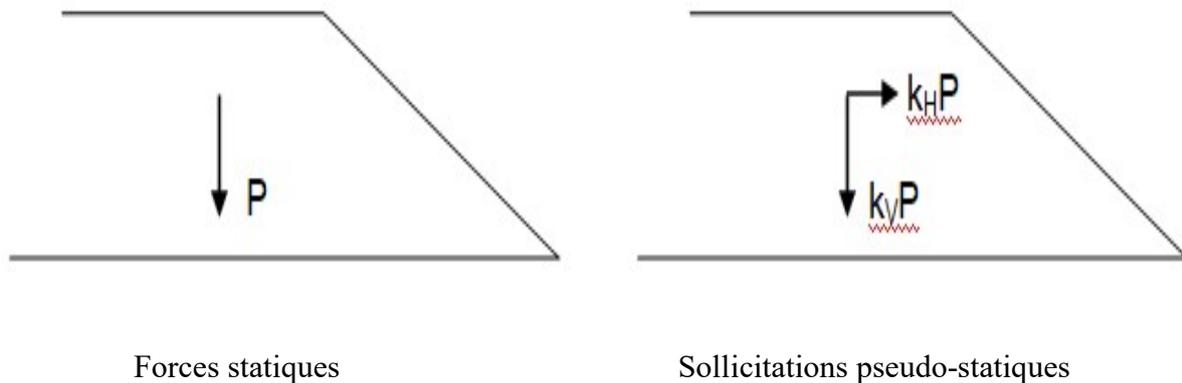


Figure II.10 : Forces pseudo-statiques

Dans cette méthode on calcule le facteur de sécurité F_s par la méthode de Bishop par l'équation suivante :

$$F_s = \frac{\sum \frac{C' + (\gamma h - u) \tan \varphi'}{1 + \tan \alpha \tan \varphi'}}{F_{\text{Bishop}}} \left[\sin \alpha + k_h' \left(\cos \alpha - \frac{Y_G - Y}{R} \right) + k_v' \right]$$

Avec :

- X_G et Y_G : coordonnées du centre de gravité
- C' et φ' : caractéristiques de cisaillement du sol
- α : cote de la tranche i par rapport à la verticale passant par le centre du cercle

-u : pression interstitielle

- K_h et K_v : coefficients d'accélération de séisme horizontale et vertical

-R : rayon du cercle de glissement.

Les coefficients k_H et k_V est d'après les caractéristiques géologiques du site.

Tableau II.2 : Classification des sites sismiques^[40]

Site	Description
S1	Rocher sain ou sol de bonne à très bonne résistance
S2	Rocher altéré ou sol de résistance
S3	Sol de faible résistance sur une faible épaisseur
S4	Sol de très faible résistance sur une grande épaisseur

II.5.2.5.2.Méthode dynamique

Est une méthode de calcul de la stabilité sous séisme qui utilise les équations de la dynamique des structures pour calculer la réponse aux séismes. Cette méthode prend en compte les caractéristiques dynamiques de la structure et les propriétés du sol pour calculer les forces sismiques. La méthode dynamique consiste à modéliser la structure sous forme de système de masses reliées par des ressorts et des amortisseurs pour représenter ses différentes composantes. La modélisation permet de déterminer les caractéristiques dynamiques de la structure telles que la fréquence propre, l'amortissement et la période de vibration. Une fois la structure modélisée, on peut calculer sa réponse aux séismes en utilisant les équations de la dynamique des structures. Ces équations permettent de calculer les forces sismiques qui agissent sur la structure en fonction de ses caractéristiques et des propriétés du sol. Il existe différentes méthodes de calcul de la réponse dynamique des structures aux séismes, notamment la méthode des modes de vibration, la méthode de l'intégration numérique et la méthode des éléments finis. Ces méthodes sont toutes basées sur les principes de la dynamique des structures et sont utilisées en fonction des caractéristiques de la structure et des conditions de conception. La méthode dynamique est souvent considérée comme la méthode la plus précise pour calculer la réponse de la structure aux séismes, mais elle peut être plus complexe et plus coûteuse que les autres méthodes. Elle est particulièrement utile pour les structures complexes et les structures non linéaires qui ne peuvent pas être facilement modélisées par d'autres méthodes^[36].

II.5.2.5.3.Méthode de la réponse spectrale

Cette méthode est souvent utilisée en combinaison avec la méthode dynamique pour calculer la réponse de la structure aux séismes. La méthode de la réponse spectrale utilise les caractéristiques des séismes pour les calculer. Les séismes sont caractérisés par leur période de vibration, leur amplitude et leur accélération maximale. Ces caractéristiques représentent la réponse maximale de la structure à différentes périodes de vibration^[51]. La méthode de la réponse spectrale consiste en général en les étapes suivantes :

1-Détermination de la réponse spectrale : La réponse spectrale de la structure est déterminée en utilisant les caractéristiques du séisme et les caractéristiques dynamiques de la structure ;

2-Calcul des forces sismiques : Les forces sismiques sont calculées en utilisant la réponse spectrale et les caractéristiques de la structure ;

3-Analyse de la réponse de la structure : Elle est analysée en utilisant les équations de la dynamique des structures pour déterminer les déformations, les accélérations et les contraintes dans la structure. [52].

II.5.2.5.4.Méthode des éléments finis :

Après le développement de technologie l'ingénieur est conduit à mettre a réaliser de plus en plus de projets plus complexe, de grande valeur et soumis à des conditions de sécurité de très sévères donc pour mise en œuvre de ces projets, il est recommandé d'opter pour des méthodes qui permettent la simulation du comportement de systèmes physiques complexes. Grâce aux avancées en informatique et aux progrès réalisés dans les domaines des mathématiques, notamment la théorie de l'énergie, les méthodes de projection et d'approximation, la méthode des éléments finis (MEF) s'est imposée comme la méthode numérique la plus performante en raison de sa grande applicabilité. Elle trouve des applications dans de nombreux secteurs industriels tels que l'aérospatiale, le nucléaire, le génie civil, la construction navale et la mécanique. [53].

Donc La méthode des éléments finis est une méthode mathématique qui permet de résoudre des équations différentielles. Développé dans les années 1960, elle permet de définir le comportement global de structures complexes grâce à des fonctions simples et des paramètres définis pour chaque région du modèle. La méthode des éléments finis est basée sur la division de l'espace selon un maillage. Généralement des mailles carrées ou triangulaires sont choisies, mais des mailles plus complexes ne sont pas interdites. Le maillage n'est pas non plus forcément régulier, et on a tendance à resserrer le maillage près des points d'intérêt, mais il

faut faire attention aux éléments présentant de légères distorsions (plus proches des polygones réguliers). Plus ce maillage est serré, plus la solution obtenue par la méthode des éléments finis est précise. La méthode consiste à résoudre discrètement des équations aux dérivées partielles et à leur rechercher des solutions approchées^[54]. Elle comprend des conditions aux limites qui assurent l'existence et l'unicité de la solution. La discrétisation du problème consiste à examiner les équations de base en un nombre fini de points (nœuds). Ainsi, nous obtenons une formulation algébrique du problème initial. La solution algébrique résultante correspond aux composantes de la solution approchée du problème élémentaire. En résumé que Cette méthode représente une approche multidisciplinaire de pointe, car elle intègre les connaissances issues de trois disciplines fondamentales.:

1-L'analyse numérique : méthodes d'approximations, résolution des systèmes linéaires ;

2-L'informatique appliquée : maintenance de grands logiciels et les techniques de développement ;

3-La mécanique des structures : élasticité, résistance des matériaux, dynamique, plasticité.

II.6.Conclusion

En conclusion, la stabilité des barrages est un enjeu crucial pour la sécurité des populations vivant à proximité de ces structures hydrauliques. Les barrages sont soumis à différentes forces, qui peuvent affecter leur stabilité, et il existe différentes méthodes de calcul pour évaluer leur stabilité, aussi la sécurité des barrages dépend de la qualité de l'analyse de stabilité effectuée et de la mise en place de mesures de maintenance et de réparation adaptées. La gestion de la sécurité des barrages est un processus continu qui doit être adapté aux évolutions du barrage, de son environnement et des connaissances scientifiques et techniques

CHAPITRE 3

**ÉTUDE DE COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES BARRAGE EN
TERRE**

III.Étude De Comportement Dynamique Des Barrage En Terre

III.1.Introduction :

Ce chapitre se concentre sur l'aspect dynamique des barrages, c'est-à-dire tout en s'attardant sur le comportement sismique des barrages en terre, une revue de la littérature spécialisée sur l'influence des séismes l'étude des phénomènes liés aux forces et aux mouvements qui se produisent à l'intérieur et autour de ces structures et nous rappelons les principes généraux liés au comportement cyclique du sol.

III.2.Comportement sismique des barrages en terre

Le comportement sismique des barrages en terre est un sujet important dans la conception, la construction et la sécurité des barrages, La rupture du barrage de San Fernando en 1971 et autres barrages qui ont été affectés par des séismes, de puissant tremblement de terre qui se sont produit le en Inde, en Turquie et il a été prouvé que les barrages en terre ne sont pas le type de structure le plus sûr en cas tremblement de terre. Lorsqu'un séisme se produit, les barrages en terre sont soumis à des forces sismiques qui peuvent entraîner des déformations importantes dans leur structure. Ces déformations peuvent entraîner des ruptures dans le barrage et des fuites d'eau ou de sédiments qui peuvent entraîner des résultats catastrophiques pour les populations en aval ^[45].

III.2.1.Effet des séismes sur les barrages en terre

Les raisons les plus courantes d'échec sont les suivantes :

- Échec de la glissière de fondation ;
- Glissement de la pente du barrage ;
- Renards causés par des fissures dans le noyau imperméable ;
- Tassement supérieur et submersion des structures.

Les conseils pratiques suivants sont donnés afin pour minimiser les effets nocifs de séisme, sur la base d'analyses de ruptures de barrages, et certains critères de leur mauvais comportement :

- Dispositif de drainage extensif pour évacuer le ruissellement à travers les fissures ;
- Noyau imperméable épais, en matière plastique non fissurée ;
- La cheminée draine au milieu du remblai ;

- Filtre granulométrique continu en amont du noyau pour sceller les fissures possible ;
- Renforcement des digues des réservoirs pour éviter les glissements de terrain ;
- Revanche suffisante pour tenir compte des tassements, des affaissements ;
- Transition large, en matériau non fissuré.

Egalement noté que les ruptures de barrage en terre, à condition que des poussées et des pressions interstitielles excessive soient susceptibles d'exister, et les facteurs de sécurité pseudo-statiques peuvent être estimés à des valeurs supérieures à un ^[45].

III.2.1.1.Cas de ruptures observées lors de séismes historiques

Plusieurs ruptures ont été enregistrées dans l'histoire des barrages en terre, ce qui a considérablement contribué à l'amélioration des calculs sismiques.

Tableau III.1 : Effet induit part les séismes sur quelques barrages en terre^[46]

Barrage	Hauteur (m)	Pays	Date	Magnitude (M)	Dégâts
La marques et la palma	10	Chili	1985	7.8	2 barrages endommagés 16barrage-importants désastres 16 barrage-faibles désastres
San Andreas Dam	32	USA	1906	8.25	Fissure longitudinale- Fissure transversale desappuis
Up per Crystal Springs	26	USA	1906	8.25	mouvement du barrage de2.4m
Sheffield dam	8	USA	1925	6.3	Rupture totale
Hebgen Dam	35	USA	1959	7.5 a 7.8	Tassement du barrage : 1.2m- Effet de vague
Lowersanfemando	40	USA	1971	6.6	tassement du barrage : 1.2m- Effet de vague
Up per sanfemando	24	USA	1971	6.6	tassement de la crête : 900mm- Déplacement vers l'avant de 1.5m
Paiho main dam	66	Chain	1976v	7.8	Grand glissement : 330

					barrages rompus
Douhe dam	22	Chain	1976	7.8	Fissure longitudinale
Masiway dam	25	Philip pines	1990	7.7	Tassement de la crête : 1.0m Fissure Longitudinale
Ono dam	37	Japon	1923	8.3	Tassement de la crête : 250mm Fissure Profonde adjacent au noyau
74 remblais	15a18	Japon	1939	6.6	12 barrage détruits 40 Glissements
Chatsworth	11	USA	1930	Non connue	Fissures, fuites

III.3.Méthodes dynamiques

III.3.1.Méthode de NEWMARK (1965)

La méthode de Newmark, développée par Nathan Newmark en 1965, est une méthode numérique couramment utilisée en ingénierie pour simuler la réponse des structures aux séismes. Elle permet de résoudre les équations différentielles du mouvement pour les structures géotechniques sous des charges sismiques. La méthode de Newmark nécessite la détermination des paramètres dynamiques de la structure, tels que la période fondamentale et l'amortissement, ainsi que les paramètres de comportement des matériaux utilisés dans la structure. Elle peut être utilisée pour simuler la réponse d'une grande variété de structures géotechniques, telles que les bâtiments, les ponts, les barrages et les tunnels. La méthode de Newmark introduit les éléments de base du programme Évaluation du potentiel de déformation du barrage sous charge de séisme, On peut considérer que cette méthode est une évolution de la méthode pseudo-statique, elle évalue le déplacement d'une masse de sol donnée lors d'un séisme. La méthode originale de Newmark fonctionne pour les déplacements de blocs rigides dans un plan. Dans un premier temps, elle permet le calcul de l'accélération critique conduisant à la rupture de la surface de glissement étudiée. Déplacer le cube obtenu par double intégration de la portion de l'accélérogramme mesurée au centre du bloc l'accélération critique est dépassée pendant cette période (Figure III.1).La procédure d'évaluation du déplacement permanent selon la méthode de Newmark implique les étapes suivantes :

- La détermination de l'accélération critique (a_c) de la surface de rupture potentielle est réalisée en utilisant la méthode pseudo-statique, qui correspond au coefficient sismique k . Cette valeur limite d'accélération garantit un facteur de sécurité égal à 1;
- La détermination de la carte d'accélération moyenne de la masse au-dessus de la surface considérée ;
- Habituellement, la réponse dynamique de la structure est calculée à cette fin ;
- Par La partie de la carte d'accélération dépasse l'accélération limite a_y ;

Cette méthode est applicable uniquement aux matériaux dont la résistance n'est pas altérée par les contraintes sismiques^[47].

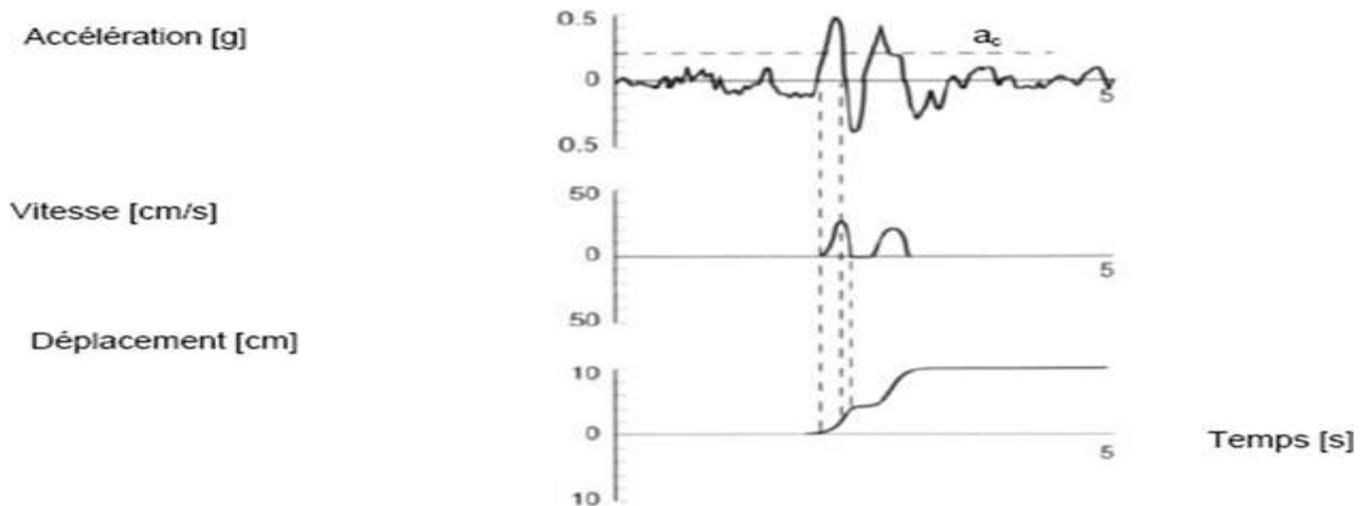


Figure III.1 : Intégration de l'accélérogramme afin de déterminer les vitesses et les déplacements.

III.3.2.Méthode de SEED et MARKDISI (1978)

Est une méthode d'analyse sismique qui a été développée par les ingénieurs, est une méthode de calcul simplifiée qui utilise des coefficients de comportement pour évaluer la réponse sismique d'une structure. Ces coefficients de comportement sont des facteurs qui prennent en compte les caractéristiques de la structure, telles que la période fondamentale, l'amortissement et la ductilité, ainsi que les caractéristiques du sol et les effets de site. Cette méthode est complétée l'approche de Newmark pour évaluer le mouvement vibratoire du barrage en remblai (période propre T_s , accélération maximale pic a_d). Supposons ensuite que le remblai est entièrement malléable les états de contrainte produits par la modélisation par éléments finis n'assurent plus l'équilibre le long de la surface de glissement, la fondation est considérée

rigide. Le diagramme de Makdisi et Seed, sont représentés dans la (figure III.2).la méthode comprend Trois étapes principales :

1-La détermination de l'accélération critique a_c correspondant au facteur de sécurité est au-delà de cette valeur, la surface subira un déplacement irréversible Glisser à la profondeur y .

2-Evaluer le pic a_d et l'accélération critique maximale de la période propre T_s , évaluer l'accélération maximale à la profondeur y .

3-Etude d'évaluation des déplacements irréversibles le long de la surface de glissement l'accélération critique est généralement calculée par la méthode pseudo-statique ^[48].

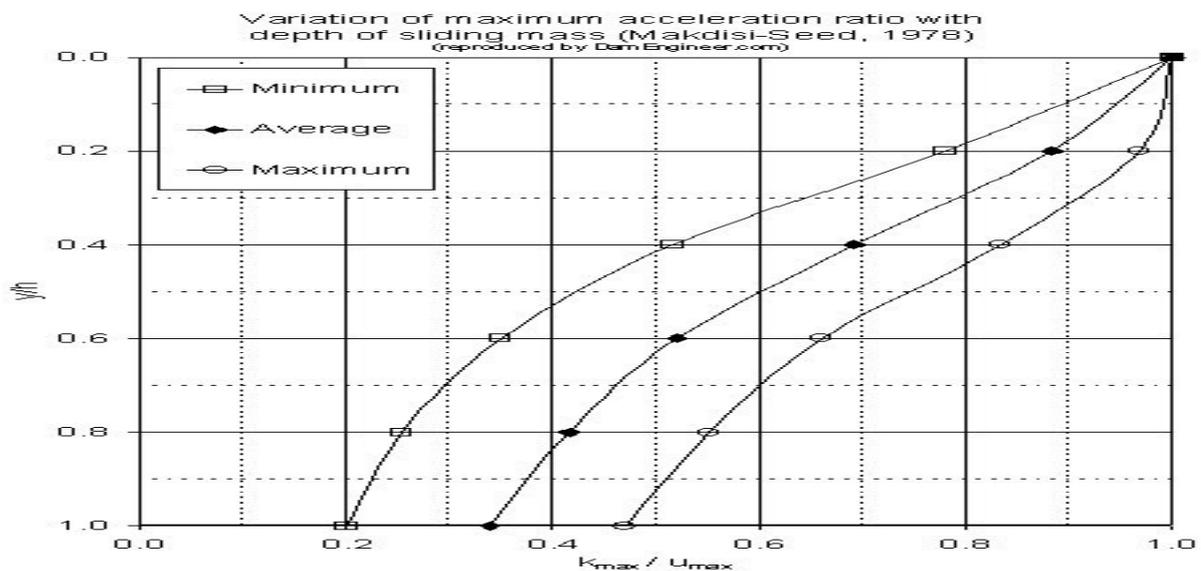


Figure III.2: Méthode de Makdisi-Seed

III.4.Comportement cyclique des sols

La charge cyclique ou variable appliquée au cours du temps pour la plupart des sols engendre une amplification considérable des poids de la pression interstitielle emmagasinée et une déformation graduelle. Des recherches ont prouvé la participation au comportement périodique non drainé de nombreux paramètres tels que la nature et la composition structurelle du sol, la contrainte de consolidation et l'évolution des déformations. ^[49]

III.4.1.Pour les sables

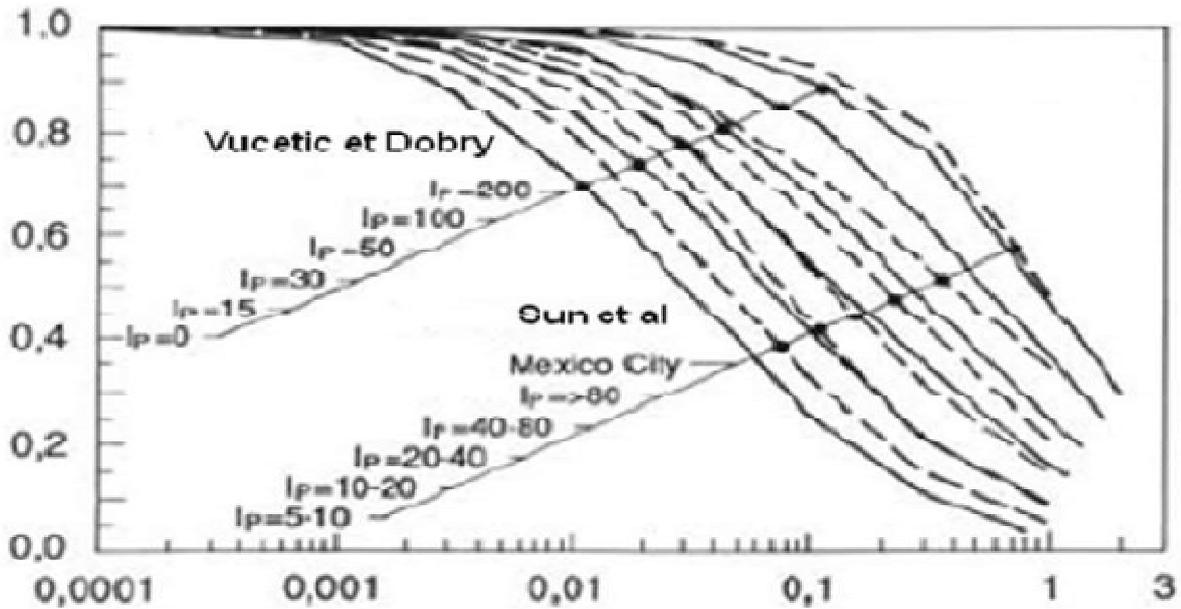
La densité relative, la contrainte de consolidation, et le déviateur de contraintes appliquées sont les seuls facteurs déterminants dans l'évolution des déformations et pressions interstitielles et ces pressions augmentent progressivement jusqu'à ce que la contrainte effective soit éliminée. Par conséquent, le sol perd toute résistance au cisaillement et présente un comportement similaire à celui d'un liquide. ^[49].

III.4.2. Pour les argiles

Les sols argileux ont tendance à avoir un comportement cyclique spécifique en raison de leur structure et de leur composition. Ce comportement peut être observé lorsqu'un sol argileux est soumis à des cycles de contraintes répétitifs, tels que ceux qui se produisent sous les charges dues aux cycles de gel-dégel, aux fluctuations saisonnières du niveau de l'eau souterraine ou à des charges cycliques dues au trafic routier. Lorsqu'un sol argileux est soumis à des cycles de chargement et de déchargement répétés, il peut subir une dégradation progressive de sa structure interne, ce qui entraîne une réduction de sa résistance et de sa capacité à supporter des charges. Ce phénomène est souvent appelé "ramollissement cyclique" et peut entraîner des tassements différentiels, des déformations permanentes et même des glissements de terrain. Le comportement cyclique des sols argileux dépend de nombreux facteurs, notamment la teneur en eau du sol, le taux de déformation, la fréquence et l'amplitude des cycles de chargement, ainsi que les propriétés géotechniques du sol^[49].

III.5. Modélisation du comportement cyclique du sol

Les échantillons des matériaux soumis à des sollicitations périodiques et cycliques non linéaire et non élastique donnent un comportement évolutive à travers le module de cisaillement G et l'amortissement du l'échantillon du matériau D en relation avec la déformation de cisaillement γ . les rapports G/G_{max} et D/D_{max} en fonction de la déformation par cisaillement et les valeurs G_{max} et D_{max} correspondent à la valeur maximale du module de cisaillement successivement à la valeur maximale d'amortissement. Pour adapter ces courbes aux conditions locales (compacité.), il est la valeur de G_{max} d'au moins doit être déterminée à l'aide de tests dynamiques. Ce rapport d'amortissement D peut généralement être obtenu en laissant sécurité des matériaux similaires. La figure ci-dessous montre le module de cisaillement G et l'amortissement D en fonction de déplacement du Cisaillement et des propriétés des plasticités^[50].

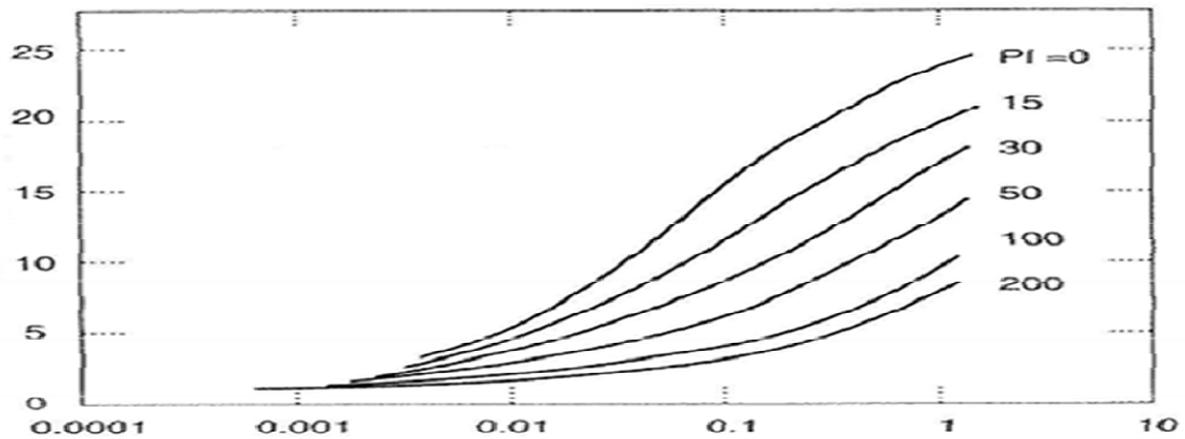


Déformation de Cisaillement Cyclique [%]

-Traits discontinus est d'après les essais de (Sun et al.)

-Traits pleins et d'après les essais de (Vucetic&Dobry.)

Figure III.3 : Evolution du module de cisaillement G en fonction de la déformation de cisaillement cyclique et des propriétés de plasticité^[51].



Déformation de Cisaillement Cyclique [%]

-selon les essais de (Vucetic et Dobry),

Figure III.4 : Évolution de l'amortissement D en fonction de la déformation de cisaillement et des propriétés de plasticité^[51].

III.5.1. Définition du module de cisaillement G et de facteur d'amortissement D

Le module de résistance au cisaillement est la propriété du sol la plus courante dans l'analyse dynamique, qui est étroitement liée à la capacité du sol à absorber l'énergie liée aux ondes sismiques, et elle est également liée à la rigidité du sol. Cette propriété s'appelle amortissement.

Coefficient d'amortissement D

Le facteur d'amortissement D est une mesure de la dissipation d'énergie dans un matériau lorsqu'il subit des oscillations ou des vibrations. Il est souvent utilisé pour décrire le comportement des sols et des roches lors de tremblements de terre. Le facteur d'amortissement est défini comme le rapport de l'énergie dissipée à l'énergie totale stockée dans le matériau pendant une oscillation. Il est généralement exprimé en pourcentage (%). Ce coefficient est défini par la relation

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} = \frac{1}{2\pi G r} \frac{\Delta W}{a^2} \quad \text{Ou :}$$

ΔW : correspond à l'aire intérieure du cycle d'hystérésis

En d'autres termes, l'énergie de déformation dissipée, notée W , est proportionnelle au carré de la déformation imposée γ_a ($W = G \gamma_a^2/2$). Théoriquement, la surface de cette boucle d'hystérésis augmente avec le niveau de déformation, ce qui signifie que la dissipation d'énergie, notée D , est une fonction de la déformation ($D = f(\gamma)$). Pour de faibles valeurs de déformation, il n'y a pas de dissipation d'énergie, c'est-à-dire que D est égal à zéro.

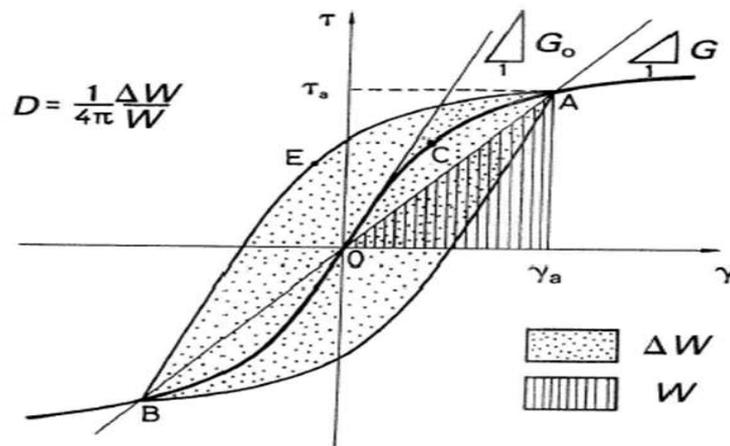


Figure III.5: Schéma de la réponse du sol lors d'un chargement Cyclique^[52].

Module de cisaillement G

C'est une propriété mécanique des matériaux élastiques qui mesure leur capacité à résister à une contrainte de cisaillement. Il représente la raideur du matériau dans le plan de cisaillement et est défini comme le rapport de la contrainte de cisaillement à la déformation de cisaillement. Le module de cisaillement est généralement exprimé en Pascal (Pa) ou en kilo pascals (kPa) ^[52] .

Modèle linéaire équivalent

Le modèle linéaire équivalent est Un mécanique des sols pour décrire le comportement d'un matériau ou d'une structure sous différentes charges et contraintes. Lors d'une analyse dynamique, le module de cisaillement G et le facteur d'amortissement D sont utilisés dans le cadre d'une approche linéaire équivalente. Ces valeurs sont calculées à partir des déformations de cisaillement cycliques ou équivalentes obtenues. Cette méthode est appliquée lorsque les propriétés mécaniques du matériau ou de la structure ne sont pas linéaires, mais peuvent être approximées par un modèle linéaire et dans le cas des sols, le modèle linéaire équivalent est souvent utilisé pour décrire la réponse du sol sous des charges cycliques ou sismiques. Il est basé sur l'hypothèse que le comportement du sol est linéaire élastique pour de petites amplitudes de déformation. La figure est une présentation graphique de comportement de G. Les lignes droites indiquent que G est une constante pendant une itération. La variation de la pente indique la diminution du module de cisaillement G entre les itérations. ^[53].

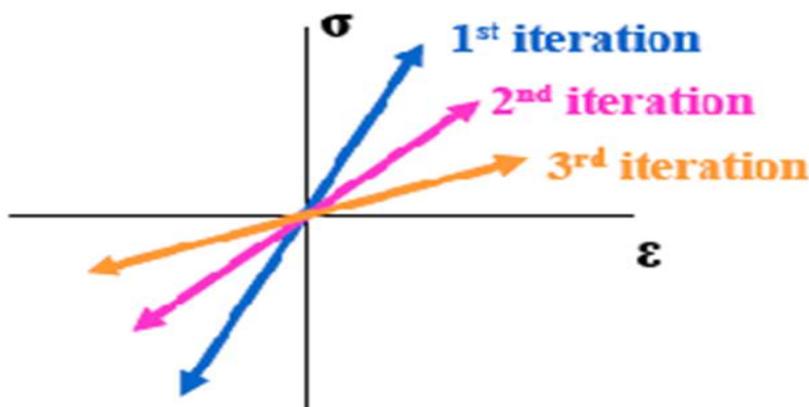


Figure III.6: Changement de G avec chaque itération.

III.5.2. Paramètres cycliques équivalents

Les contraintes de cisaillement résultant des tremblements de terre sont caractérisées par leur forte variabilité et leur irrégularité. Les contraintes de cisaillement dynamiques peuvent subir

des fluctuations, comme le montre la Figure III.7, où il est représenté la contrainte de cisaillement horizontale.

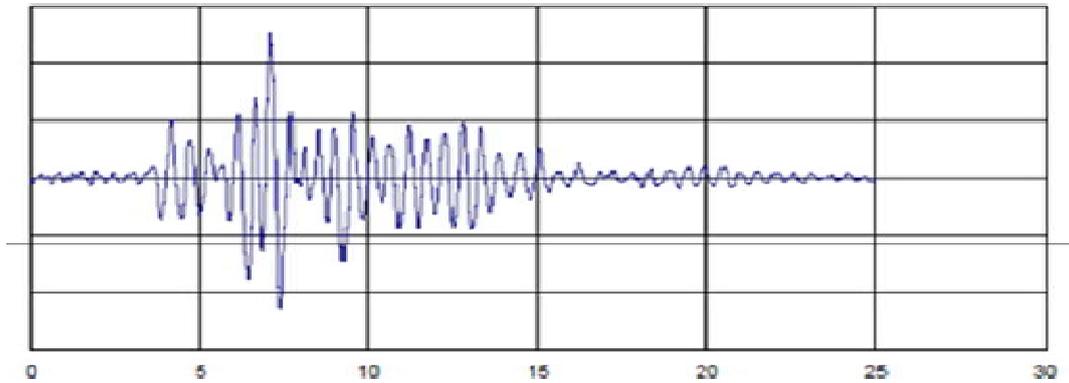


Figure III.7: Variation des contraintes de cisaillement en fonction du temps^[54]

Les paramètres cycliques équivalents sont des paramètres mécaniques qui sont utilisés pour représenter le comportement cyclique des sols et des roches. Ils sont dérivés à partir de tests en laboratoire ou de données de terrain, et sont utilisés pour modéliser la réponse sismique des structures géotechniques, il est essentiel de convertir un accélérogramme en un nombre équivalent de cycles de contrainte uniforme pour interpréter les données. L'amplitude de cisaillement cyclique uniforme est déterminée à 65% de la contrainte de cisaillement maximale :

$$\tau_{\text{cycle}} = 0,65 \tau_{\text{peak}} \quad [55]$$

En étudiant les mouvements réels du sol et l'augmentation subséquente des pressions interstitielles, les contraintes maximales ont donc été multipliées par 0,65. La figure III.8 représente le résultat final. III.8

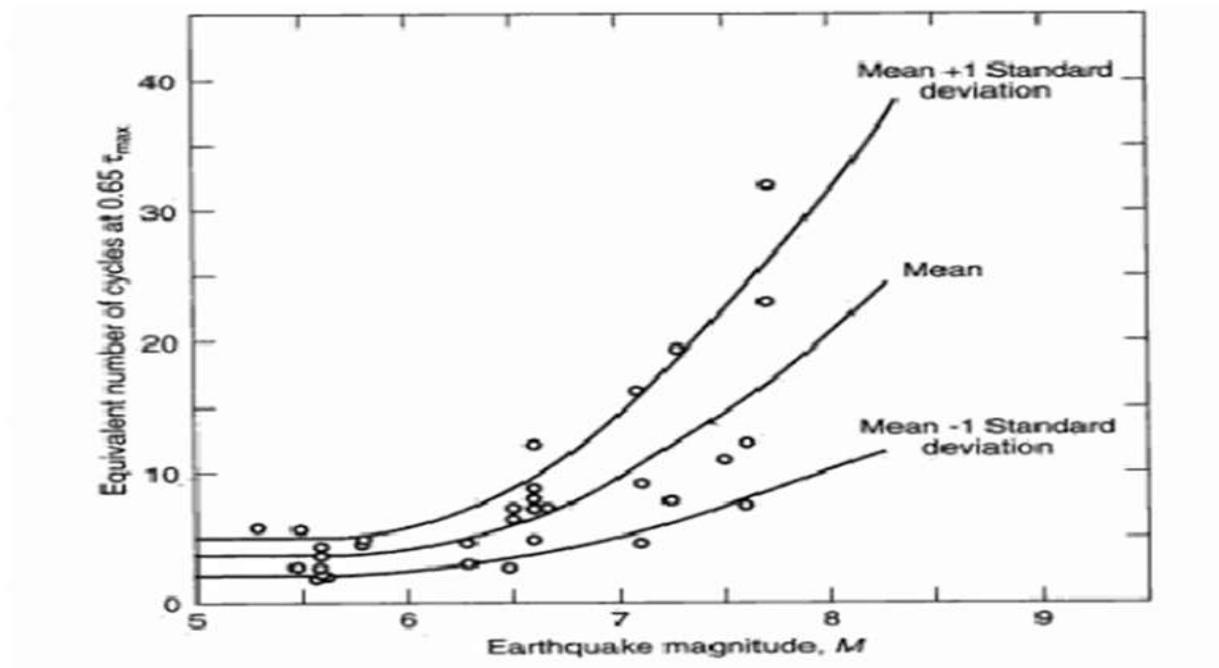


Figure III.8 : Cycles uniformes équivalents en fonction des magnitudes^[54]

Le nombre de cycles uniformes (N) dépend de la magnitude du séisme. Il est utilisé pour déterminer les contraintes de cisaillement cycliques équivalentes.

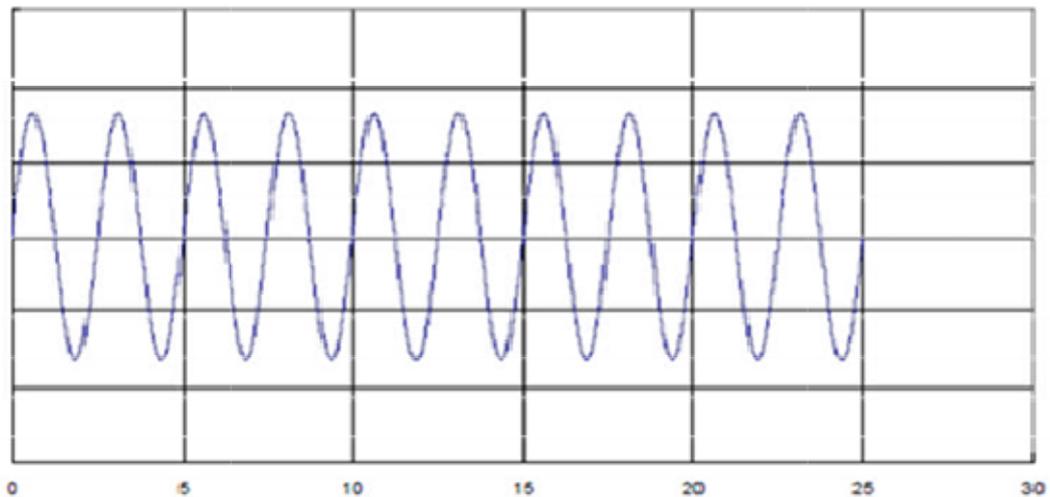


Figure III.9 : Contraintes de cisaillement cycliques équivalentes^[54]

III.6. Caractéristiques dynamique des sols

Il existe des courbes de référence pour différents sols dans le code de calcul dynamique, Par exemple, les figures à montrent la fonctionnalité du module de réduction G/G_{max} comme indiqué dans le logiciel (ProShake, QUAKE/W) pour le sable et l'argile. Il est très important de noter que des logiciels comme ProShake utilisent ces fonctionnalités comme D'autre part,

QUAKE/W gère le pourcentage (%) de déformation de cisaillement. La déformation de cisaillement agit comme un simple nombre sans dimension. Ainsi, la ligne horizontale est décalée de cent.^[53]

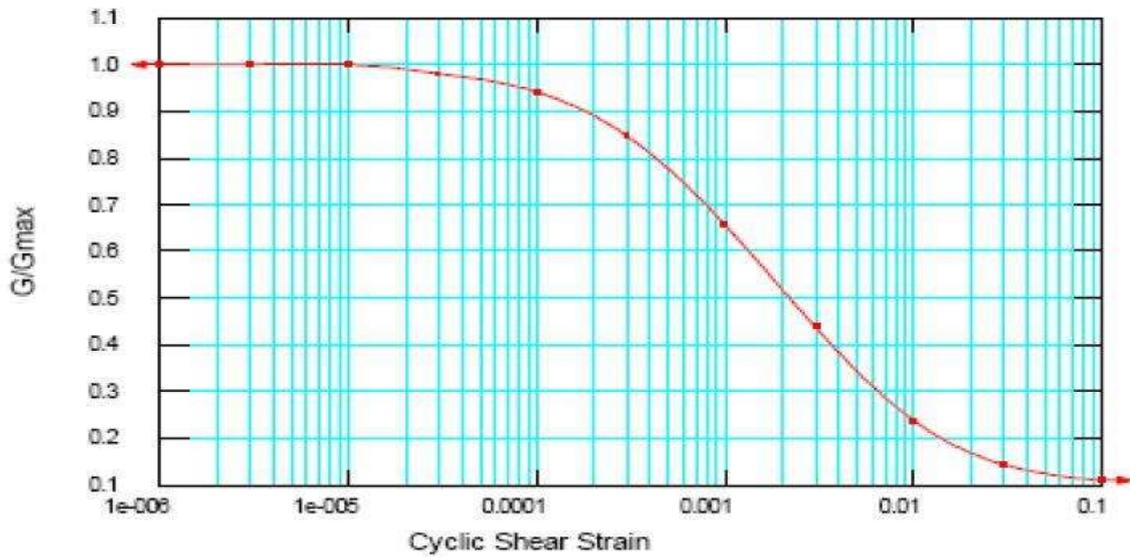


Figure III.10: Fonction G / G_{max} pour le sable (QUAKE/W)^[56]

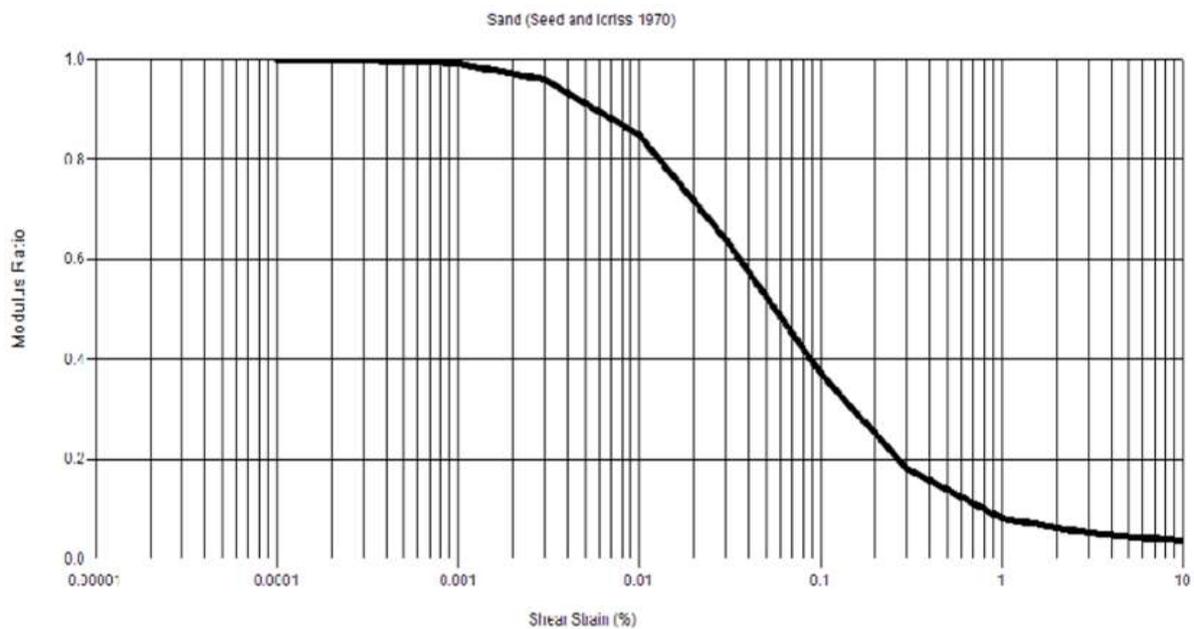


Figure III.11 : Fonction G / G_{max} pour le sable (ProShake)^[56]

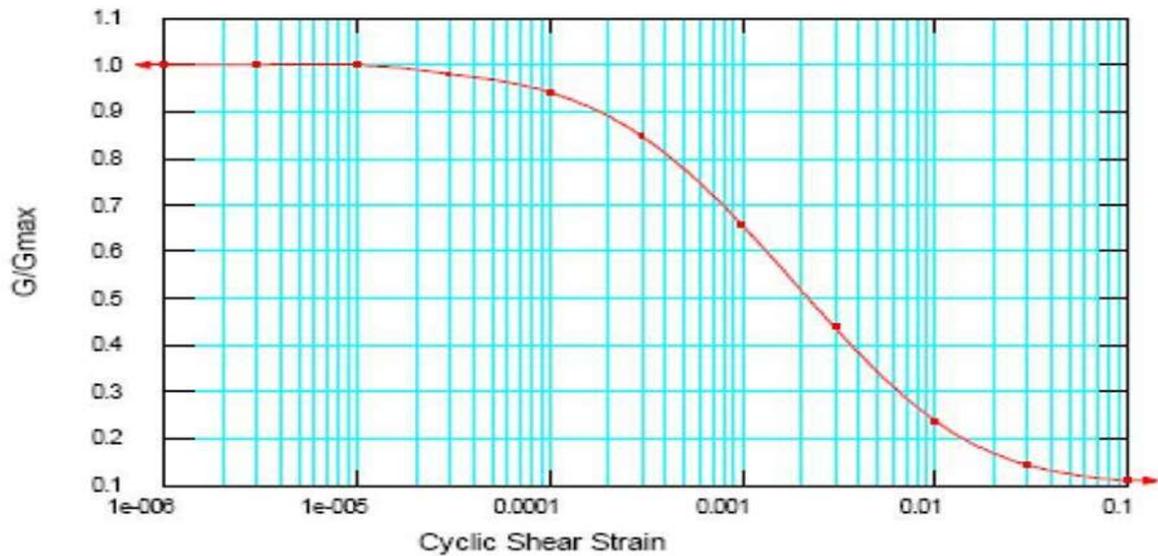


Figure III.12: Fonction G / G_{max} pour l'argile (QUAKE/W)^[56].

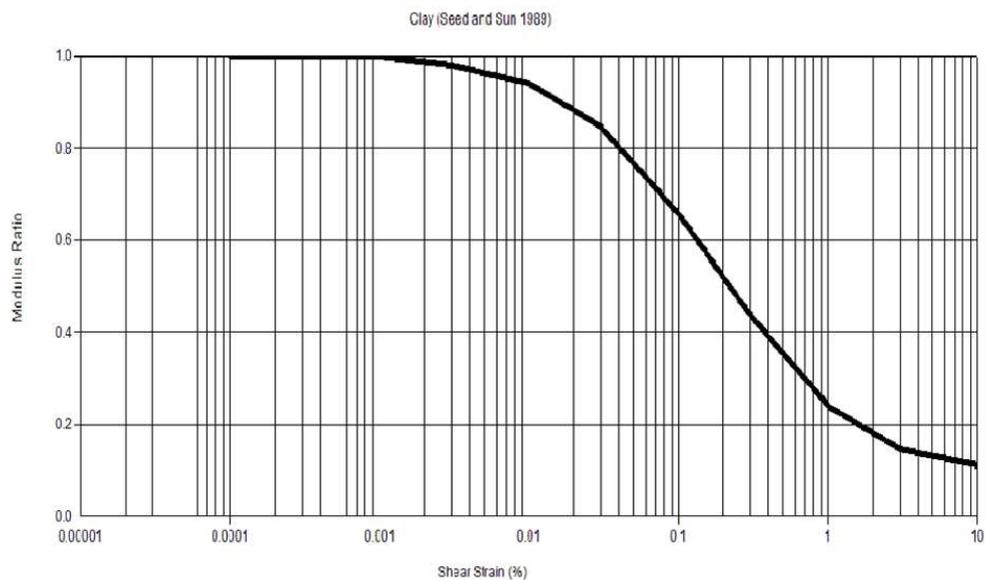


Figure III.13: Fonction G / G_{max} pour l'argile (ProShake)^[56].

III.6.1. Module de cisaillement G sous conditions de chargements cycliques

Le module de cisaillement G est une propriété mécanique des sols qui représente la raideur des sols sous chargements de cisaillement. Toutefois, le module de cisaillement G des sols peut varier sous des conditions de chargements cycliques, en particulier en raison de l'effet de l'hystérésis comme représenté sur la figure.

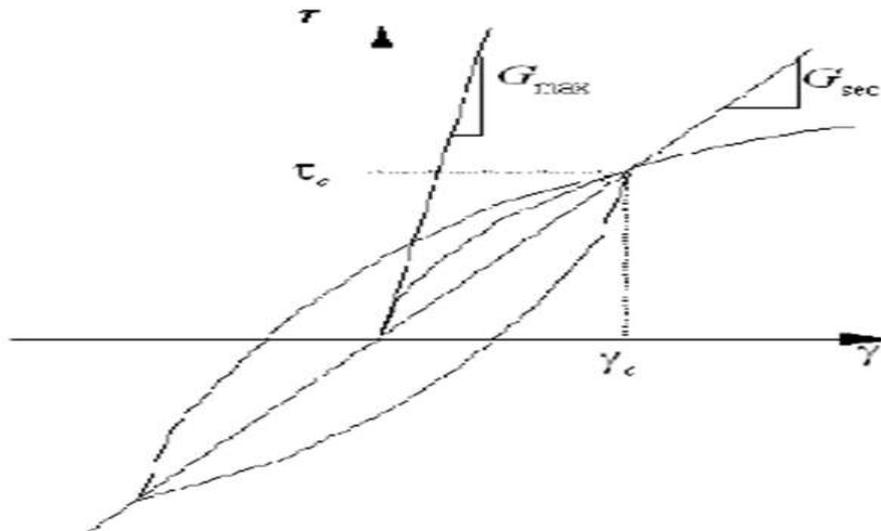


Figure III.14 : Module de cisaillement dans les conditions de chargement cyclique

Avec l'utilisation d'une relation empirique entre G_{max} et la contrainte principale moyenne initiale comme suit $G_{max} = k (\sigma'_m)^n$

avec : K et n sont des constantes.

σ'_m est la contrainte principale moyenne effective de confinement [57].

III.6.2. Facteur d'amortissement D sous conditions de chargements cycliques

En raison de la diminution du module de cisaillement G et de l'augmentation de la contrainte de cisaillement cyclique, la surface des boucles d'hystérésis (contrainte-déformation) est également connue pour augmenter. Cela reflète une augmentation du coefficient d'amortissement avec l'augmentation de l'amplitude de déformation de la boucle. Le coefficient d'amortissement est utilisé pour intégrer le terme d'amortissement dans la formulation par éléments finis de l'équation de mouvement. L'étude d'Ishibashi et Zhang a abouti à une expression qui peut être utilisée pour estimer la fonction d'amortissement. Les variables de cette expression comprennent l'indice de plasticité (PI), le taux de réduction G/G_{max} et les contraintes limites indirectes.

. d'Ishibashi et Zhang est :

$$\xi = 0.333 \frac{1 + \exp(-0.0145PI^{13})}{2} \left[0.586 \left(\frac{G}{G_{max}} \right)^2 - 1.547 \frac{G}{G_{max}} + 1 \right]$$

Le rapport G/G_{max} est calculé sur la base du PI et des contraintes donnés de confinement. Le facteur d'amortissement est alors calculé pour le même PI donné une gamme de valeurs de

contrainte de cisaillement cyclique. La Figure à Afficher la fonction du facteur d'amortissement comme indiqué dans Logiciel pour sable et argile (PROSHAKE, QUAKE/W)^[56].

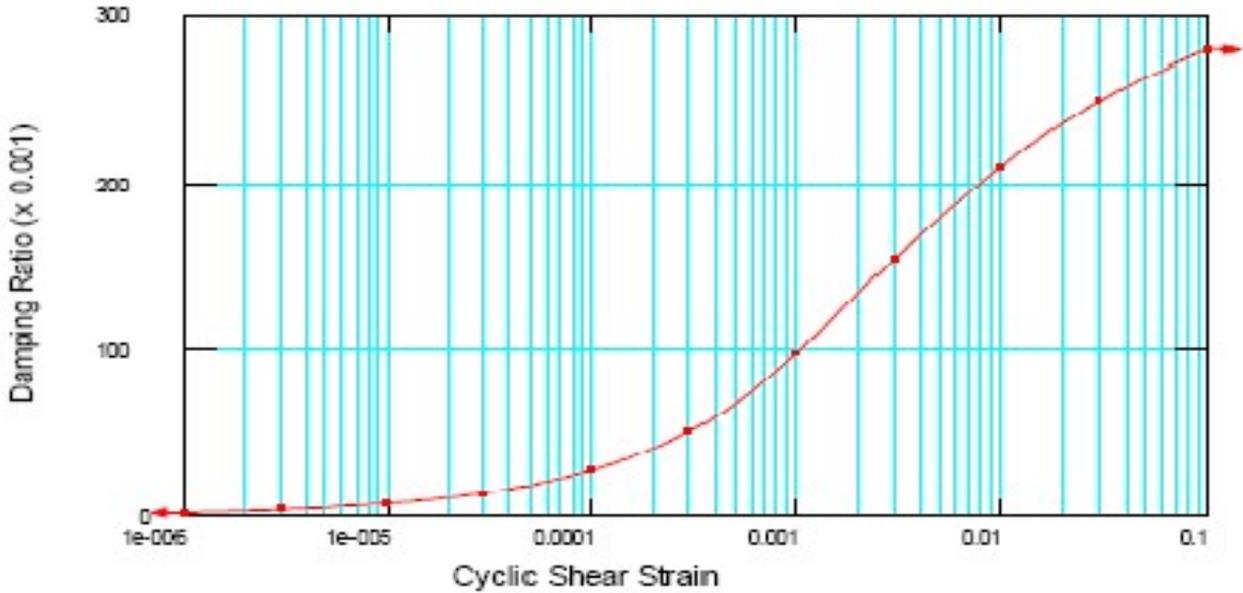


Figure III.15: Fonction facteur d'amortissement pour le sable (QUAKE/W).

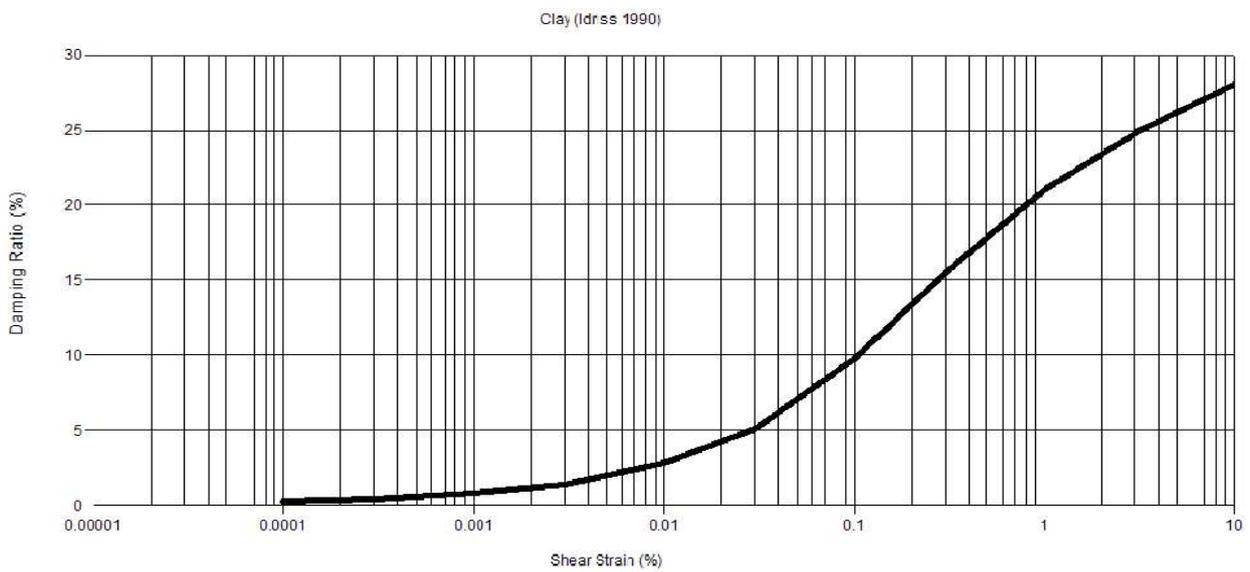


Figure III.16: Fonction facteur d'amortissement pour le sable (ProShake).

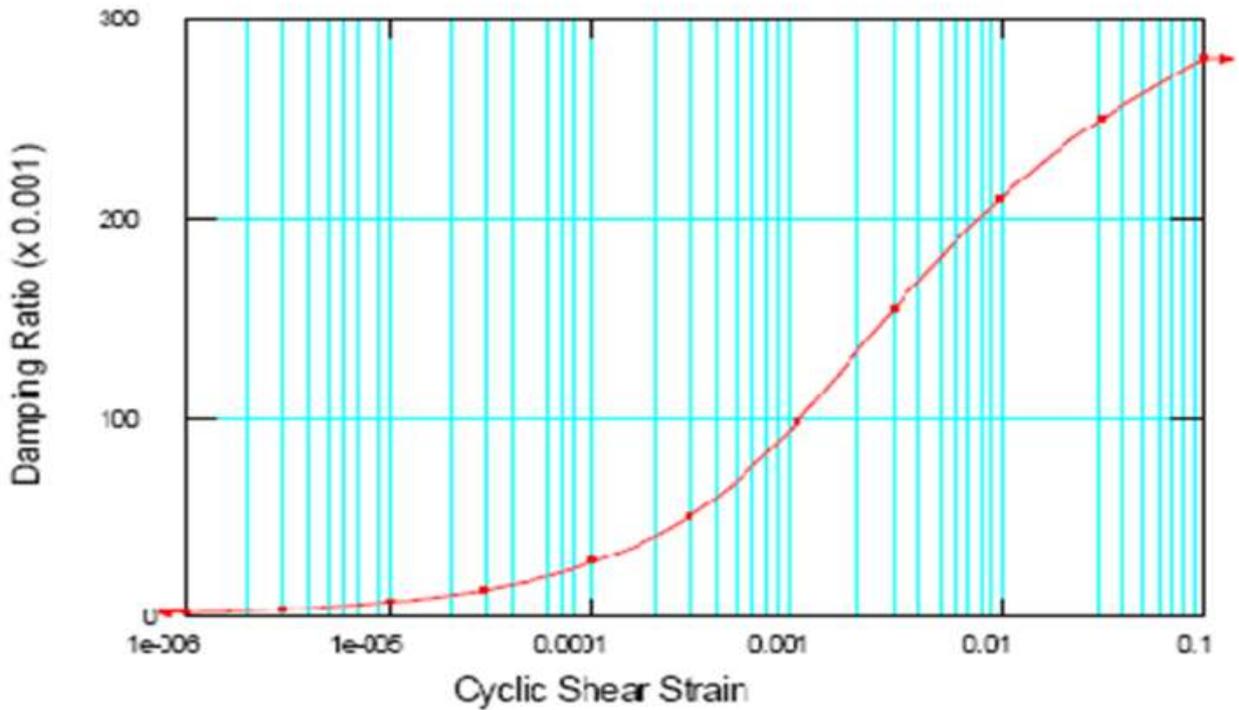


Figure III.17: Fonction facteur d'amortissement pour l'argile (QUAKE/W)

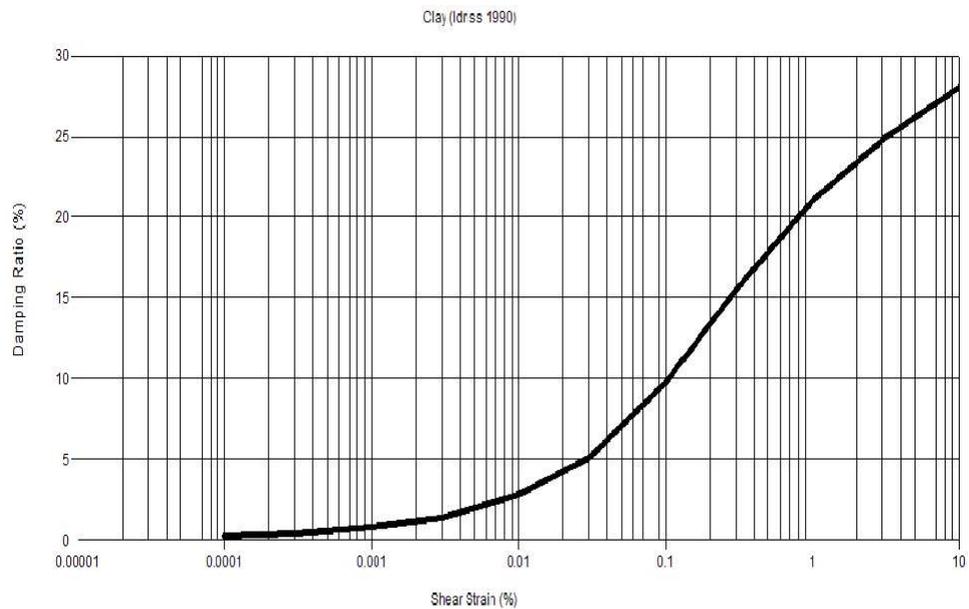


Figure III.18: Fonction facteur d'amortissement pour l'argile (ProShake).

III.6.3.Fonction de pression interstitielle

La pression interstitielle générée lors du séisme est une fonction du numéro de période uniforme équivalent N d'un tremblement de terre particulier, et Le nombre de cycles NL qui entraîneront la liquéfaction d'un sol particulier déterminé par une fonction spécifiant le

nombre d'itérations , ensuite le rapport N/N_L est en fonction de paramètre de pression interstitielle ru comme indiqué sur la figure.

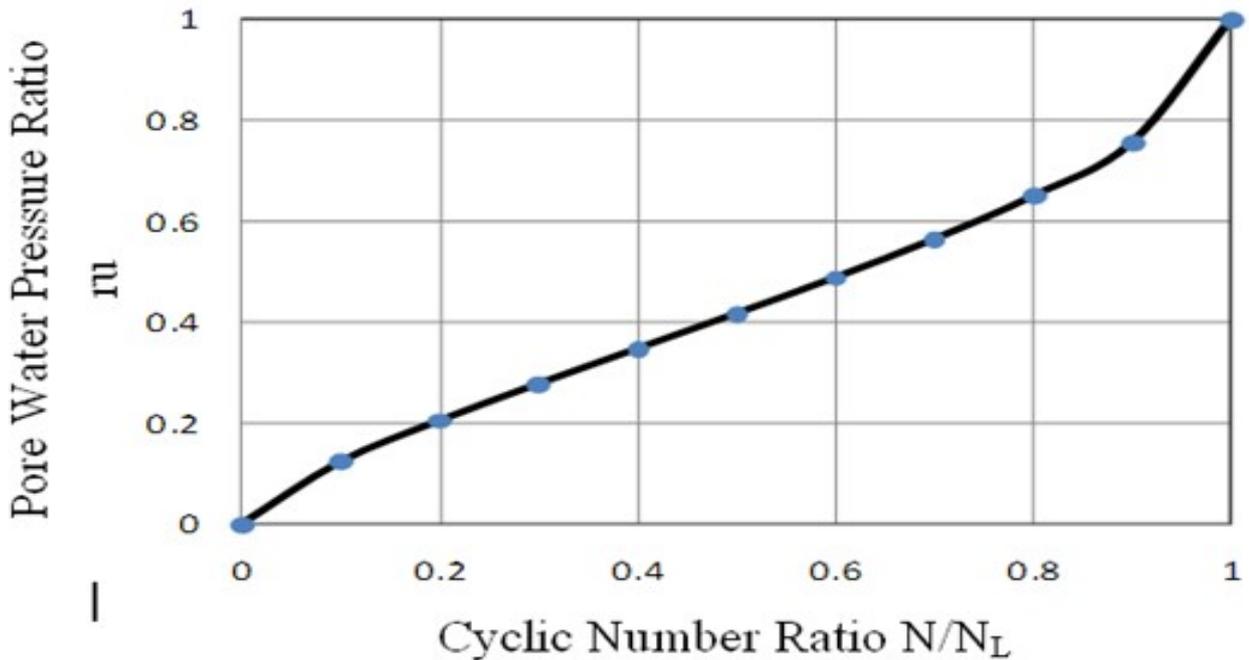


Figure III.19 : Variation du Rapport nombre de cycles N/N_L en fonction du coefficient de pression interstitielle ru

Le coefficient de pression interstitiel ru est donné par l'équation suivante :

$$ru = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sin^{-1} \left[2 \left(\frac{N}{N_L} \right)^{1/a} - 1 \right]$$

et u , N/N_L sont connus, on calcule la pression interstitielle de l'équation

$$u = ru \cdot \sigma'_{sta}$$

Il est important de noter que la contrainte de compression effective statique qui est utilisée pour les calculs de pression interstitielle^[57].

III.7. Conclusion

Dans le modèle linéaire équivalent, le comportement d'un matériau soumis à une sollicitation dynamique est approximé en utilisant des valeurs caractéristiques linéaires équivalentes. Cette approche permet d'effectuer des analyses avec une précision suffisante, mais elle ne permet généralement pas de calculer les déformations résiduelles.

L'approche linéaire équivalente est souvent utilisée dans les analyses dynamiques pour simplifier les calculs, car elle permet d'obtenir des résultats rapidement et de manière relativement précise. Cependant, il est important de noter que cette méthode ne prend pas en compte les effets non linéaires qui peuvent se produire dans le matériau lors de sollicitations dynamiques.

CHAPITRE 4

**MODELISATIONS NUMERIQUES Et EXPÉRIMENTATIONS
RESULTATS ET DISCUSSIONS**

IV. Modélisations Numériques et Expérimentations- Résultats et Discussions

IV.1. Introduction

La modélisation numérique d'un barrage en terre est une approche essentielle dans l'ingénierie des barrages, permettant de prédire et d'évaluer son comportement sous différentes charges et conditions avec l'utilisation des méthodes mathématiques, des algorithmes informatiques, des logiciels et des codes de calcul en exploitant des données géotechniques, hydrauliques et structurales du barrage. L'objectif principal de cette simulation est de démontrer l'influence des charges exercées à savoir les charges dynamiques, les charges hydrostatiques avec le changement de niveau de remplissage de la retenue normale (RN) au niveau des plus hautes des eaux (PHE) sur le comportement de barrage en question. Elle permet également d'évaluer la stabilité, les déformations, les écoulements d'eau et les contraintes sur la structure du barrage.

IV.2. Description et situation de l'ouvrage

Le barrage en terre de **Lekhal** est situé sur la localité de **l'oued** dite **Lekhal** environ de vingt kilomètre au sud-ouest de la wilaya Bouira à $\varphi=36.26^\circ$ de latitude Nord et à $\lambda=3.72^\circ$ de longitude Est (coordonnées Lambert $x= 591.425$ $y= 329.596$). L'agglomération la plus proche est celle de la commune d'Ain Bessem à quatre kilomètre au Nord-Ouest du barrage. Le barrage est en remblai et sert à alimentation en eau et irrigation. Le volume maximale de la retenue jusqu'à la côte est de 34.16 hm^3 et la hauteur de barrage est de 45.00 m , la superficie à la côte de retenue normale 684.40 NGA est environ de 2.5 km^2 , tandis que celle à la côte de retenue maximale à 687.00 NGA est environ 2.9 km^2 , il est le premier ouvrage hydraulique réalisé sur le territoire de la wilaya de Bouira, sa capacité initiale de rétention était de trente millions de mètre cube (30 m^3) et actuellement, elle est d'environ vingt cinq millions de mètre cube (25 m^3) a été mis en exploitation 1985.

Largeur à la base de la diguel = 244,5 m

Volume d'eau de la retenue maximal $V_{RM} = 34.16\text{hm}^3$

Volume du corps du barrage de la digue V = 1500000 m³

IV.3.4.Caractéristique des matériaux utilisés dans la modélisation numérique:

Les propriétés des matériaux et de sol de fondation utilisés dans la modélisation numérique sont résumées dans le tableau IV-1

Tableau IV.1 : Propriétés des matériaux et du sol utilisés dans la modélisation numérique

Paramètre	Nom	Sol de fondation	Alluvions	Drain	Unité
Type de modèle	Model	Mohr-coulomb	Mohr-coulomb	Mohr-coulomb	/
Type de drainage	Type	Drained	drained	drained	/
Poids volumique saturé	γ_{sat}	20	22	19.5	KN/m ³
Poids volumique non saturé	γ_{usat}	18	20	18.5	KN/m ³
Module de Young	E	10000	100000	200000	KN/m ²
Coefficient de Poisson	Y	0.30	0.35	0.25	
Cohésion	C_{ref}	10	10	1	KN/m ²
Angle de frottement	Φ	30	35	38	°
Angle de dilatation	Ψ	0	0	5	°
Perméabilité Horizontale	K_x	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	0.01	m/s
Perméabilité verticale	K_y	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	0.01	m/s

IV.4.Géométrie du modèle numérique

IV.4.1.Introduction

On fait une analyse numérique afin d'étudier le comportement de barrage en terre d'Oued LAKHAL et les effets induits sous un chargement dynamique, hydrostatique en tenant compte la variation de niveau de remplissage de la retenue normale (RN) au niveau des plus hautes des eaux (PHE).

IV.4.2.Modèle numérique

Le problème étudié est un modèle géométrique plan (2D) de 244,5m de large et de 45 m de hauteur, une crête de 8 m de largeur et pour assurer la stabilité de la digue les deux côtés amont et aval sont munis respectivement des pentes de 1/2,50 et de 1/2,75, le drain est mis à la base du côté aval d'une longueur de 82 m, reposant sur une couche du sol de fondation de 10 m de profondeur et une nappe phréatique est à la surface de la couche du sol. Le modèle géométrique est élaboré, avec l'utilisation d'une modélisation numérique bidimensionnelle par la méthode des éléments finis en exploitant le logiciel Plaxis 2D. Cette modélisation numérique comporte souvent les démarches et les étapes suivantes :

1-Géométrie du modèle : définir la géométrie du problème, y compris les dimensions et les formes des sols et des structures, les profondeurs, les pentes ;

2-Propriétés des matériaux: spécifier les propriétés géotechniques des matériaux tels que la cohésion, l'angle de frottement, la densité, la compressibilité, la perméabilité, etc. Ces propriétés sont généralement déterminées à partir de tests de laboratoire ou d'informations sur le site ;

3-Maillage du modèle: diviser la géométrie du modèle en éléments finis plus petits pour représenter numériquement le comportement du sol. Le maillage est une grille discrète sur laquelle les équations mathématiques sont résolues ;

4-Conditions aux limites : définir les conditions aux limites du modèle, telles que les forces appliquées, les déplacements imposés, les contraintes latérales, les conditions de drainage ;

5-Chargement et analyse : appliquer les charges ou les contraintes spécifiées au modèle et effectuer une analyse sous différentes conditions pour évaluer le comportement du sol et des structures. Cela peut inclure des analyses statiques, dynamiques, de consolidation, de stabilité ;

6-Interprétation des résultats : Analyser les résultats obtenus, tels que les déformations, les contraintes, les déplacements, les facteurs de sécurité, etc. Ces résultats permettent de prendre des décisions éclairées concernant la conception, la construction ou la gestion des projets géotechniques.

IV.4.3.Génération du maillage

Il est préférable de choisir la finesse (Global coarsness) puis on le raffine localement aux niveaux des éléments structuraux (digue, drain et sol de fondation), le modèle de référence se

fait par des éléments à 15 nœuds, le nombre d'éléments est de 86 éléments, le nombre des nœuds est de 761 nœuds,(le nombre off stress points 1032 points et average élément size 13,11 m).

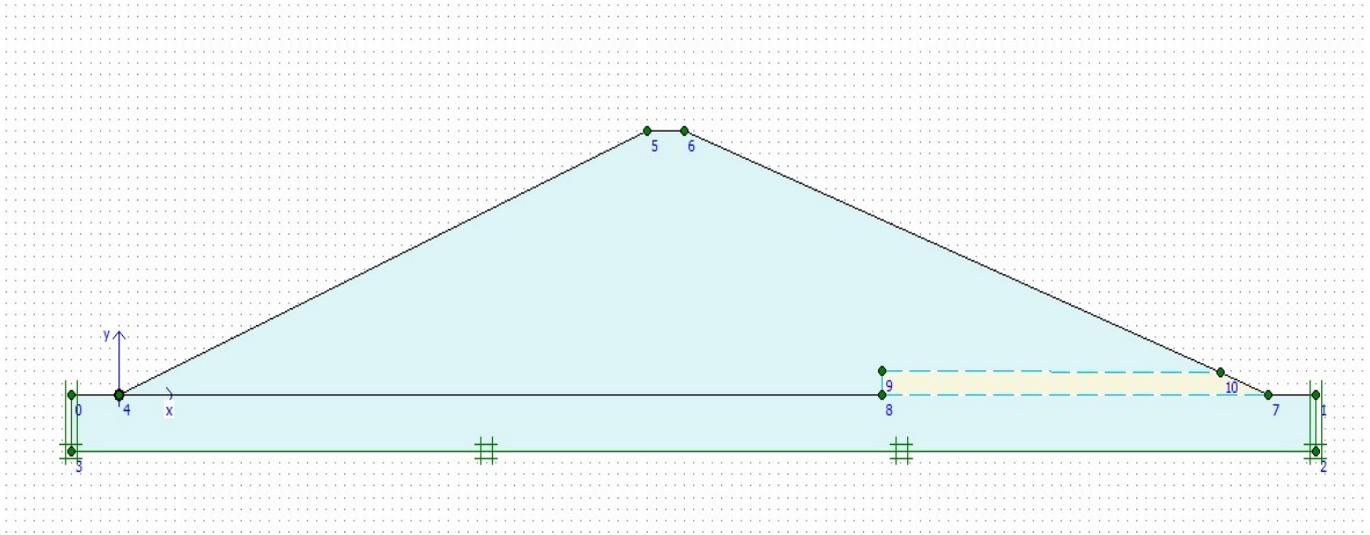


Figure IV.2: Profil du barrage en terre d'oued lekhal

IV.4.4. Maillage et conditions aux limites

On a choisi des éléments à 15 nœuds pour un maillage raffiné et les conditions aux limites sont appliquées au niveau de la fondation dans les deux directions par la commande standard fixities pour bloquer le modèle dans les deux sens horizontal et vertical comme le montre les deux figures la figure IV.2 et la figure IV.3.

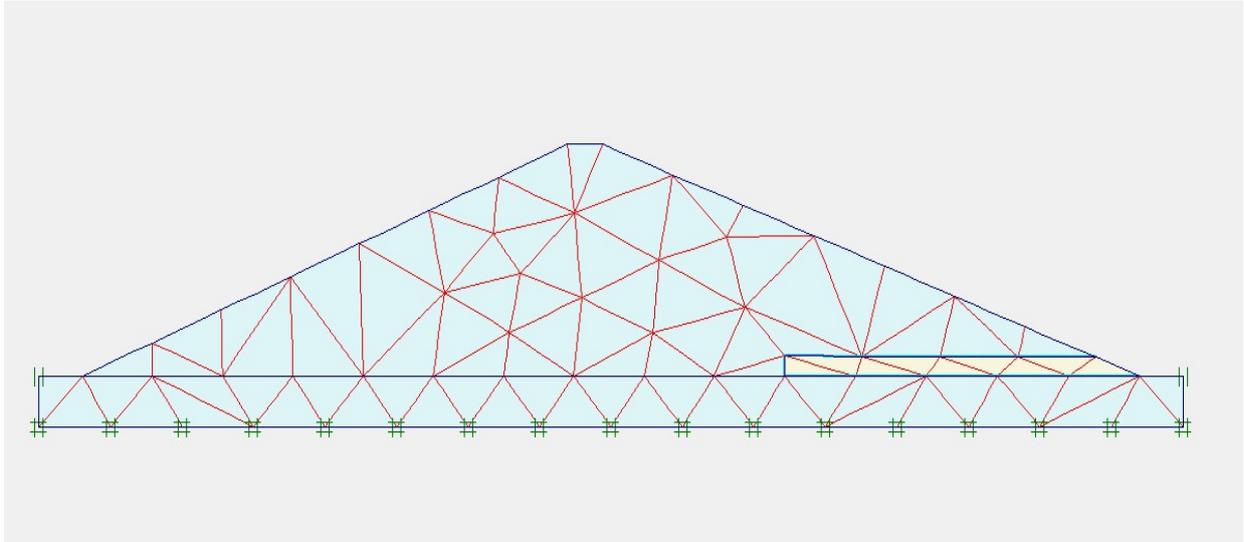


Figure. IV.3 : Maillage et conditions aux limites

IV.4.5.Procédure de modélisation

La modélisation numérique nécessite l'introduction des caractéristiques géotechniques et mécaniques des matériaux utilisés selon le type du modèle de comportement choisi Mohr-coulomb pour chaque matériaux et le niveau de remplissage de la retenue une fois le niveau normal (RN) et d'autre fois le niveau des plus hautes des eaux (PHE) et le type de chargement appliqué soit dynamique pour le cas de l'accélérogramme de séisme de Boumerdès de l'année Mai 2003 où hydrostatique pour le cas de niveau de la retenue et de la vidange rapide.

IV.4.6.Niveau de remplissage de la retenue

IV.4. 6.1. Niveau normal (RN) :

Le niveau de remplissage de la retenue normale (RN) est situé à la hauteur $h = 39$ m

Phase 0 : Au départ, on ne considère que le sol de fondation, on désactive les autres éléments du barrage, on considère que la nappe phréatique est à la surface de sol de fondation, puis on génère les contraintes hydrostatiques et la pression interstitielle.

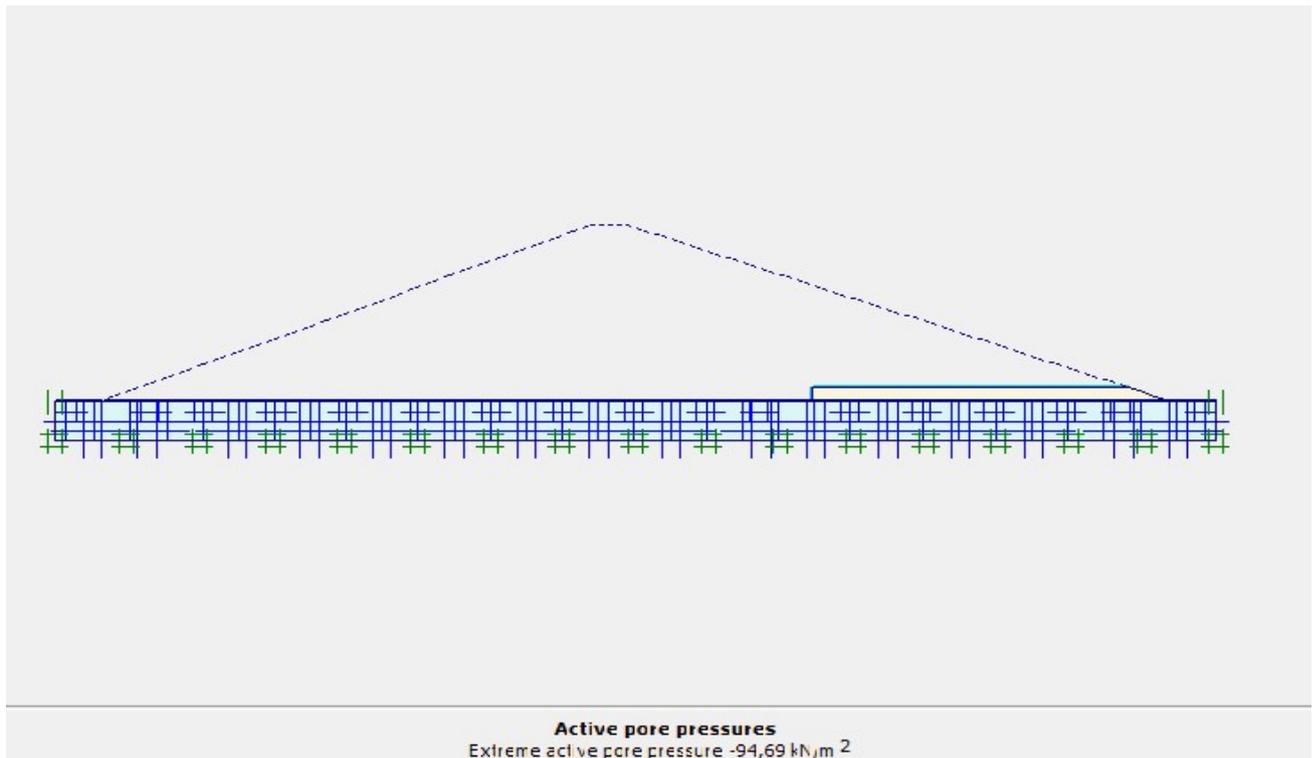


Figure IV.4: Distribution des pressions interstitielles au niveau du sol de la fondation

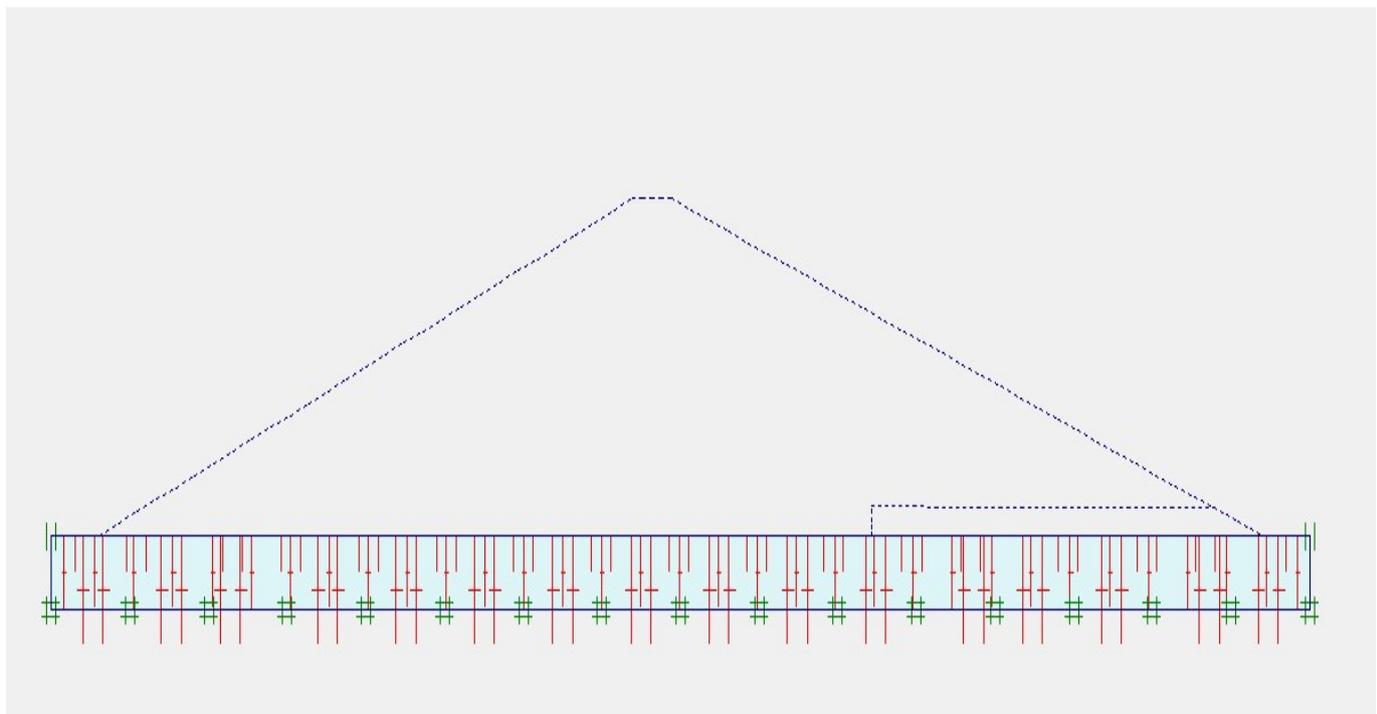


Figure IV.5 : Distribution des contraintes initiales au niveau du sol de la fondation

Phase 1 : On active les éléments désactivés

Phase 2 : Puis on fait la mise en eau au niveau de la retenue normale (RN)

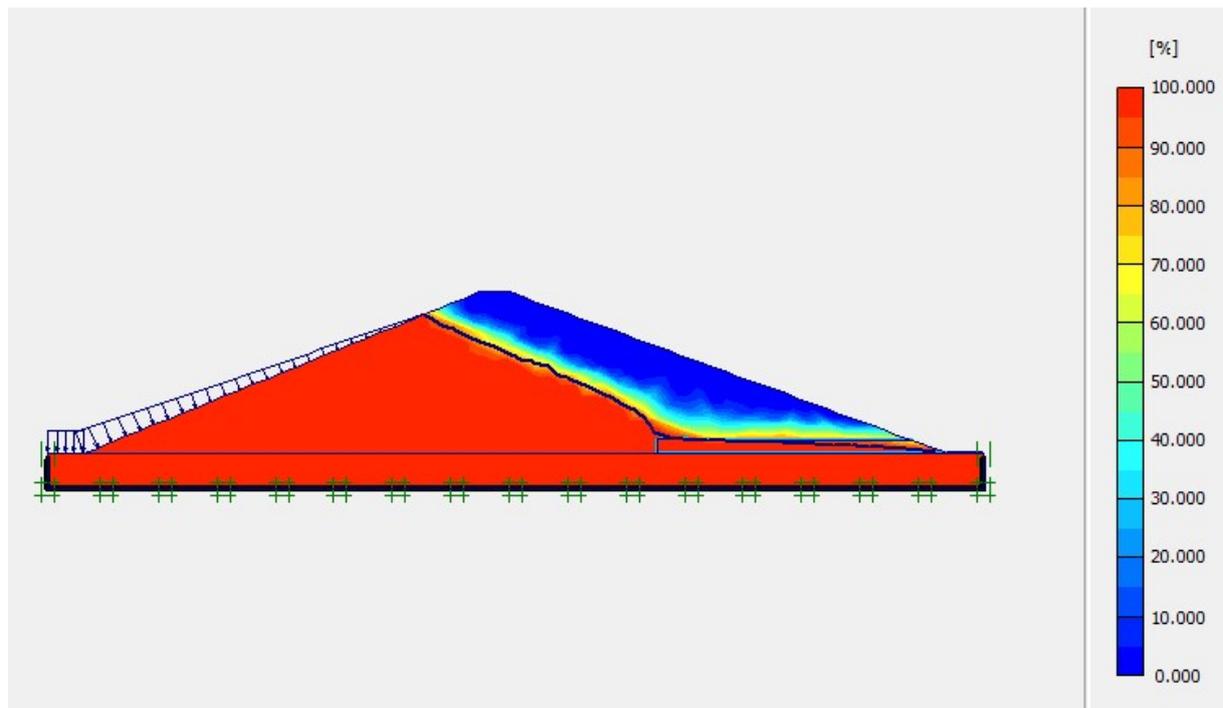


Figure IV.6 : ligne et degré de saturation

Phase 3 : on lance les calculs afin d'obtenir les résultats de déplacement, facteur de sécurité et la déformation de maillage enregistrés.

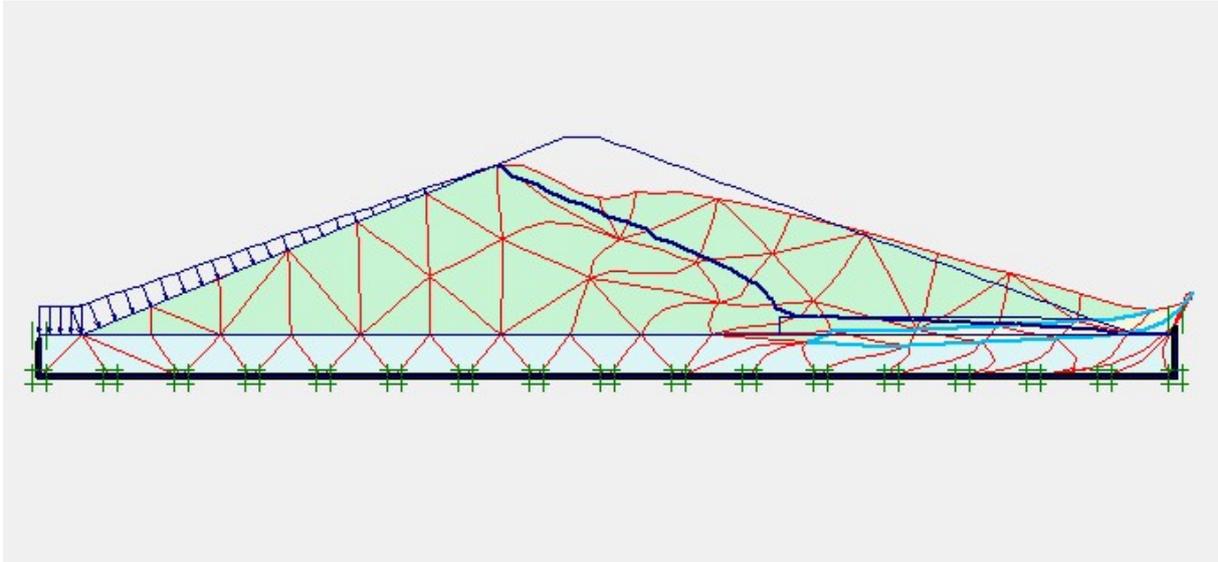


Figure IV.7 : déformation de Maillage

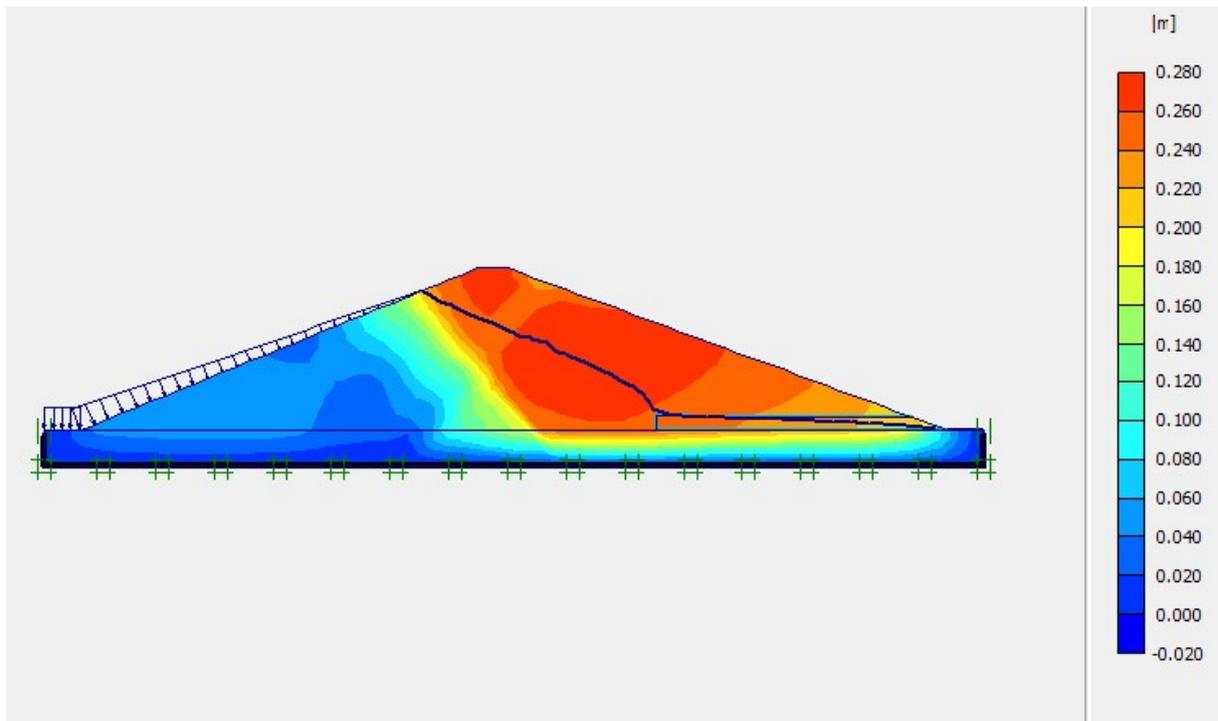


Figure IV.8: Déplacement total dans le barrage

- Les résultats obtenus des déplacements enregistrés sur le barrage dans le sens vertical et horizontal :

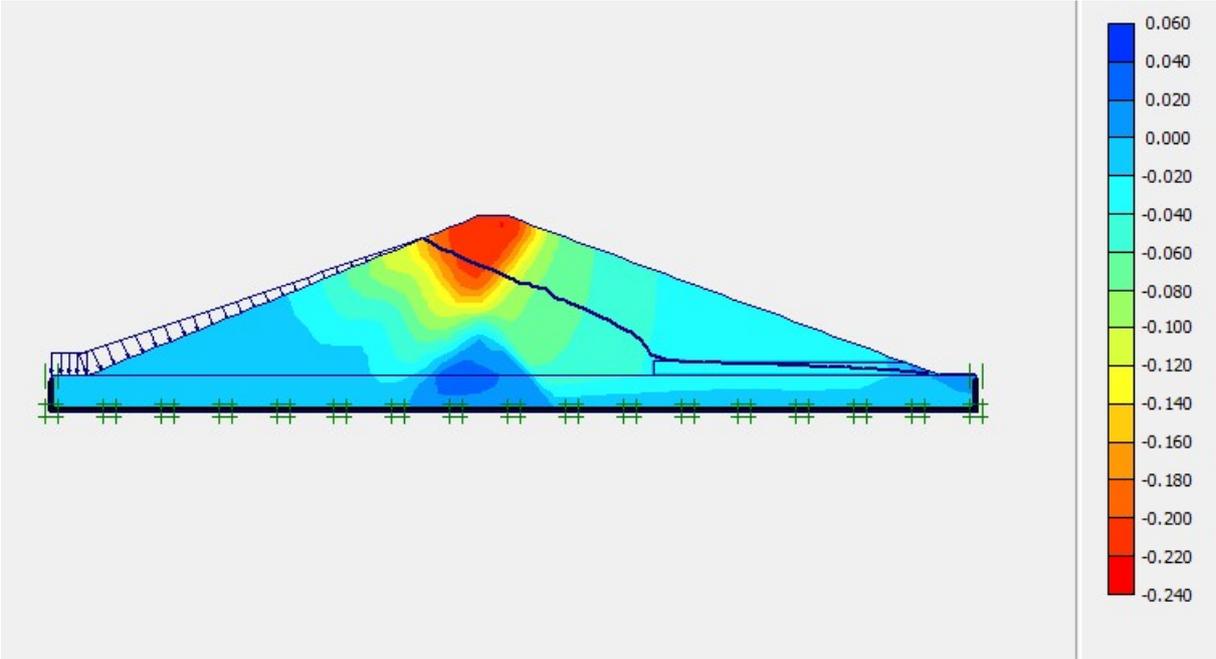


Figure IV.9 : Champs de déplacement vertical

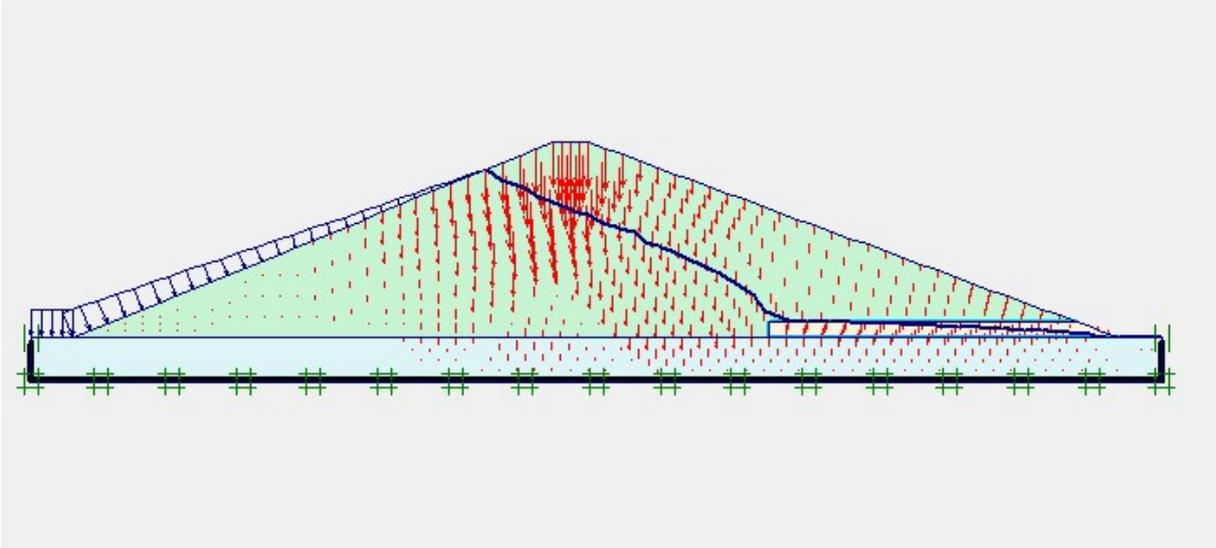


Figure IV.10 : Champs de déplacement vertical

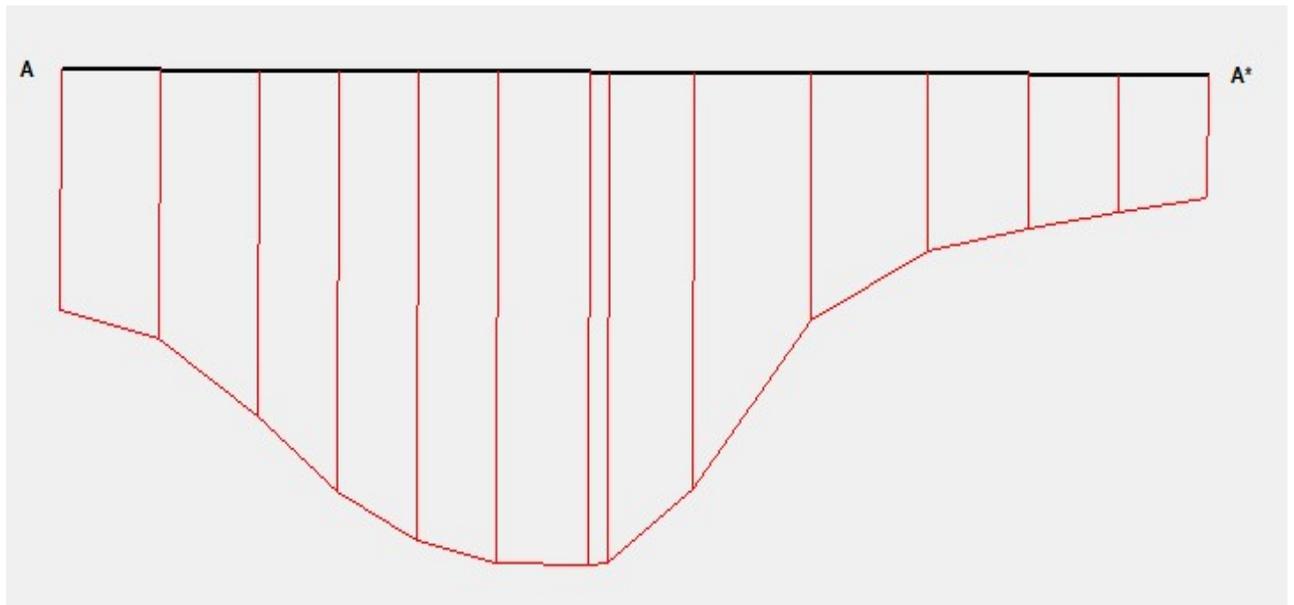


Figure IV.11. Déplacement vertical au niveau de la crête

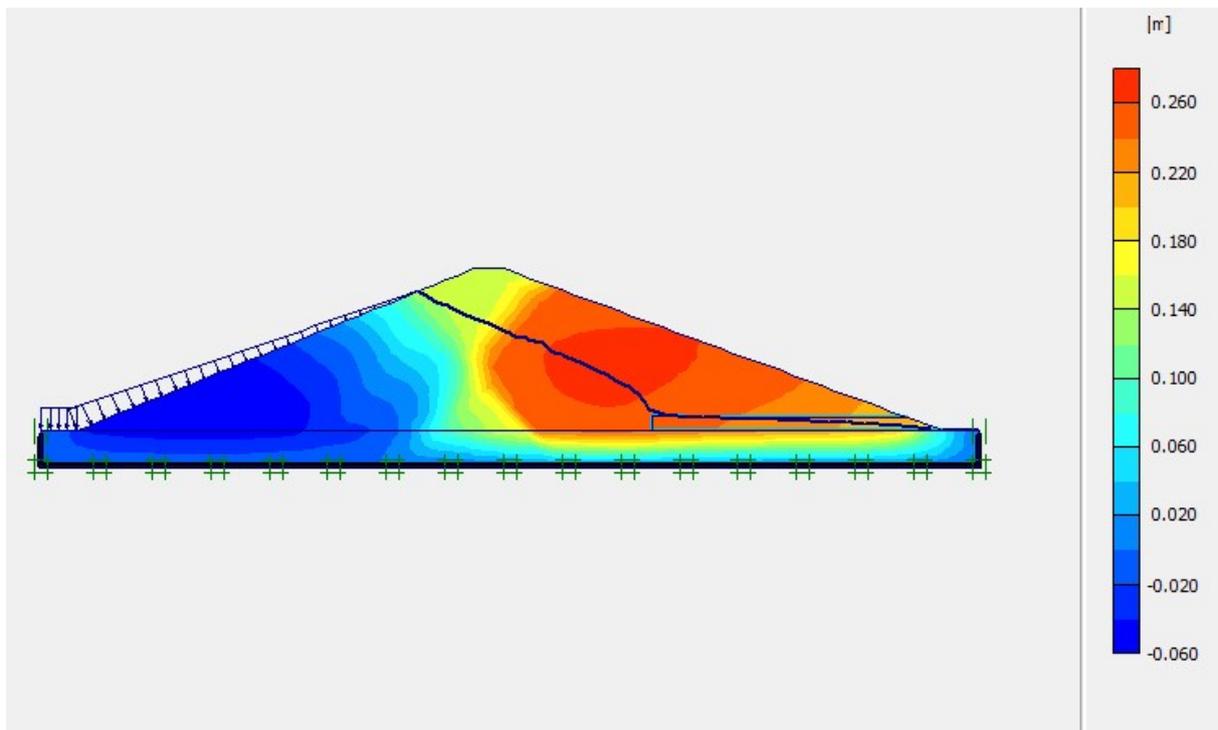


Figure IV.12. Champs de déplacement horizontal

a-Résultats et constats :

D'après les figures IV8, IV9, IV10, IV10, IV11 et IV12 on remarque que le déplacement est concentré et localisé au niveau de la crête est tend vers le coté aval progressivement après la mise en eau.

-Les résultats obtenus des facteurs de sécurité (Fs) dans le barrage:

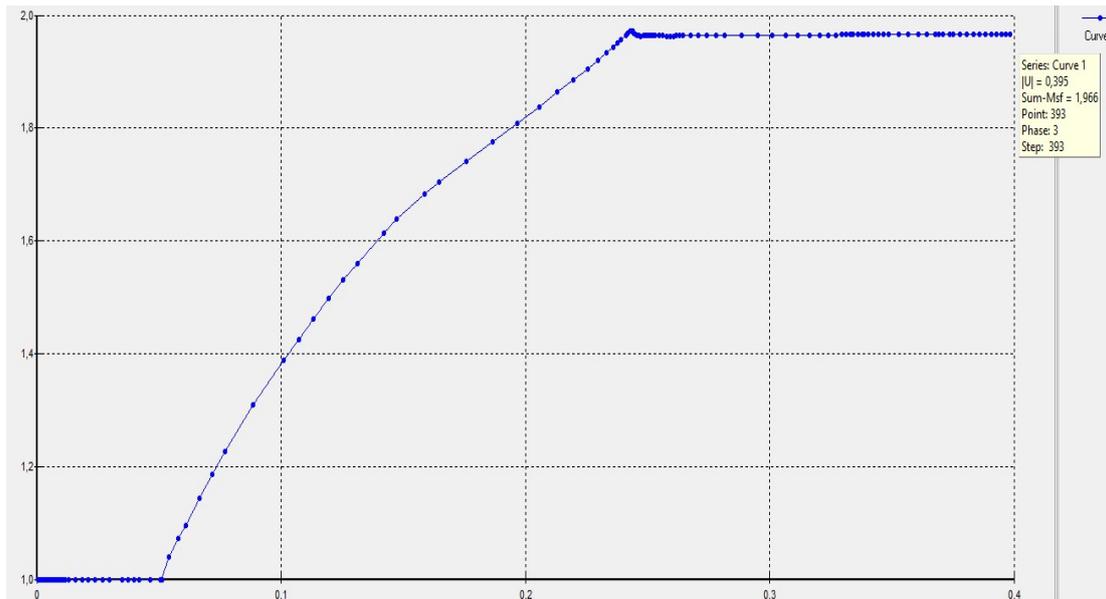


Figure IV.13: Courbe de facteur de sécurité (F_s) de barrage

b- Résultats et constats :

La courbe illustrée dans la figure IV.13 démontré que le facteur de sécurité (F_s) augmente jusqu'à l'atteinte d'une valeur maximale puis il se stabilise.

Phase 4 : après la mise en eau on applique une charge dynamique représenté par l'accélérogramme de séisme de Boumerdès de Mai 2003(Strong Motion CD-ROM SMC de Boumerdès) a la base de sol de fondation puis on obtient les résultats suivant :

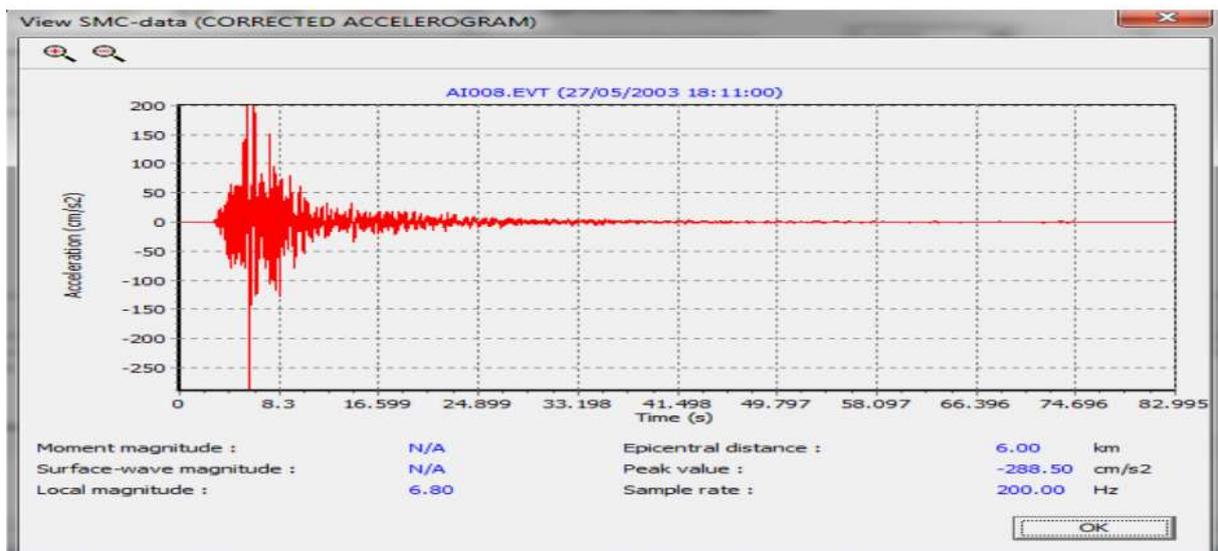


Figure IV.14 :Accélérogramme de séisme de Boumerdès de Mai 2003

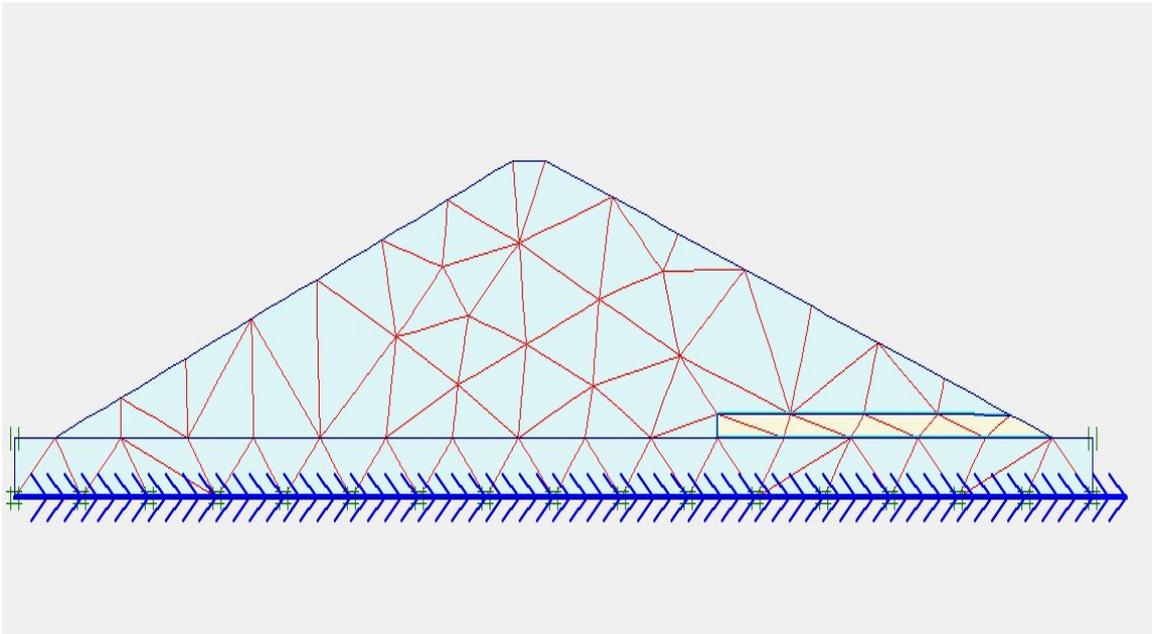


Figure IV.15 : Application de la charge dynamique a la base du modèle géométrique

Phase 5 : On lance les calculs afin d'obtenir les résultats de déplacement, facteur de sécurité et la déformation de maillage enregistrés.

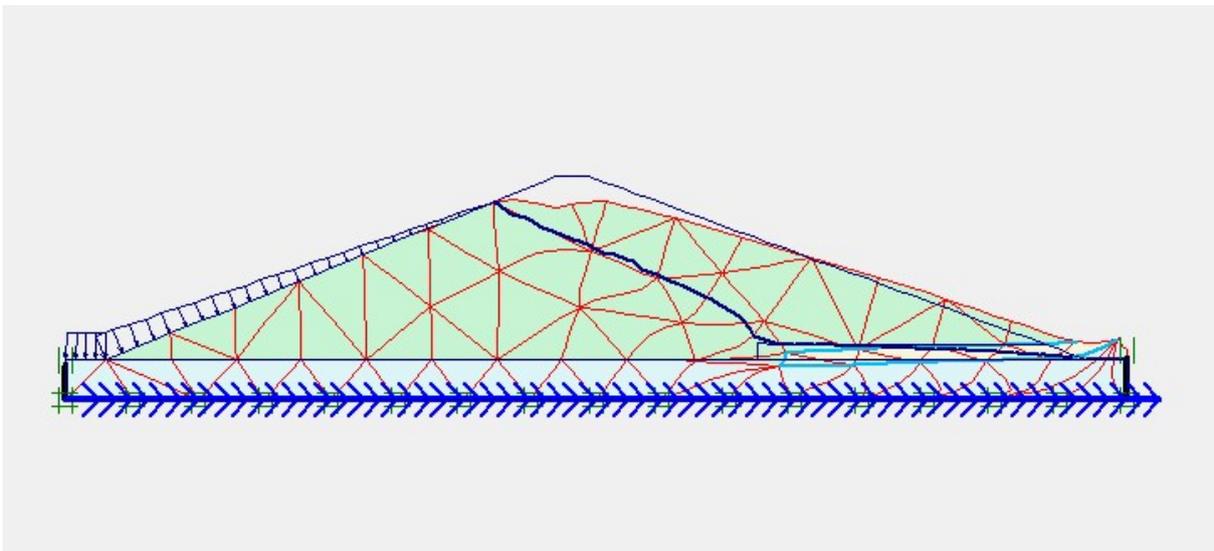


Figure IV.16 : Déformation de Maillage

- Les résultats des déplacements enregistrés sur le barrage dans le sens vertical et horizontal :

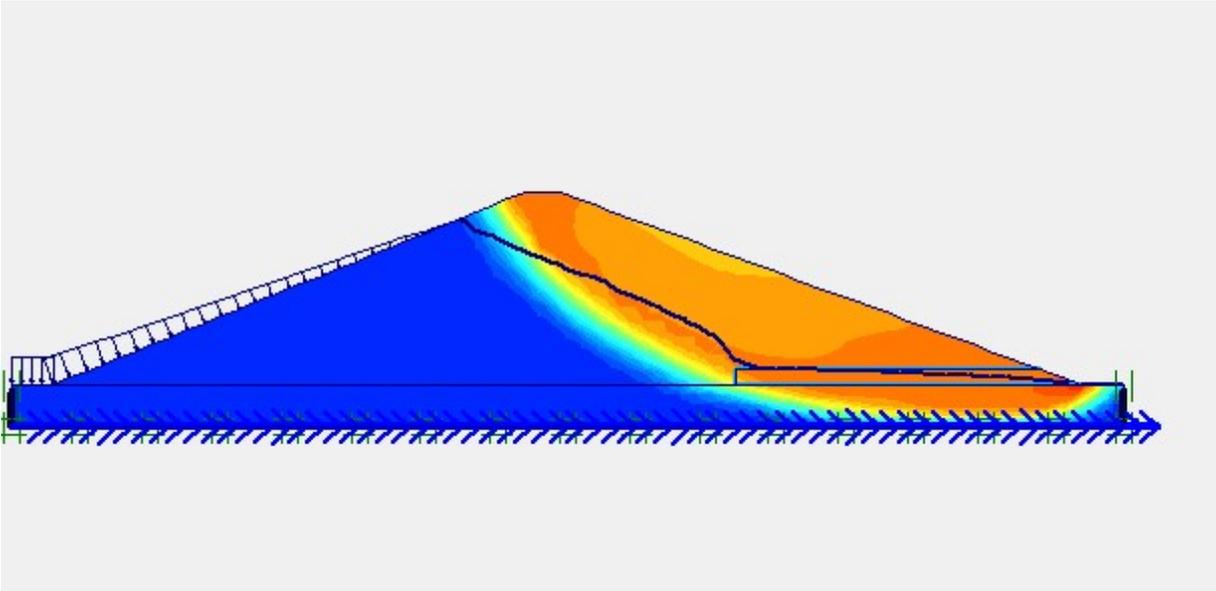


Figure IV.17 : Champs de déplacement total

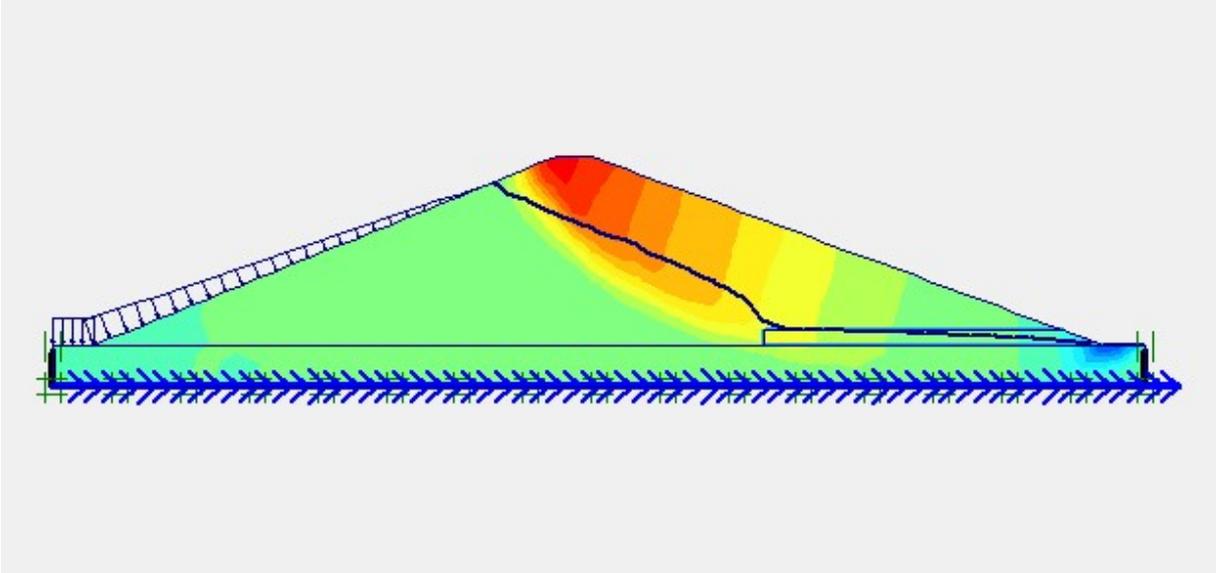


Figure IV.18 : Champs de déplacement Vertical

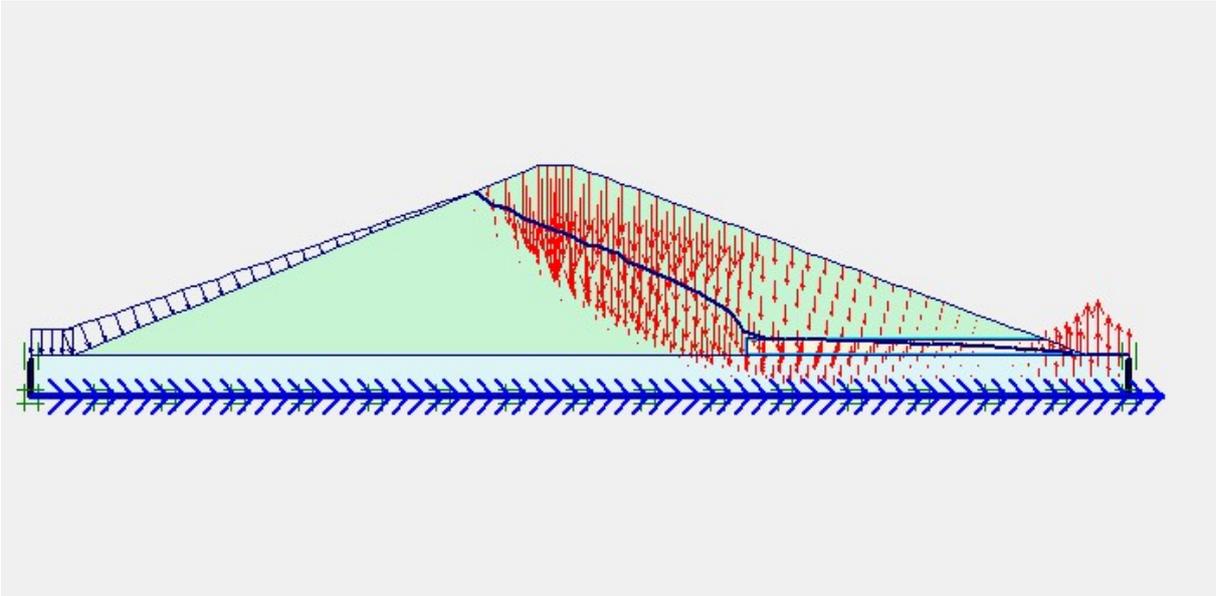


Figure IV.19 : Champs de déplacement vertical (vue en flèche)

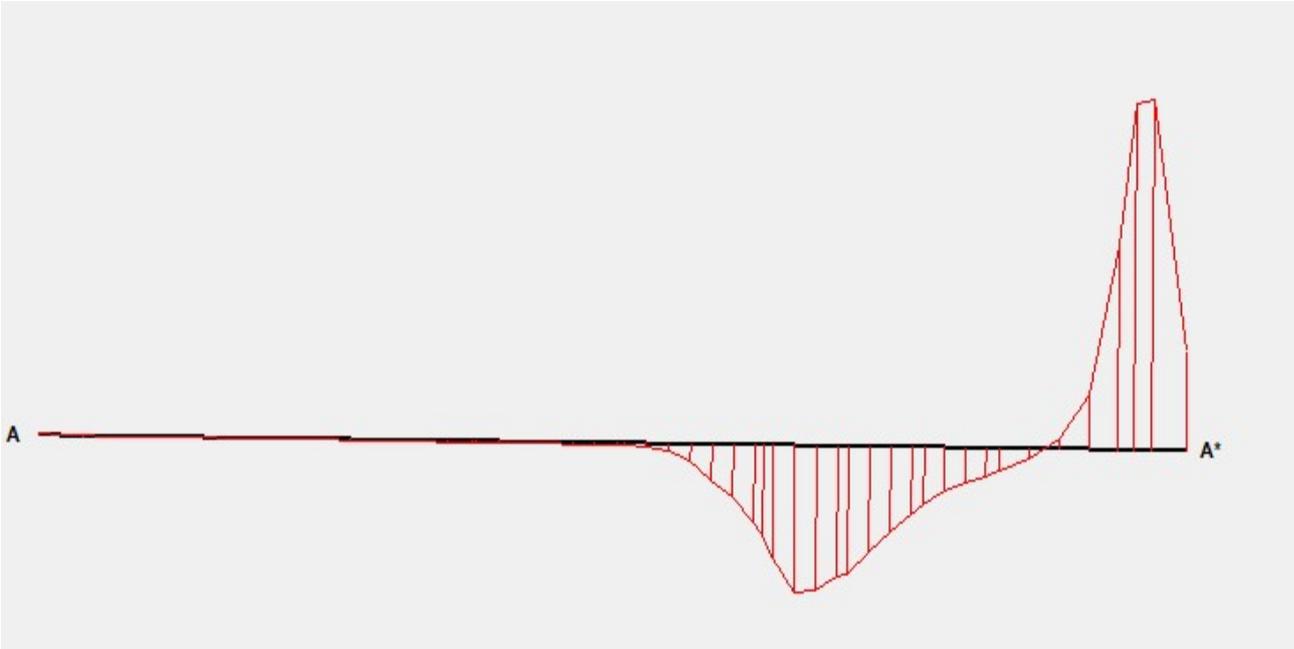


Figure IV.20 : Tassement (déplacement vertical) et soulèvement de fondation de côté aval

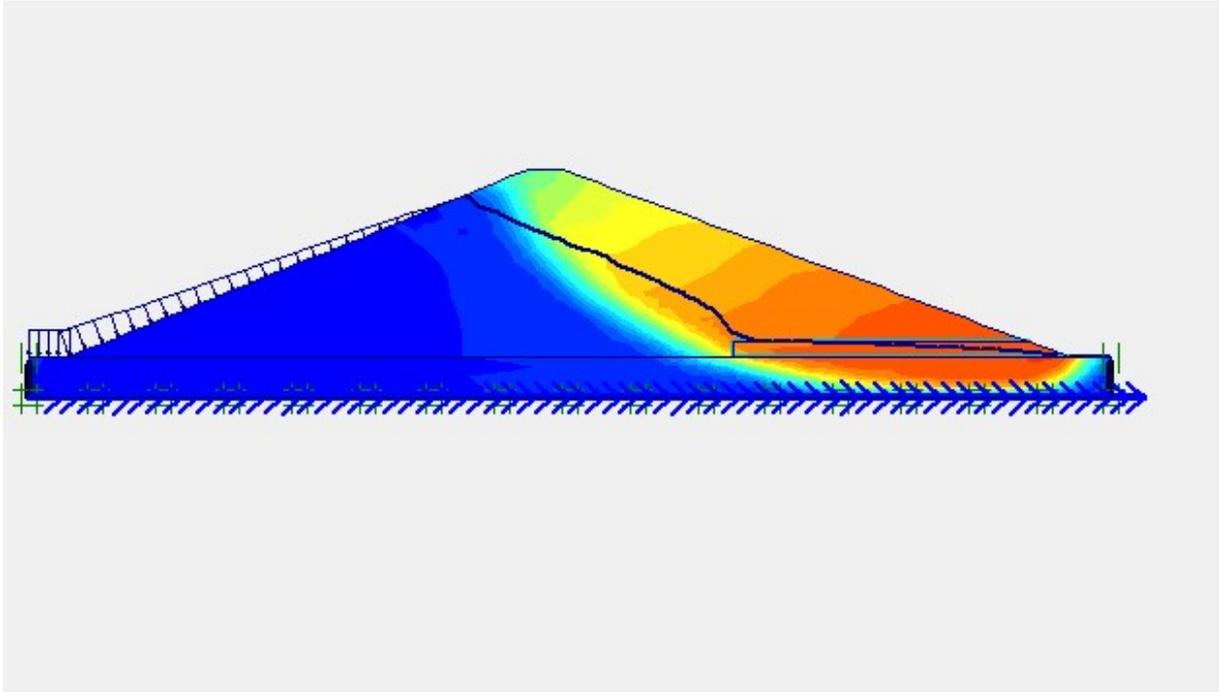


Figure IV.21 : Champs de déplacement horizontal

a- Résultats et constats :

On remarque d'après les figures IV.16, IV.17, IV.18, IV.19 et IV.20 ci-dessus que le champ de déplacement est condensé au niveau de la crête et s'oriente aussi vers le côté aval d'une manière considérable avec le soulèvement du sol de fondation de même côté quand la charge dynamique est appliqué à la base de modèle géométrique.

- Les résultats obtenus des facteurs de sécurité (F_s) dans le barrage:

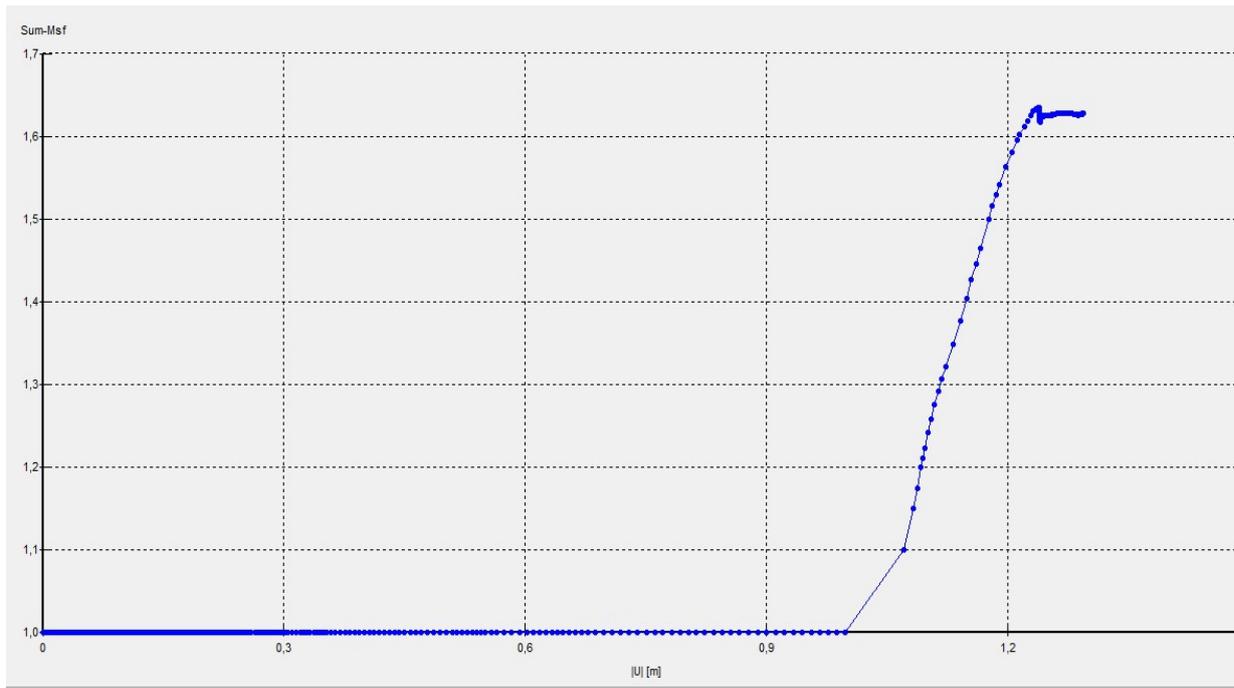


Figure IV.22 : Courbe de facteur de sécurité (F_s) de barrage

b- Résultats et constats :

Au moment, où l'application de la charge dynamique, on constate une diminution de la valeur de facteur de sécurité par rapport au premier cas de chargement (mise en eau) selon la courbe illustré dans la figure IV.21.

Phase 6 : Dans le cas d'une vidange rapide c'est-à-dire la variation de la charge hydraulique de la hauteur $h=39$ m à la hauteur $h=0$ m on essaye de voir le comportement du barrage.

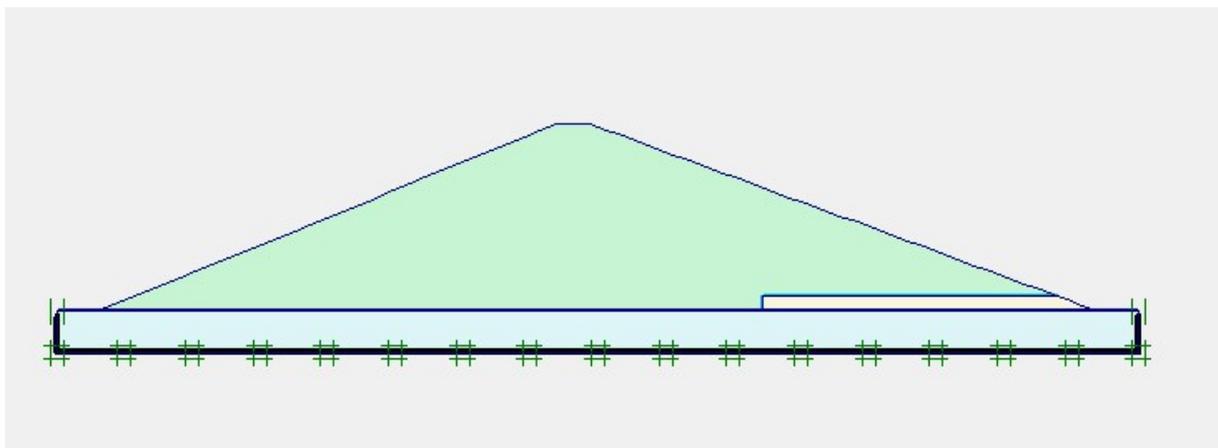


Figure. IV.23 : Champ d'écoulement (cas de vidange rapide)

Phase 7 : On lance les calculs afin d'obtenir les résultats de déplacement, facteur de sécurité et la déformation de maillage enregistrés.

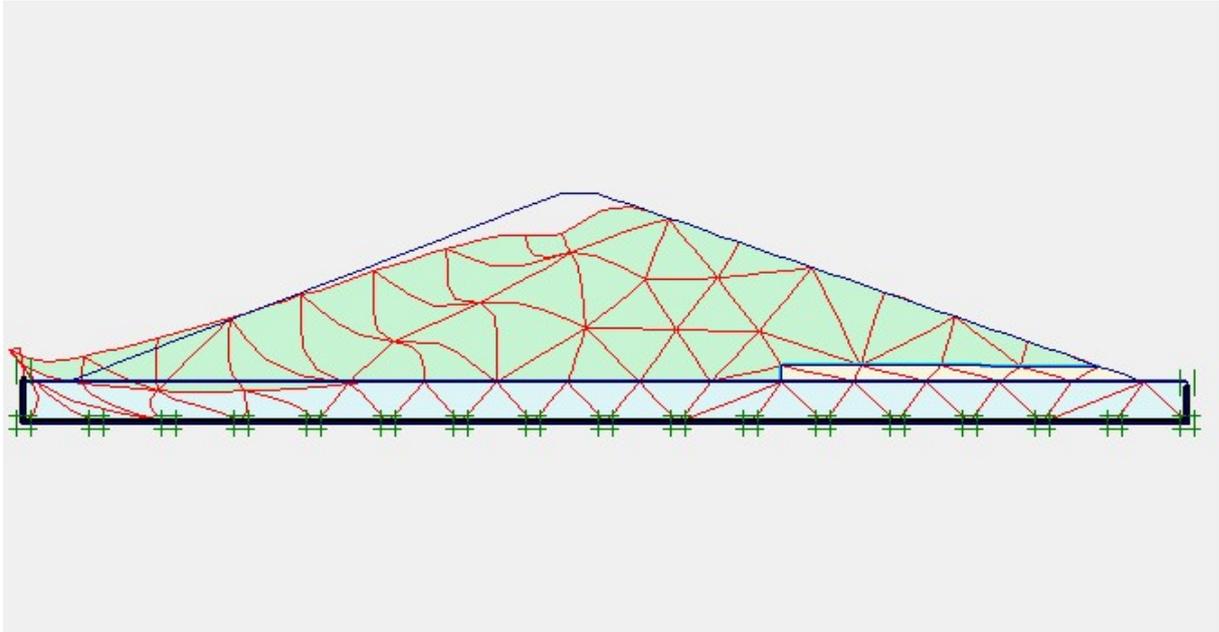


Figure IV.24 : Déformation de maillage

- Les résultats des déplacements enregistrés sur le barrage dans le sens vertical et horizontal :

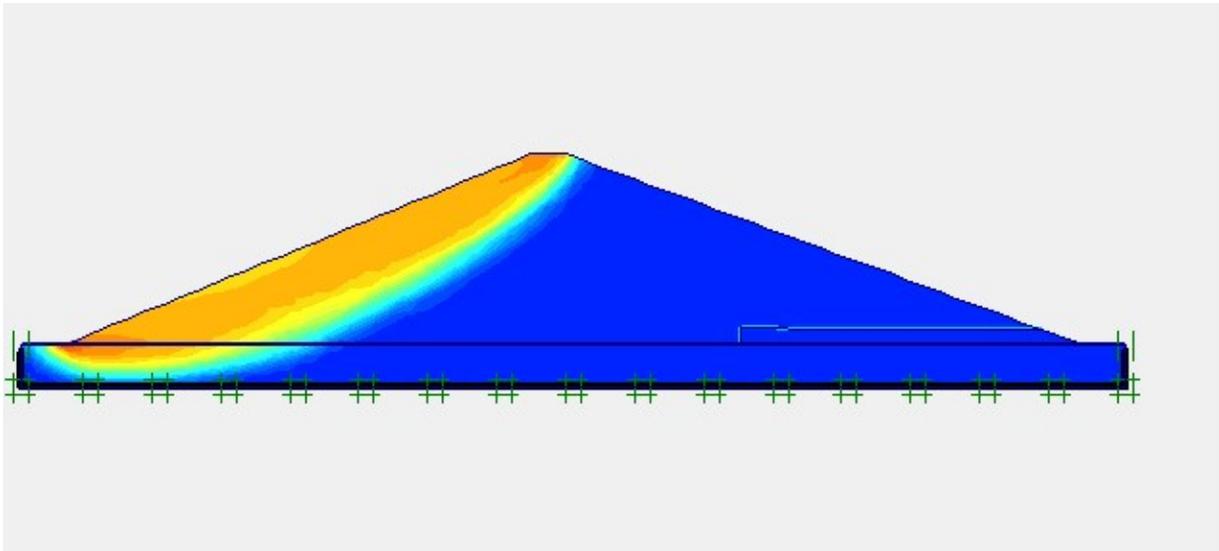


Figure IV.25 : Déplacement total et cercle de rupture

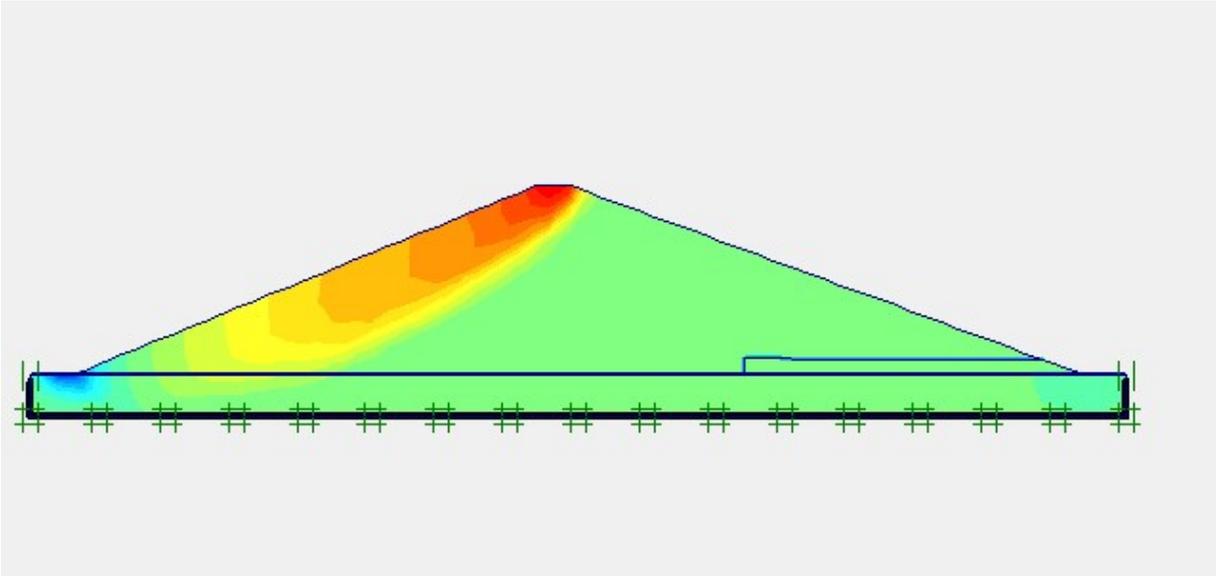


Figure IV.26 : déplacement vertical

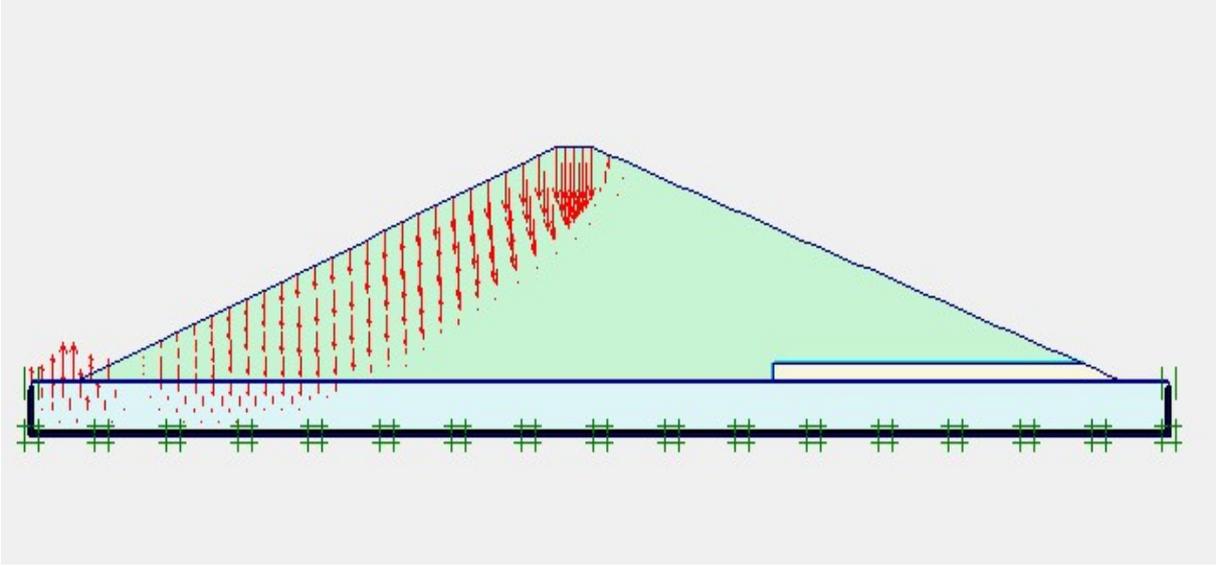


Figure IV.27 : Déplacement vertical (vue en flèche)



Figure IV.28 : Soulèvement et Tassement du sol de fondation de côté amont

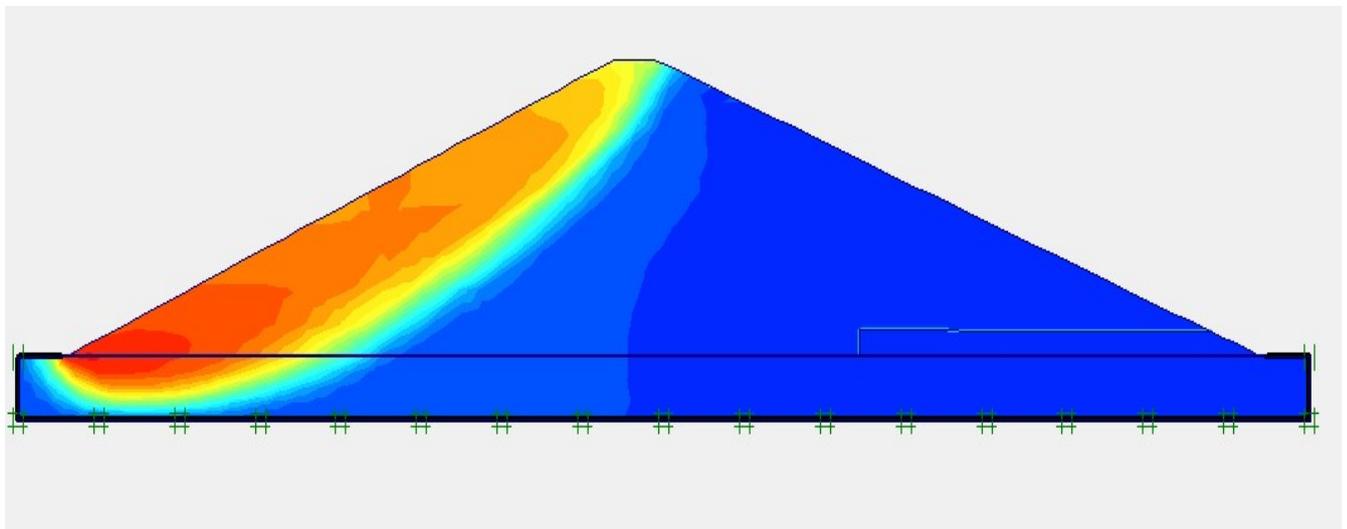


Figure IV.29 : déplacement horizontal

a- Résultats et constats :

On distingue d'après les figures IV.23, IV.24, IV.25, IV.26, IV.27, et IV.28 que le champ de déplacement est orienté vers le côté amont et un soulèvement du sol de fondation est perçue de même côté suivant la vidange rapide qui induit un sens inverse d'écoulement de côté aval vers le côté amont.

-Les résultats enregistrés des facteurs de sécurité (F_s) dans le barrage:

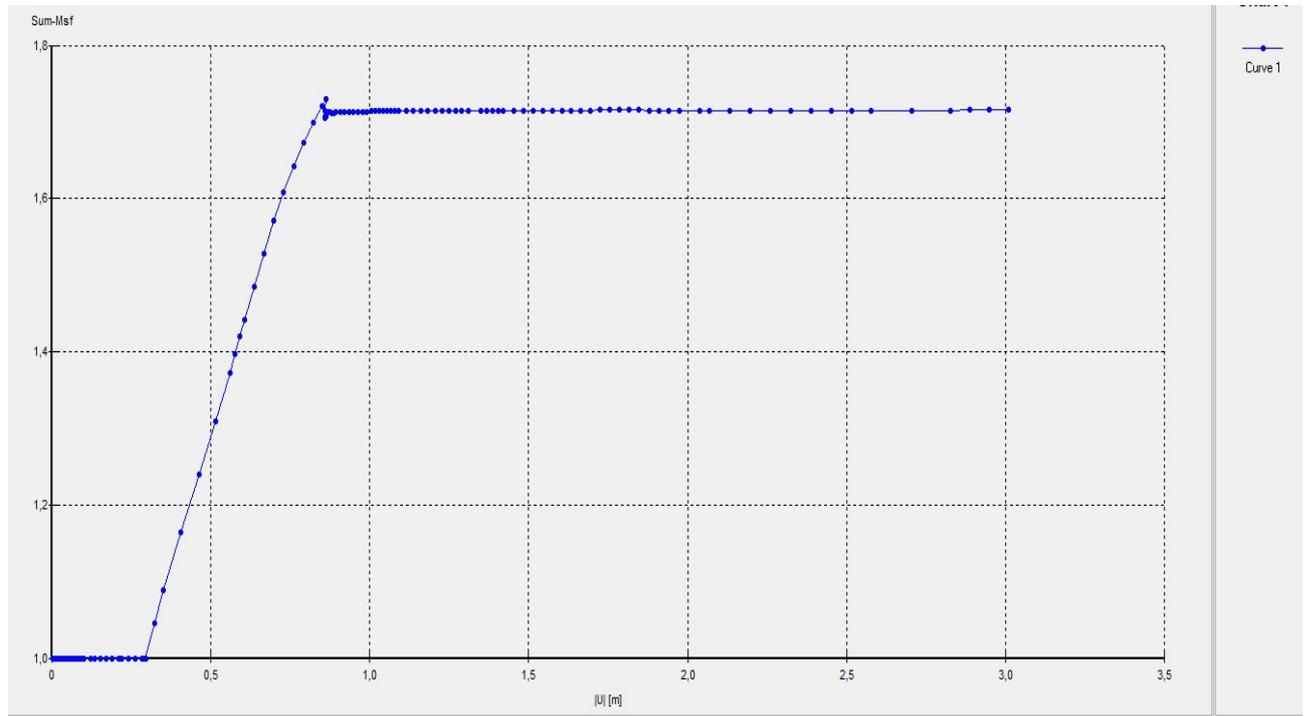


Figure IV.30 : courbe de facteur de sécurité (F_s)

b- Résultats et constats :

Au vu de la figure IV.29 une légère augmentation de la valeur de facteur de sécurité est marquée après la vidange rapide du barrage de la hauteur $h=39$ m à la hauteur nulle $h=0$ m par rapport à la charge dynamique.

IV.4.6.2. Niveau des plus hautes des eaux (PHE) :

Le niveau de remplissage de la retenue dans le niveau des plus hautes des eaux (PHE) est situé à la hauteur $h=43$ m. Dans ce cas on applique les mêmes démarches et processus de modélisations de niveau normal (RN) précédent.

Phase 1 : la mise en eau au niveau des plus hautes des eaux (PHE)

Phase 2 : On lance les calculs afin d'obtenir les résultats de déplacement, facteur de sécurité et la déformation de maillage illustrés dans les figures ci-dessous.

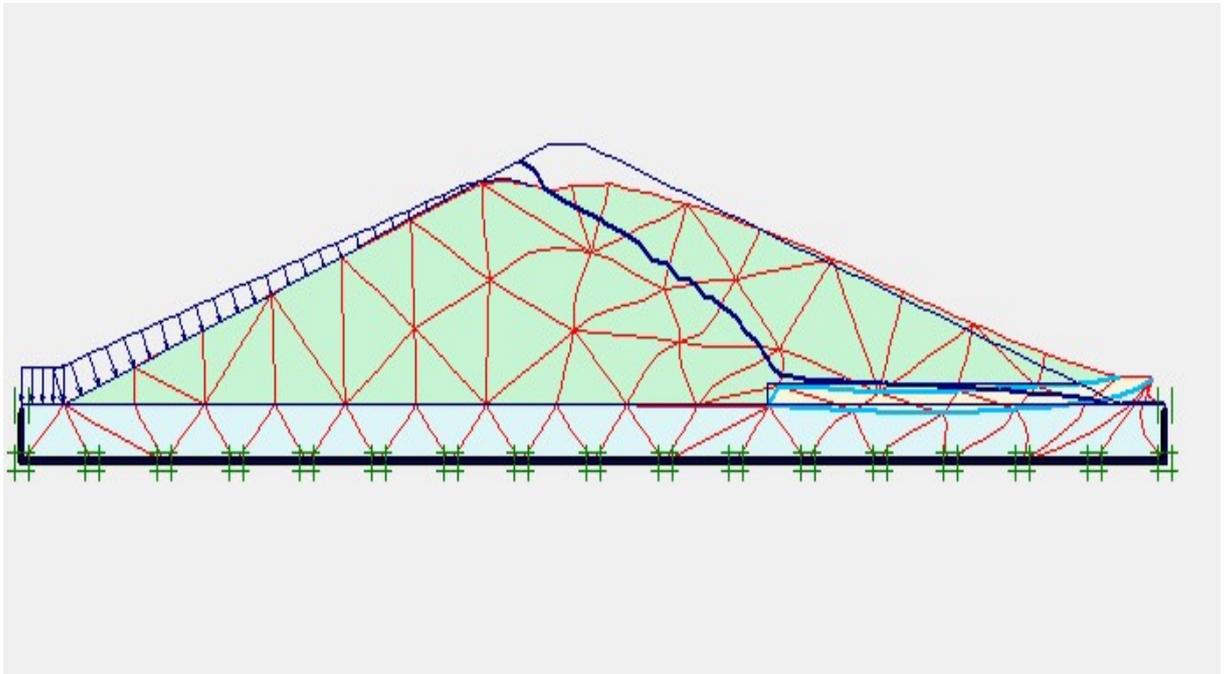


Figure IV.31 : Déformation de maillage

-Les résultats extraient des déplacements figurés ci-dessous sur le barrage dans le sens vertical et horizontal :

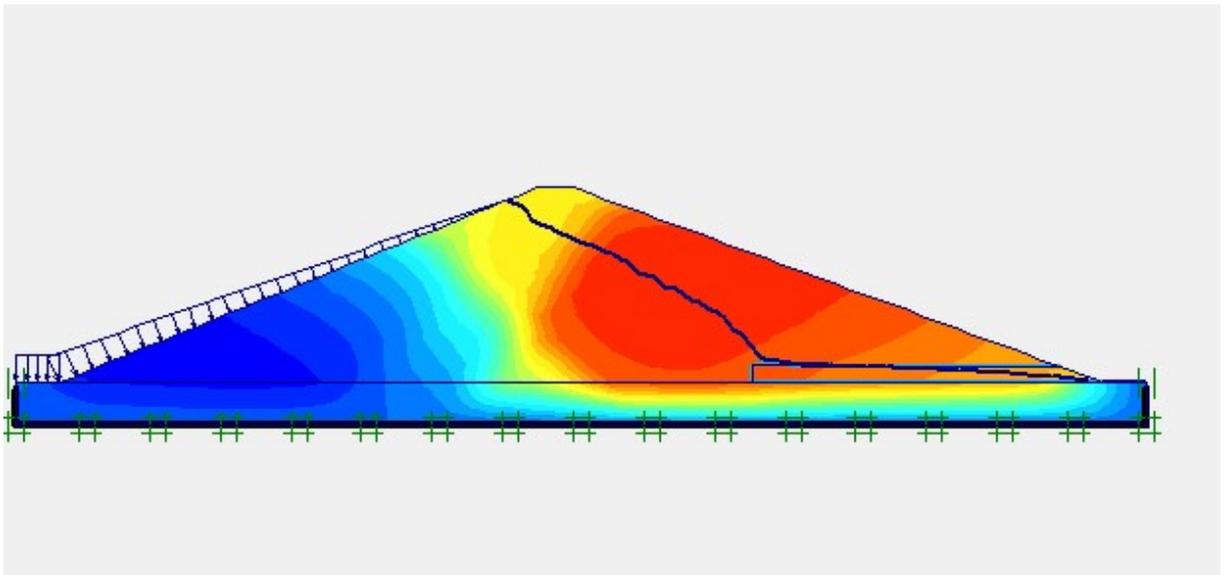


Figure IV.32. Déplacement total

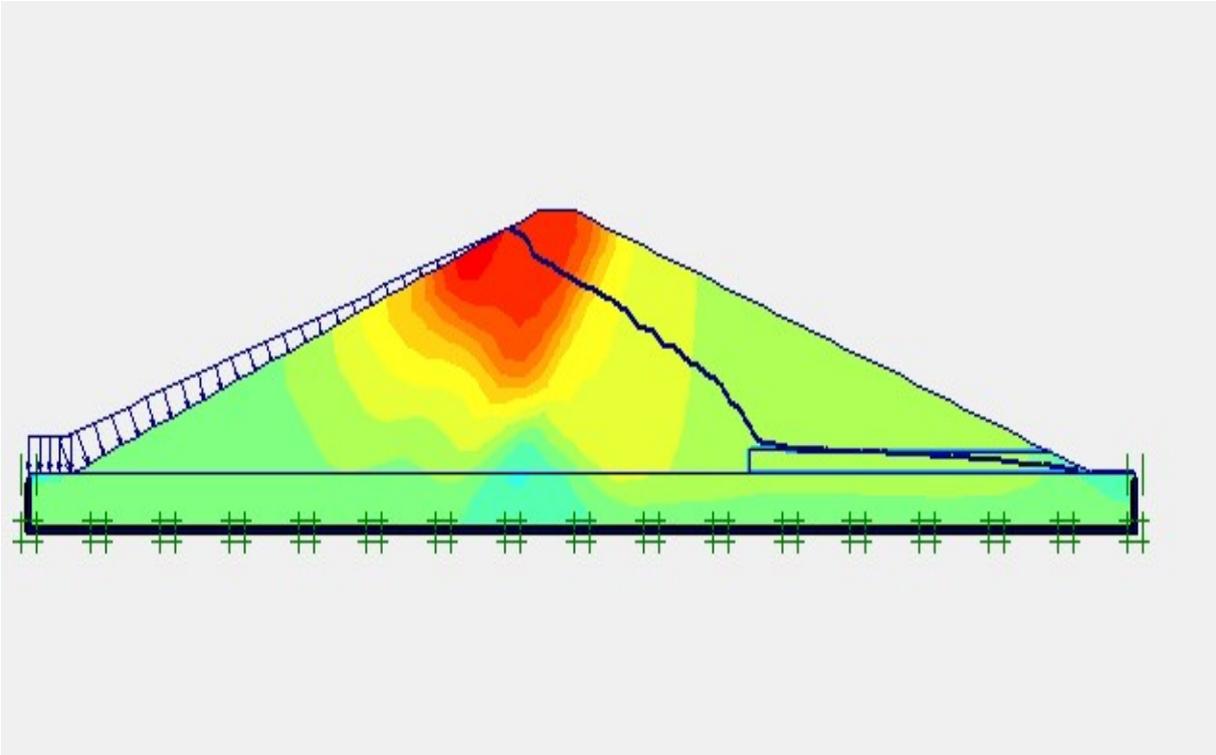


Figure IV.33 : déplacement vertical

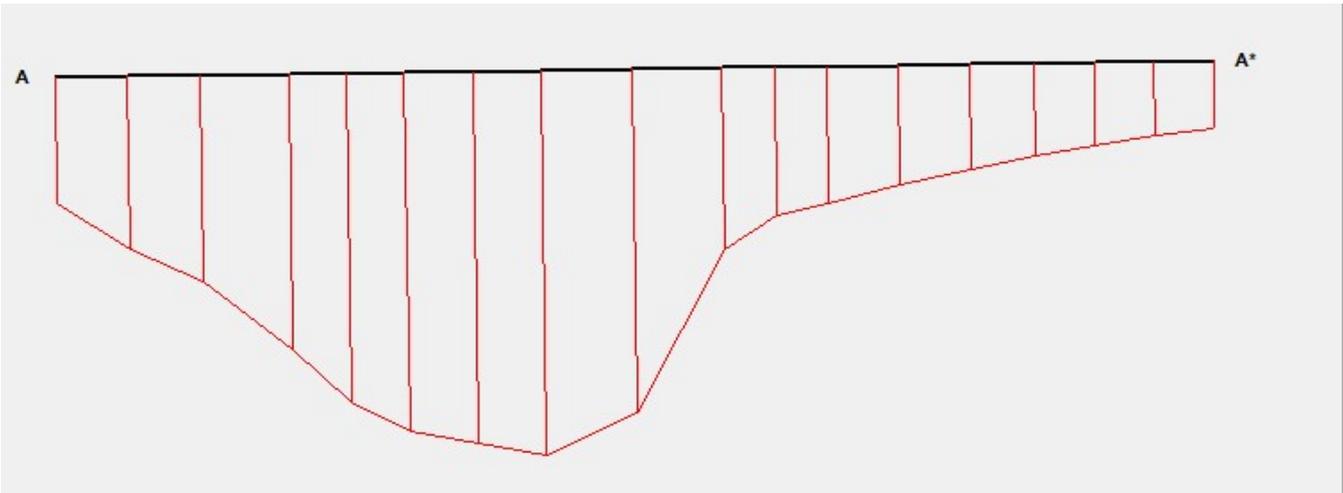


Figure IV.34 : Déplacement vertical dans un point dans la crête

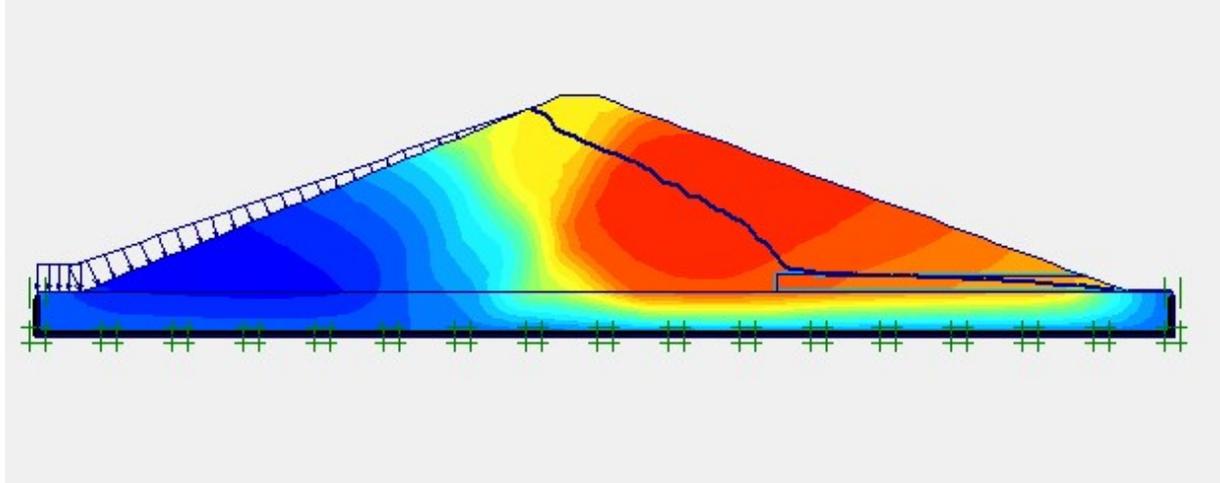


Figure IV.35 : Déplacement horizontal

a- Résultats et constats :

Les résultats enregistrés indiquent une orientation du champ de déplacement de côté amont vers le côté aval en passant par la crête du barrage d'une façon progressive selon le sens d'écoulement observé après la mise en eau. Ce constat est vu sur les figures IV31, IV32, IV33 et IV34 illustrés ci-dessus.

-Les résultats enregistrés des facteurs de sécurité (F_s) dans le barrage:

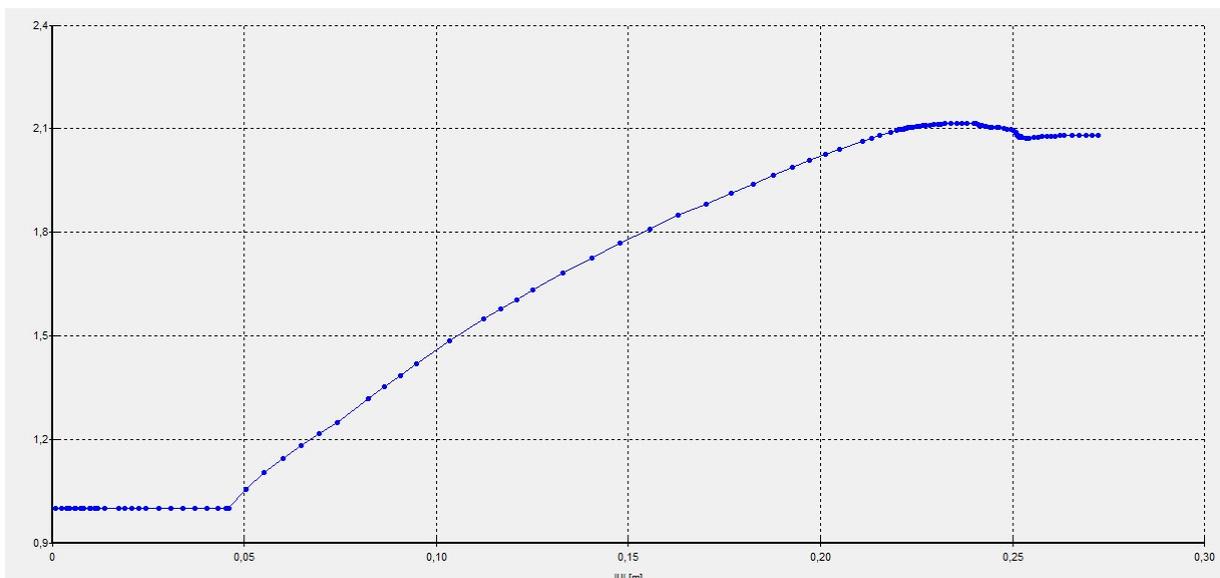


Figure IV.36 : Courbe de facteur de sécurité F_s

b- Résultats et constats :

Selon la courbe représentée sur la figure IV.35 on remarque que la valeur de facteur de sécurité augmente jusqu'à l'atteinte d'une valeur maximale, ensuite elle se stabilise à une valeur constante.

Phase 4 : après la mise en eau on applique une charge dynamique représenté par l'accélérogramme de séisme de Boumerdès de l'année Mai 2003(Strong Motion CD-ROM SMC de Boumerdès) a la base de sol de fondation puis on obtient les résultats suivants :

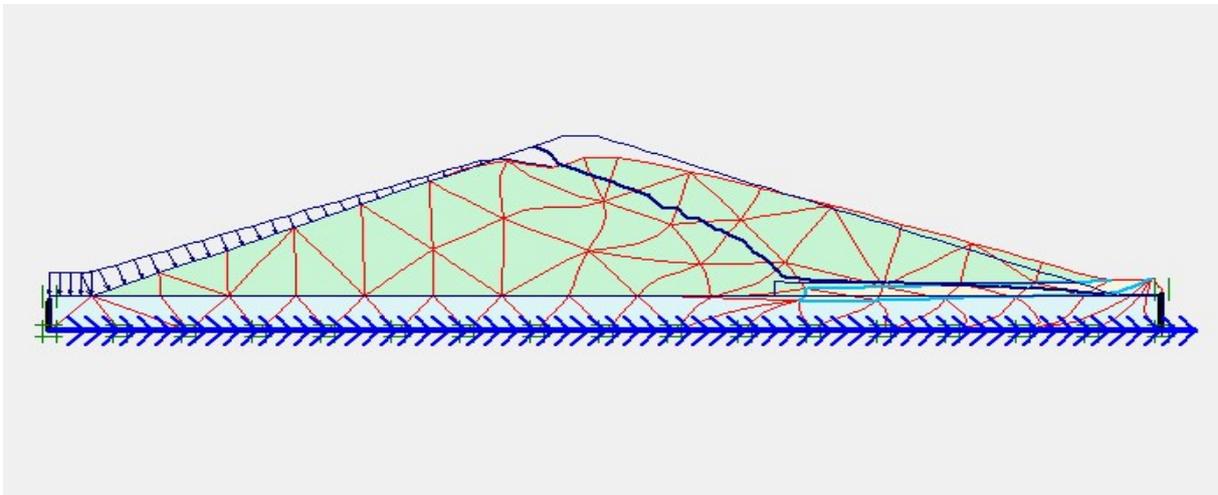


Figure IV.37 : Déformation de maillage

-Les résultats des déplacements figurés ci-dessous sur le barrage dans les deux sens vertical et horizontal :

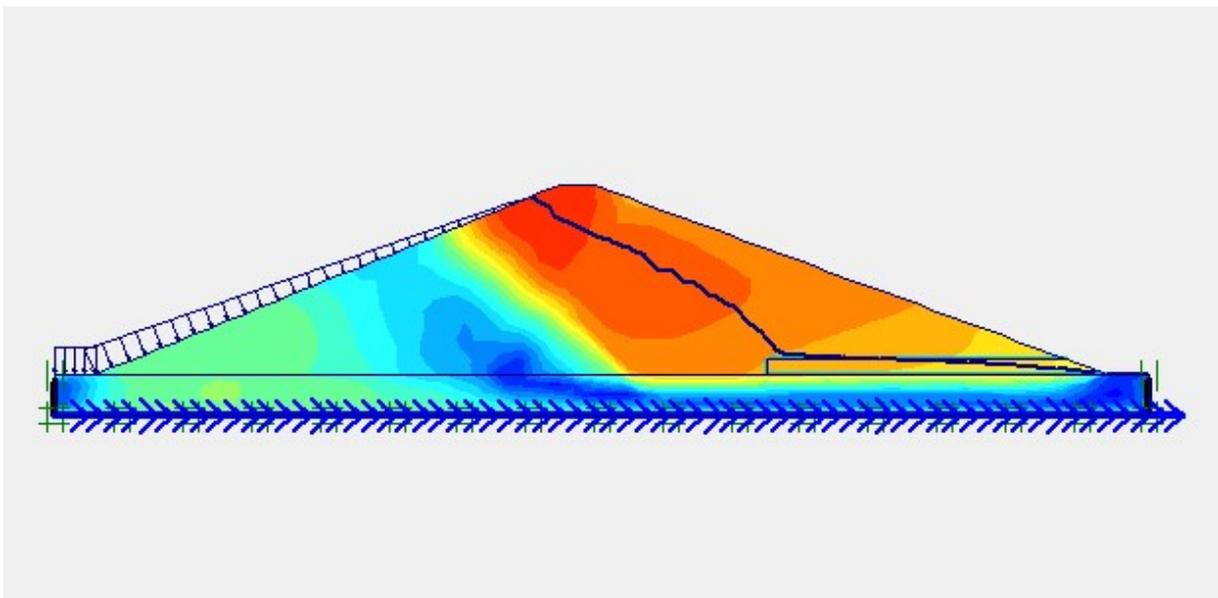


Figure IV.38: Déplacement total

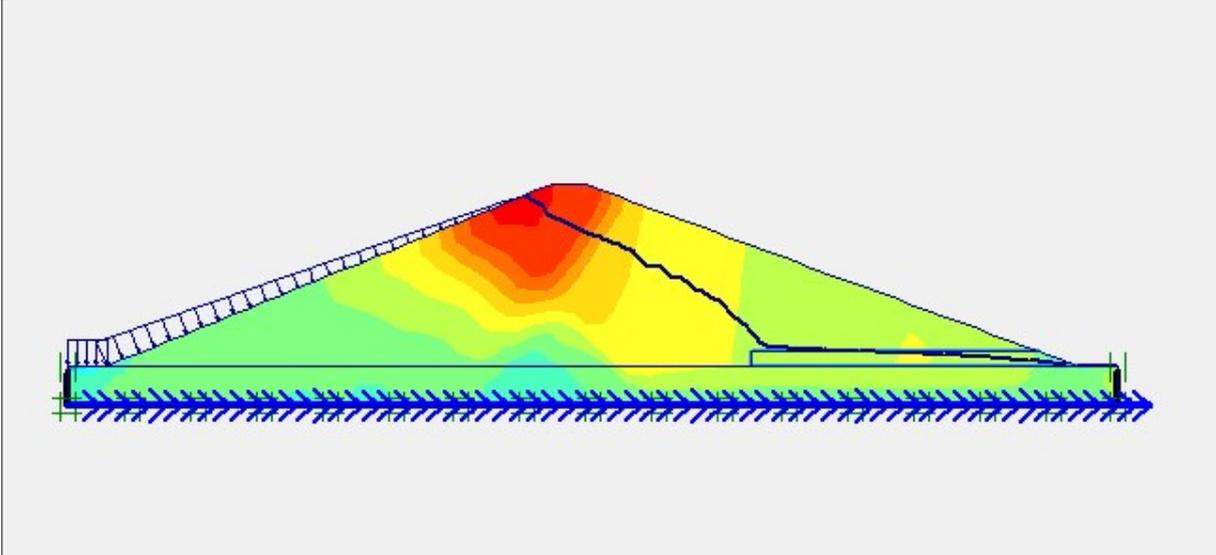


Figure IV.39 : Déplacement vertical

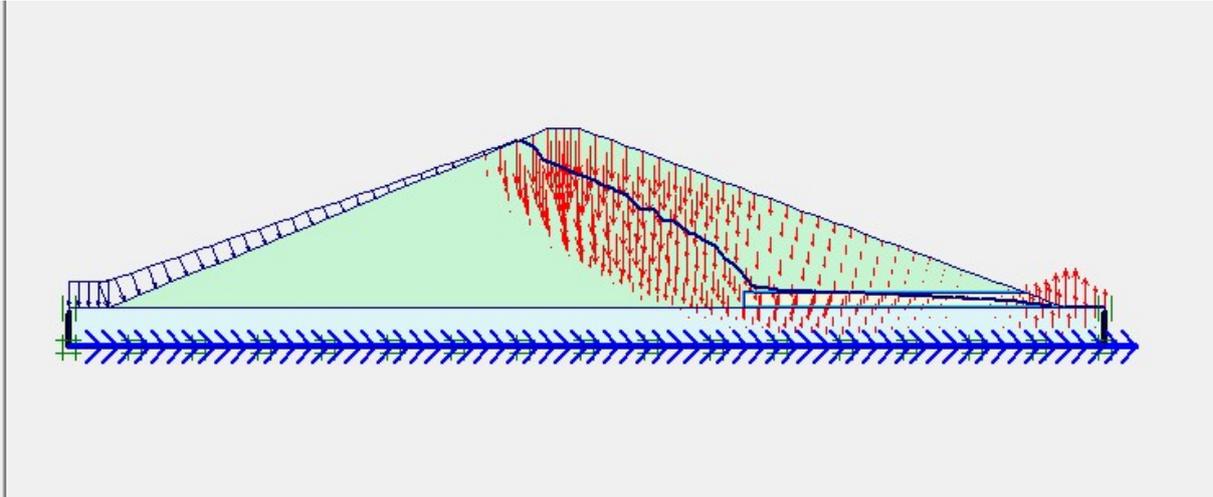


Figure IV.40 : Déplacement vertical (vue en flèche)

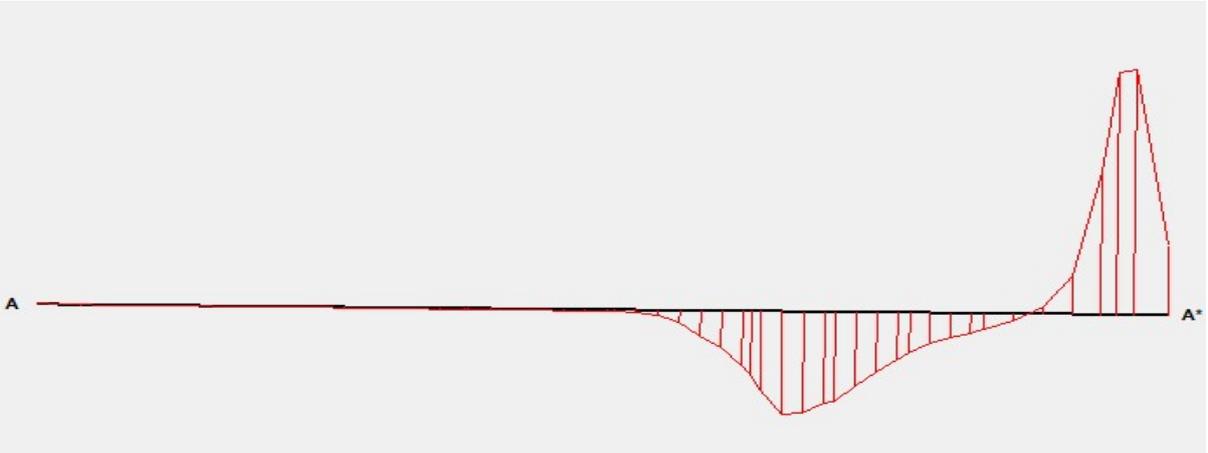


Figure IV.41 : Soulèvement et tassement de fondation de côté aval

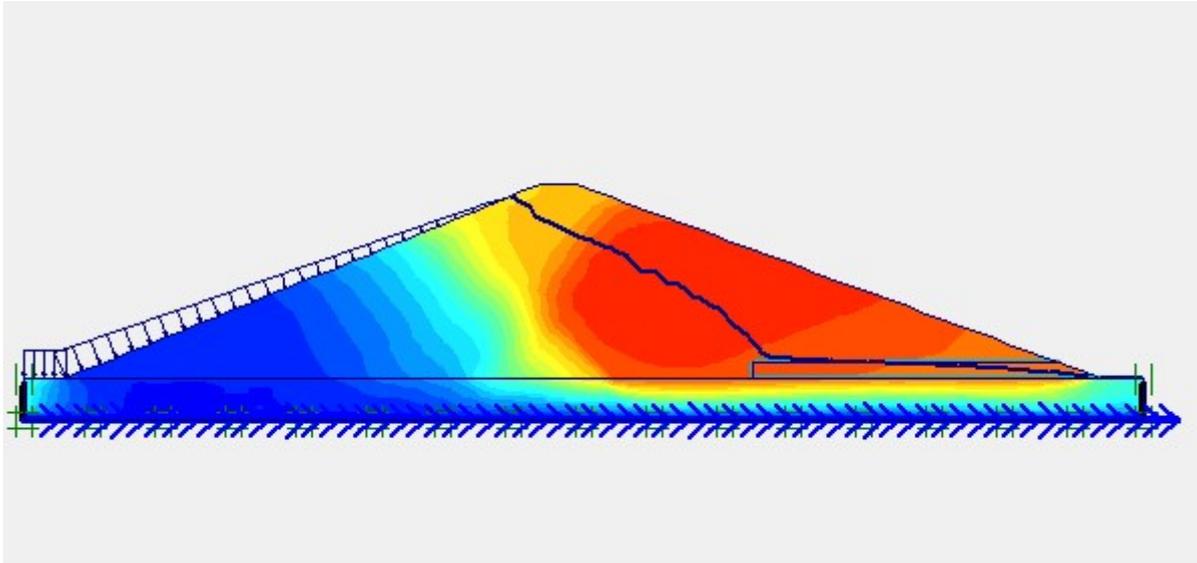


Figure IV.42: Déplacement horizontal

a- Résultats et constats :

Après l'application de la charge dynamique représenté par l'accélérogramme de séisme de Boumerdès on observe que les déplacements s'orientent au côté amont vers le côté aval en passant par la crête du barrage avec une accumulation au niveau de cette dernière, aussi un soulèvement et un tassement au niveau du sol de fondation. Cette remarque est vue sur les figures IV.37, IV.38, IV.39, IV.40 et la figure IV.41 ci-dessus.

-Les résultats des facteurs de sécurité (Fs) illustrés dans le barrage:

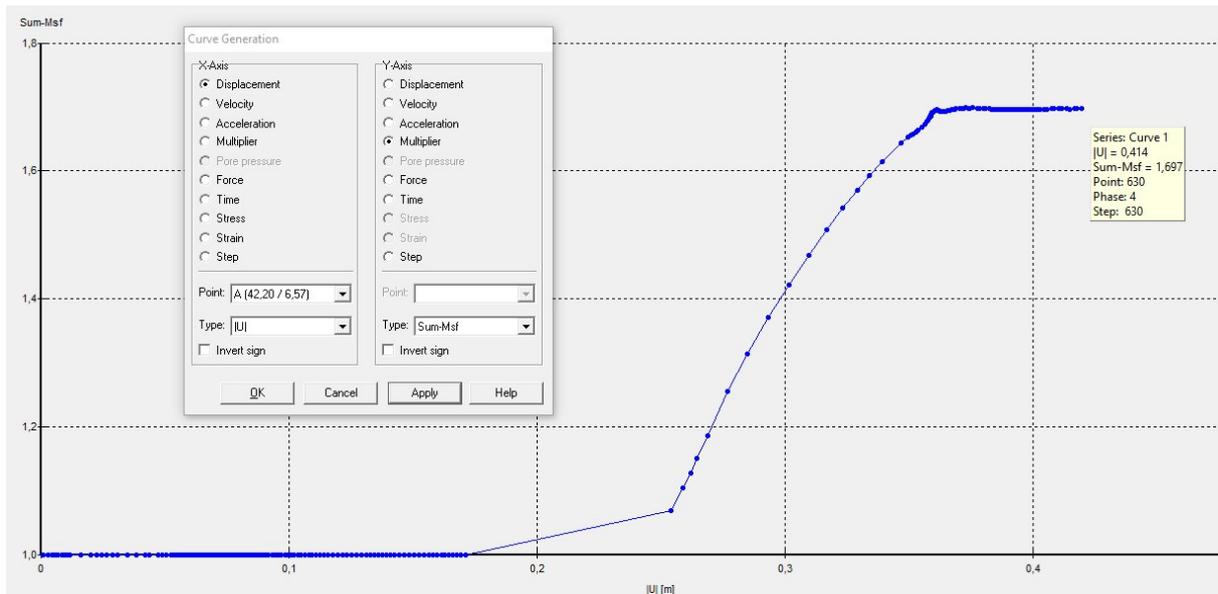


Figure IV.43 : Courbe de facteur de sécurité (F_s)

b- Résultats et constats :

Suite à la charge dynamique exercée à la base du modèle géométrique on a aperçue une réduction de facteur de sécurité en comparaison avec la mise en eau.

-Dans le cas d'une vidange rapide c'est-à-dire la variation de la charge hydraulique de la hauteur $h=43$ m à la hauteur $h=0$ m on essaye de voir le comportement du barrage.

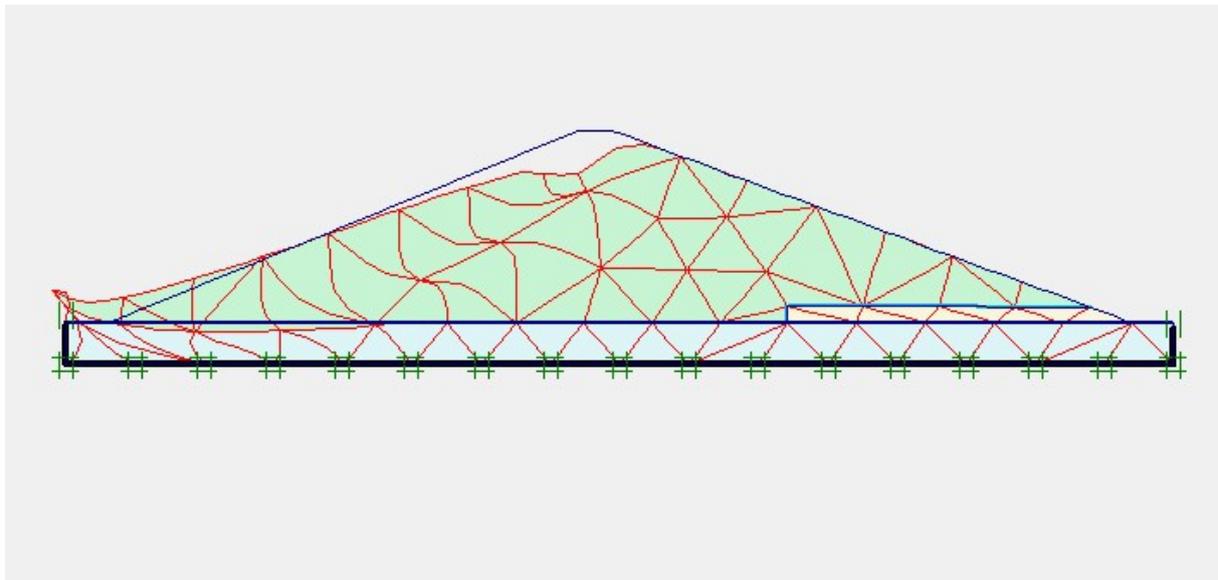


Figure IV.44 : déformation de maillage

-Les résultats des déplacements figurés ci-dessous sur le barrage dans les deux sens vertical et horizontal :

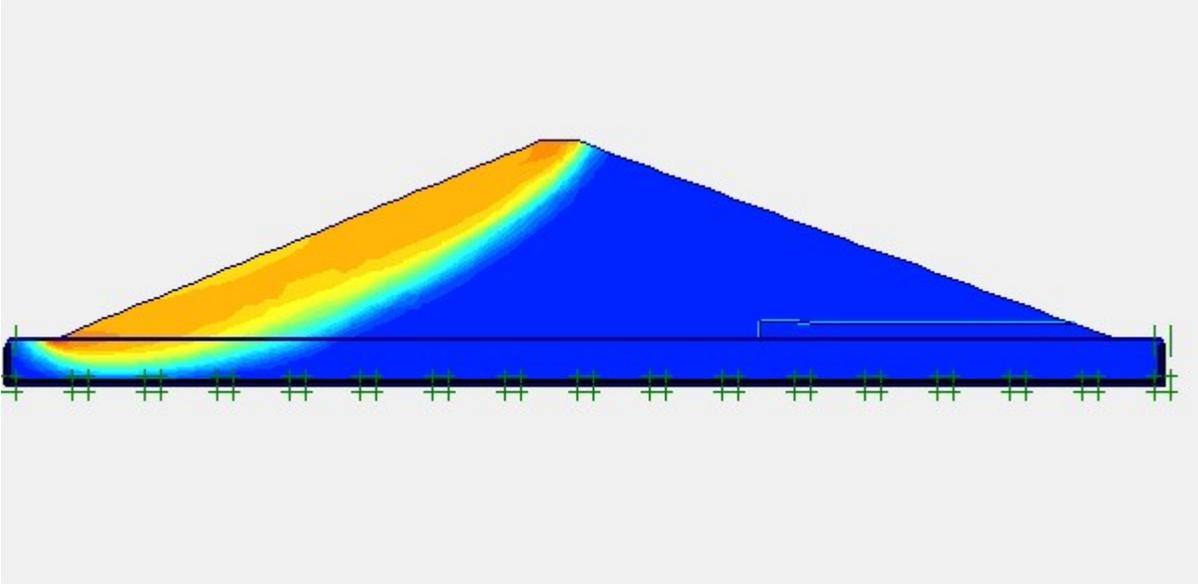


Figure IV.45: Déplacement total

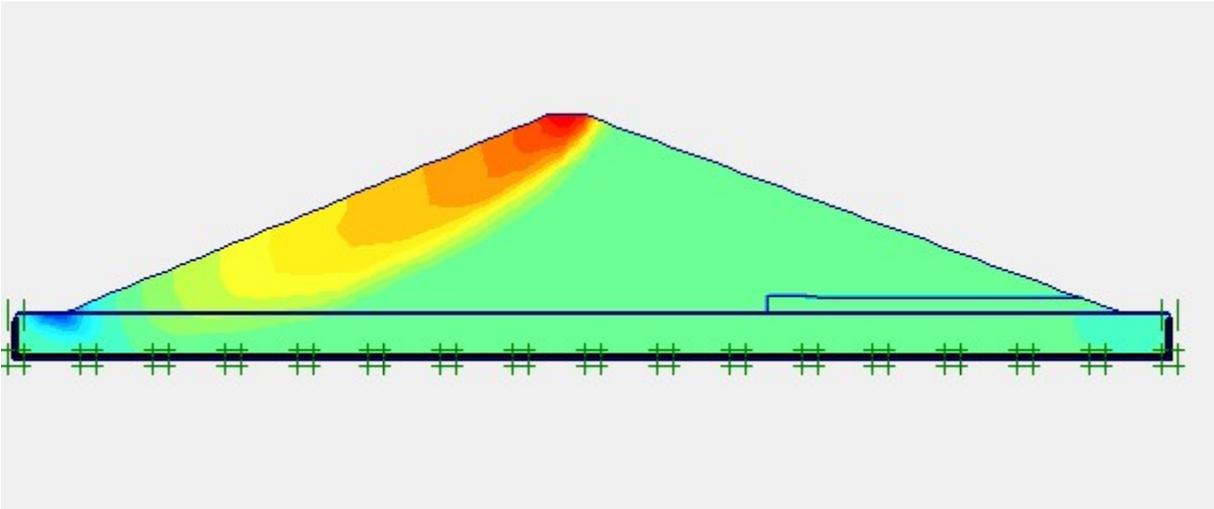


Figure IV.46 : Déplacement vertical

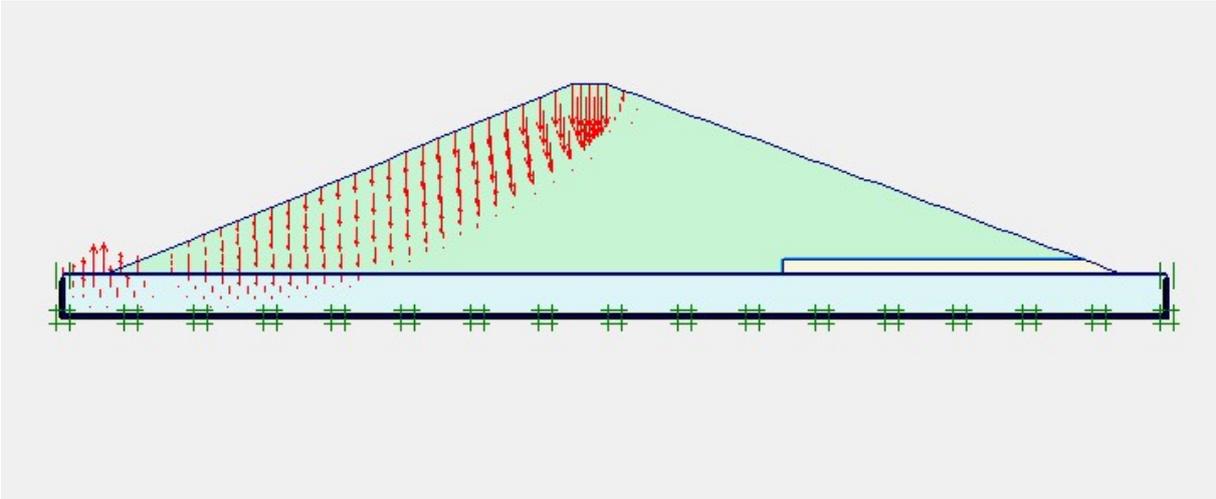


Figure IV.47 : Déplacement vertical (vue en flèche)

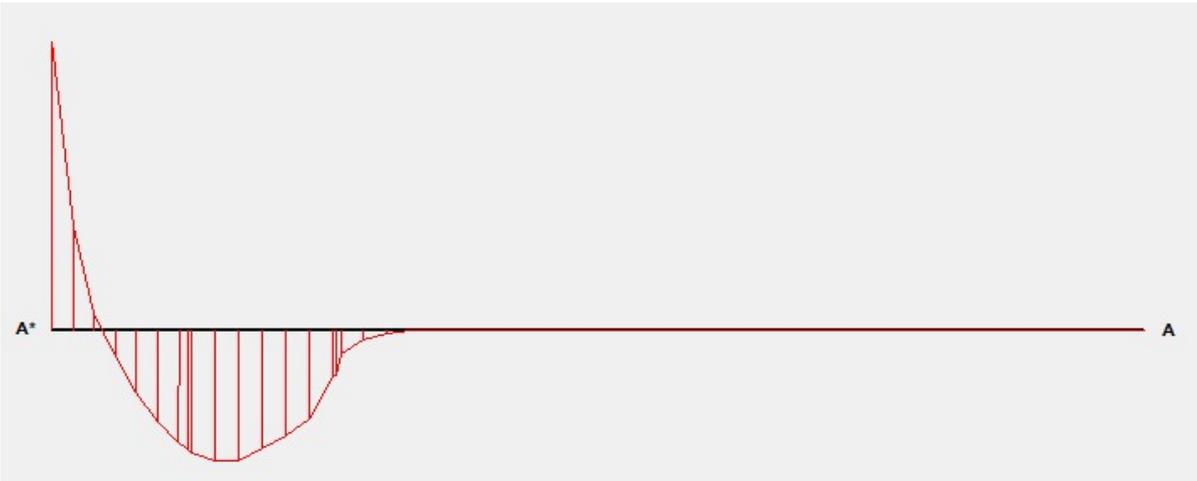


Figure IV.48 : Soulèvement et tassement de sol de fondation de côté amont

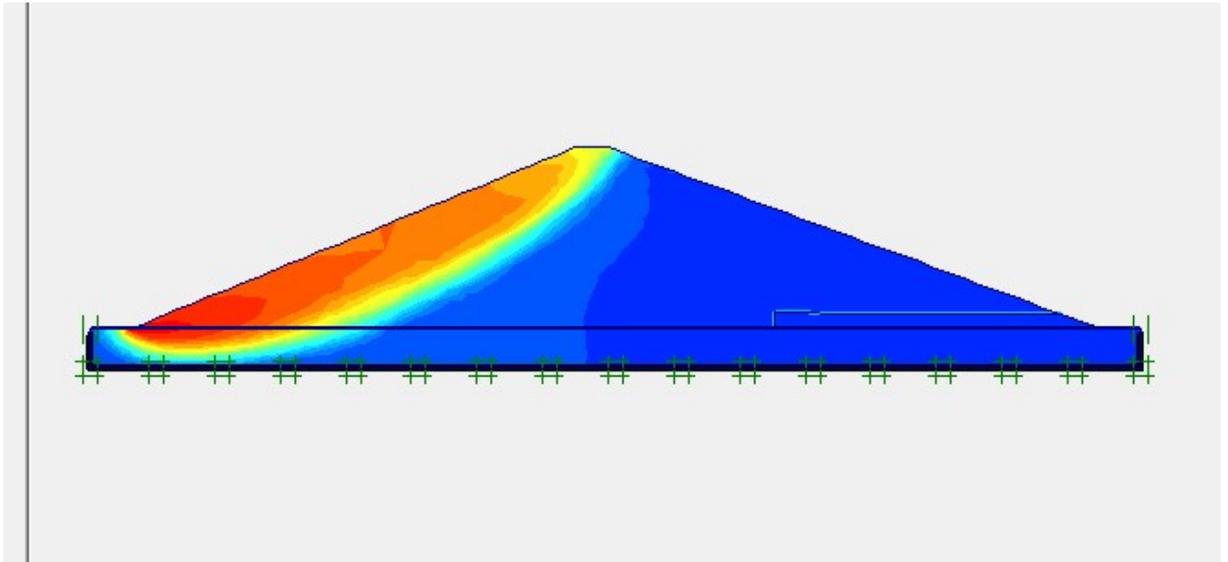


Figure IV.49 : Déplacement horizontal

a- Résultats et constats :

Dans le cas de la vidange rapide on différencie que l'écoulement prenne un sens inverse suite au cas de chargement appliqué de côté aval vers le côté amont et une accumulation considérable des déplacements sur le côté amont d'après les figures IV.44, IV.45, IV.46, IV.47 et la figure IV.48 représenté ci-dessus.

-Les résultats des facteurs de sécurité (F_s) illustrés dans le barrage:

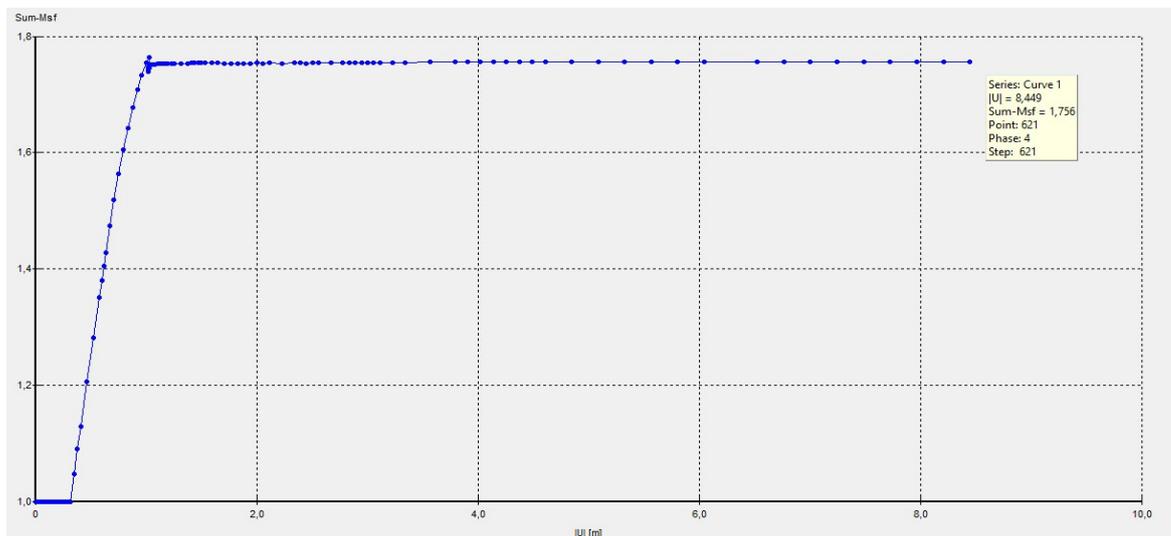


Figure IV.50 : Courbe de facteur de sécurité (F_s)

b- Résultats et constats :

On constate d'après la figure IV.49 de la courbe de facteur de sécurité une légère accroissement est observé après la vidange rapide du barrage de la hauteur $h= 43$ m à la hauteur nulle $h=0$ m par rapport à la charge dynamique.

IV.4.6.2.Résultats obtenus :

Suivant le modèle géométrique adopté et les différents cas de charges appliqués avec le changement de niveau de remplissage de la retenue une fois la charge hydraulique est située au niveau normal (RN) $h = 39$ m et d'autre fois est fixée au niveau des plus hautes des eaux (PHE) $h = 43$ m. Les résultats de calculs sont résumés dans les deux tableaux ci-dessous :

A- Pour la retenue normale (RN) :

Tableau IV.2 : résultats des calculs de modélisation numérique (RN)

Cas de chargement	Déplacement total U en cm	Déplacement horizontal U_x en cm	Déplacement vertical U_y en cm	Facteur de sécurité (Fs)
Mise en eau	27,73	24,6	22, 61	1,97
Charge dynamique	44,39	40,32	34,62	1,63
Vidange rapide	77,32	67,68	52,64	1,72

B-Pour le niveau des plus hautes des eaux (PHE) :

Tableau IV.3 : résultats des calculs de modélisation numérique (PHE)

Cas de chargement	Déplacement total U en cm	Déplacement horizontal U_x en cm	Déplacement vertical U_y en cm	Facteur de sécurité (Fs)
Mise en eau	24. 66	23.7	21.28	2.1
Charge dynamique	33. 08	29.12	27.73	1.69
Vidange rapide	74.558	52.79	63. 20	1.76

IV.4.7. Discussions et interprétations des résultats

D'après les résultats des deux tableaux IV.2 et IV.3, les figures et principalement les courbes qui reflètent le comportement du barrage lors de l'application de différents cas de charge on constate :

1-Facteurs de sécurité :

1-a-Facteur de sécurité dans le cas du chargement de la mise en eau :

Lors de cette étape de mise en eau, le barrage est dans un état plus critique à cause de la fragilité et l'épuisement du corps de barrage, puisque la résistance de cisaillement est faible et réduite dans le premier temps à cause des pressions interstitielles qui sont emmagasinées dans ce dernier, puis elle accroît progressivement avec l'augmentation de niveau de l'eau qui produit une charge hydrostatique composée de deux charge une charge horizontale et l'autre verticale qui agrandisse peu à peu le facteur de sécurité (Fs) qui est relativement proportionnelle avec la charge verticale.

1-b-Facteur de sécurité dans le cas de niveau de remplissage (PHE) et (RN) :

Les valeurs de facteurs de sécurité (Fs) extraient dans le cas de chargement de la mise en eau Pour le niveau des plus hautes des eaux (PHE) $F_s = 2,1$ est supérieure pour le cas de niveau de la retenue normale (RN) $F_s = 1,97$ puisque la poussée hydrostatique est exercé d'une manière perpendiculaire sur le coté amont de barrage qui donne deux composantes, une composante horizontale (F_h) qui agit comme un déstabilisateur (force en mouvement) et une force verticale (F_v) qui influe également comme une force de résistance (force de résistance) et a son tour elle amplifié le facteur de sécurité (Fs) car ce dernier est le rapport de moment résistant au moment stabilisant : $F_s = \frac{M_{résistant}}{M_{stabilisant}}$. Ce qui explique que le facteur de sécurité est proportionnelle avec la force verticale (F_v) qui est égale le poids de volume de l'eau (le volume de niveau les plus hautes des eaux PHE est supérieure au volume de niveau de la retenue normale RN) et la force horizontale est égale à $F_h = \rho gh$ sans s'oublier d'autre paramètre influant comme la cohésion et l'angle de frottement avec :

ρ : le Poids volumique de l'eau 1000 kg/m^3 ;

g : l'accélération de la pesanteur en m/s^2 ;

h : la hauteur de la charge hydraulique en m.

et d'après littérature, lorsque le niveau d'eau dans un barrage augmente, la force de poussée exercée par l'eau sur la base du barrage agrandisse également. Cela explique que plus le niveau de la retenue est élevé, plus la force qui pousse l'eau sur la base du barrage est importante, ce qui maintient à la stabilité du barrage.

1-c-Facteur de sécurité dans le cas du chargement dynamique :

Les résultats enregistrés de facteurs de sécurité (F_s) dans le cas de la charge dynamique sont diminuent Pour les deux niveaux de remplissage le niveau des plus hautes des eaux (PHE) $F_s = 1,67$ et le niveau de la retenue normale (RN) $F_s = 1,63$ en comparaison avec le chargement de la mise en eau ($F_s = 2,1$ en PHE et $F_s = 1,97$ en RN) puisque la charge sismique induit des ondes se propagent dans le sol et la retenue d'eau, ce qui entraîne des mouvements vibratoires de la structure du barrage, induisant des pressions hydrodynamique dues à la compressibilité de la retenue d'eau et une interaction entre cette dernière et le talus du côté amont en produisant des forces et des contraintes supplémentaires contribuent à la déstabilisation du corps de barrage, ce qui entraîne à son tour une réduction de facteur de sécurité dans le cas d'un chargement dynamique.

1-d-Facteur de sécurité dans le cas du chargement de vidange rapide :

La vidange rapide est une situation accidentelle hydrostatique dans le corps de barrage, puisque l'écoulement de l'eau prend un sens inverse, donc le champ de déplacement il s'oriente de côté aval vers le côté amont à cause de la suppression brusque des pressions interstitielles, Cela peut engendrer des forces hydrodynamiques graves sur le côté amont, ces derniers contribuent à la déstabilisation de barrage et à la diminution de facteur de sécurité (F_s par rapport à la mise en eau).

2- Les déplacements :

2-a- déplacements dans le cas du chargement de la mise en eau :

Dans le cas du chargement de la mise en eau le champ de déplacement prend un chemin identique de sens d'écoulement de côté amont vers le côté aval en passant par la crête d'une manière graduelle avec l'élévation de niveau de l'eau et l'accumulation crée une charge supplémentaire sur le sol de fondation et les matériaux du barrage qui induit un déplacement avec une différence observé en excès dont les valeurs de niveau (RN) par rapport aux valeurs de niveau (PHE), et cela dû à l'augmentation de volume d'eau de deuxième niveau (PHE) qui contribue à la stabilité du corps de barrage.

2-b- déplacements dans le cas du chargement dynamique :

Après l'enregistrement des déplacements et des tassements lors de la mise en eau le barrage est considéré stable. Quand la charge dynamique est appliquée, les déplacements s'orientent au côté amont vers le côté aval en passant par la crête du barrage avec une accumulation au niveau de cette dernière, aussi un soulèvement et un tassement au niveau du sol de fondation. Donc lorsqu'un séisme se produit, les changements rapides de mouvement peuvent entraîner une augmentation de la pression sur le côté aval du barrage, en raison de l'effet des ondes sismiques sur l'eau retenue dans le barrage. Cette pression excessive causer un soulèvement et une partie de tassement dans le cote aval. Une réduction dans les valeurs des déplacements est enregistrée dans le niveau (PHE) par rapport au niveau (RN), cela est dû à la quantité d'eau de la retenue en excès dans le niveau (PHE).

2-c- déplacements dans le cas du chargement (vidange rapide) :

Dans le cas de la vidange rapide on distingue que l'écoulement prend un sens inverse produit au cas de chargement appliqué de côté aval vers le côté amont et une accumulation considérable des déplacements sur le côté amont, également dans ce cas du chargement l'eau qui était initialement présente dans le sol est évacuée rapidement, ce qui peut entraîner une diminution de la pression interstitielle dans le sol. La redistribution des contraintes résultant de cette vidange peut provoquer des déformations et des déplacements différentiels du sol du côté amont, où la pression de l'eau diminue rapidement, les contraintes effectives dans le sol augmentent, ce qui produit des déplacements du sol (tassement et soulèvement) dont les valeurs sont modérées et peu variables entre elles pour les deux niveaux (RN) et (PHE).

Conclusion générale

Conclusion générale

Les études de comportement dynamique d'un barrage en terre par la méthode des éléments finis, en exploitant le logiciel PLAXIS 2D et en tenant compte des caractéristiques des matériaux constituant le barrage sont essentielles pour évaluer sa stabilité et sa sécurité lors d'événements sismiques ou de charges dynamiques. Ces études permettent de comprendre comment le barrage réagit aux vibrations, aux ondes de choc et à d'autres forces dynamiques, afin de prendre des mesures appropriées pour minimiser les risques de défaillances. L'étude a permis d'analyser le comportement dynamique du barrage en terre avec un drain horizontal dans différents cas de chargement, notamment la mise en eau, la charge sismique et la vidange rapide. Les résultats obtenus ont fourni des informations précieuses sur les performances du barrage et les exigences de sécurité associées à chaque cas de charge spécifique. Dans le cas de la mise en eau, il a été constaté que la stabilité du barrage dépend fortement de la pression hydrostatique exercée par l'eau. Des efforts doivent être déployés pour assurer une conception adéquate et une étanchéité appropriée afin de prévenir les fuites et de maintenir la stabilité structurelle pendant la montée du niveau d'eau. Des mesures de renforcement, telles que l'utilisation de drains horizontaux, peuvent être nécessaires pour contrôler les surpressions et réduire les risques d'érosion interne. En ce qui concerne la charge sismique, il a été observé que les séismes peuvent induire des forces horizontales importantes qui peuvent compromettre la stabilité du barrage. Une analyse approfondie des forces sismiques, de l'amplification sismique locale et de la réponse dynamique du barrage est essentielle pour évaluer les contraintes induites par le séisme. Des mesures de renforcement appropriées, telles que des contrebutements ou des dispositifs de dissipation d'énergie, peuvent être nécessaires pour maintenir la stabilité du barrage pendant un événement sismique. En ce qui concerne la vidange rapide, il a été constaté que les forces hydrodynamiques résultant de la vidange rapide peuvent entraîner des contraintes supplémentaires sur la structure du barrage. Il est essentiel de mettre en œuvre des procédures de vidange bien conçues pour minimiser les risques d'érosion interne, de perte de stabilité et de glissement du barrage pendant le processus de vidange. Des mesures de renforcement, telles que des dispositifs de dissipation d'énergie, peuvent également être nécessaires pour gérer les forces hydrodynamiques induites.

Perspective : D'après cette étude, je constate qu'il est nécessaire de mener davantage d'études et de recherches pour aborder certains points qui ont émergé lors de l'analyse. Il convient d'approfondir le coefficient d'amortissement à l'avenir et d'étudier son impact sur les barrages.

En analysant les données recueillies et en étudiant les facteurs d'influence, nous pouvons développer une meilleure compréhension de l'impact du coefficient d'amortissement sur le comportement des barrages et leur réponse à différentes conditions. De plus, des études théoriques et des analyses peuvent être réalisées pour explorer les effets potentiels de la variation des valeurs du coefficient d'amortissement sur le comportement des barrages. Des modèles mathématiques et de modélisation numérique peuvent être utilisés pour simuler le comportement des barrages dans différentes conditions et évaluer l'impact des changements du coefficient d'amortissement sur les vibrations et les comportements techniques des barrages.

Référence & Bibliographie

Références bibliographiques :

- [1] Anton J. Schleiss et Henri Pougatsch "Les barrages du projet à la mise en service"
Presses polytechniques et universitaires romandes 2011
- [2] La Suisse de tous les records! L'Illustré 2015 N°31 du 29 juillet 2015, p.46
- [3] INRAE - Barrage multi-voûtes de Pannecière-Grands lacs
- [4] Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR) Comité Français des Grands Barrages
- SAVOIE TECHNOLAC, 73373 LE BOURGET-DU-LAC CEDEX
- [5] laboratoire de construction hydraulique de l'école polytechnique fédérale de Lausanne
- [6] Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR) Comité Français des Grands Barrages
- [7] Foster MA, Fell R. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering
12.05.2001
- [8] Sherard JL, Dunnigan LJ. Critical filters for impervious soils. Journal of Geotechnical
Engineering 1989
- [9] Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB/ICOLD) "Bulletin 95 - Barrages
en remblai - Filtres et drains granulaires" CIGB/ICOLD 1994
- [10] P. Le Delliou "Les barrages: conception et maintenance" Presses Universitaires Lyon 2003
- [11] Société d'énergie de la Baie James "Le complexe hydroélectrique de la Grande Rivière :
réalisation de la première phase" Société d'énergie de la Baie James / Éditions de la Chenelière
1987 ISBN: 2-89310-010-4
- [12] A-J. Schleiss, H. Pougatsch "Les barrages: du projet à la mise en service" 2011
- [13] ¹. 123dok.net/article/définition-profil-général-barrages-hauteur-barrage-hauteur-barrage.
- [14] Anton J. Schleiss et Henri Pougatsch "Les barrages du projet à la mise en service"
Presses polytechniques et universitaires romandes 2011
- [15] Botero-Jaramillo E, Ossa-López A, Flores-Berrones R. Strategies for dam safety risk
management in Mexico. Tecnología y Ciencias del Agua. 2015
- [16] USSCS. Gradation design of sand and gravel filters United States Department of
Agriculture 1994
- [17] Le ministère de l'Agriculture, des Pêches et de l'Aquaculture du Nouveau-Brunswick)

- [18] Castro G. □ Liquefaction of sands. Harvard Soil Mechanics Series 1969
- [19] Comité Français des Grands Barrages "Petits barrages : recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi" Cemagref Editions Gérard Degoutte 2002 (2^e édition)
- [20] Plan de sécurité - Informations techniques du concessionnaire du barrage (Société des Forces Motrices du Châtelot)
- [21] Barton N, Lien R, Lunde J. Engineering classification of rock masses the design of tunnel support 2002
- [22] Geotechnical Engineering for Mine Waste Storage Facilities Geoffrey Blight
- [23] BBC Public Service Broadcaster 2011
- [24] Jose O Earth and Rockfill Dams: Principles for Design and Construction"
- [25] Varlet ,H. (1966). Barrages réservoirs. Barrages en terre et en enrochements. Tome 3. Eyrolles.Paris.
- [26] David Keith Todd, Larry W. Mays "Groundwater Hydrology"
- [27] Geoffrey Blight Geotechnical Engineering for Mine Waste Storage Facilities 2003
- [28] l'article: T.G. Sadowski et S.S. Kozney "The Kozney-Carman Equation and Its Applicability to Permeability Estimation in Porous Media" 1997 Journal of Petroleum Science and Engineering (Volume: 16 Numéros: Issues 3-4)
- [29] ISSMGE's International Journal of Geoengineering Case Histories (IJGCH)
- [30] Robert J. Houghtalen, Wesley W. Martz, Janusz T. Zemajtis "Embankment Dam Engineering: Principles and Practice"
- [31] American Society of Mechanical Engineers (ASME)
- [32] JOSSEAUME .O Digue en terre. BULL.LABO. P. ET CH.P. 199-214, AVRIL 1970
- [33] Kazuyoshi Nishijima et Dan M. Frangopol "Reliability-Based Design in Civil Engineering"
- [34] Les Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur (JNGG) Lyon France 2006

- [35] Lee W. Abramson "Slope Stability and Stabilization Methods" book store
- [36] M. Said Saidi "Seismic Design and Retrofit of Bridges", 2014
- [37] BAGHZIM HASSIBA "ETUDE NUMIRIQUE DE LA CONCEPTION DES BARRAGE" mémoire magister en génie civil
- [38] Michael R("Seismic Design of Building Structures", Lindeburg 2017
- [39] Document technique réglementaire en Algérie rpa
- [40] Yousef Bozorgnia et Vitelmo V. BerteroEarthquake Engineering: From Engineering Seismology to Optimal Seismic Design of Engineering Structures"
- [41] Anil K. Chopra Dynamics of Structures" white house edition 2006
- [42]O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, et J.Z. ZhuThe Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals"
- [43] Pratique éclairée des éléments finis en géotechnique M. Boulon, E. Flavigny
- [44]Règlement technique pour la conception, la construction et l'exploitation des barrages en terre" établi par la Commission internationale des grands barrages (CIGB)
- [45]l'article: H. B. Seed, I. M. Idriss "Evaluation of Liquefaction Potential: State of the Art Report "Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division(Volume: 97,Numéro: SM9Pages: 1249-1273)
- [46]N. M. Newmark Effects of Earthquakes on Dams and Embankments 1965 (Volume: 15Numéro: 2Pages: 139-160)
- [47] GT barrages-seismes_Rapport_octobre 2014
- [48] Braja M.Das et G.V. Raman "Principles of Soil Dynamics" (Principes de dynamique des sols) flammarion édition
- [49]M. B. Darendeli "Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves"2001University of Texas at Austin
- [50]G. Darbre, J. Hammer, et al. Documentation de base pour la vérification des ouvrages d'accumulation aux séismes 2003(Rapports de l'OFEG, série Eaux Version: 1.2)

- [51] International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering "Manual on Soil Mechanics and Foundation Engineering" 2015 CRC Press
- [52] Steven L. Kramer "Geotechnical Earthquake Engineering" Saimon edition
- [53] J. Krahn Dynamic Modeling with QUAKE/W: An Engineering Methodology 2004
- [54] Harry G. Poulos et Eduardo H. Davis Dynamic Soil-Structure Interaction (Interaction dynamique sol-structure)
- [55] Harry G. Poulos et Eduardo H. Davis Dynamic Soil-Structure Interaction (Interaction dynamique sol-structure)
- [56] TIM .S. « manual on small earth dams » 2007 FAO edition
- [57] Raymond A. Serway, John W. Jewett, Jr., Charles A. Vuille "Physics for Scientists and Engineers, Volume 1" Cengage Learning 2014