

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT : HYDRAULIQUE



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES
FILIERE : HYDRAULIQUE
SPECIALITE : OUVRAGE HYDRAULIQUE
et Aménagements

Mémoire présenté pour l'obtention
du diplôme de Maser Académique

Intitulé

Contribution à l'étude numérique de
la stabilité
des barrages en remblai

Par : Geuttaf Houssemeddine
Hamdi Abderrahmane

Dirigé par :
Dr Nebbar Mohamed Lakhdar

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2019/ 2020

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout d'abord ALLAH le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Monsieur **NEBBAR MOHAMED***

***LAKHDAR** docteur à l'université de M'sila, pour avoir d'abord proposé ce thème, pour son suivi continué tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils. A travers ce mémoire, nous adressons nos reconnaissances à tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation depuis la première classe du primaire jusqu'à aujourd'hui.*

Et enfin Nous tenons à remercier également tous nos collègues.

Housseem-Abderrahmane

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout d'abord ALLAH le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Monsieur **NEBBAR MOHAMED LAKHDAR** docteur à l'université de M'sila, pour avoir d'abord proposé ce thème, pour son suivi continué tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils. A travers ce mémoire, nous adressons nos reconnaissances à tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation depuis la première classe du primaire jusqu'à aujourd'hui.*

Et enfin Nous tenons à remercier également tous nos collègues.

Housseem-Abderrahmane

Sommaire

Introduction générale	1
CHAPITER I : GENERALITES SUR LES BARRAGES	
I-1 Définition	3
I-2- Différents types des barrages.....	3
I-2-1 Barrage en béton	3
I-2-2 Barrage en remblai	4
I-2-2-1 Les barrages en remblai	4
I-2-2-1-1 Barrages en enrochements.....	5
I-2-2-1-2 Enrochements en vrac	7
I-2-2-1-3 Enrochements arrimés	8
I-2-2-2 Barrages en terre	8
I-2-2-2 -1 Barrage homogène	9
I-2-2-2 -2 Barrage zoné avec un noyau étanche.....	10
I-2-2-2 -3 Barrage à masque amont	11
I-3 Avantages et inconvénients de divers type de barrage.....	13
I-3-1 Barrage poids.....	13
I-3-2 Barrage à contrefort.....	14
I-3-3 Barrage à voûte multiple.....	15
I-3-4 Barrage à voûte.....	15
I-3-5 Digue en terre /Enrochement à noyau.....	16
I-3-6 Digue à masque amont (béton ou béton bitumineux)	16
I-4 Rupture de barrage	17
I -4-1 Définition	17
I -4-2 Le risque de rupture des barrages.....	17
I -4-3 Les types de rupture.....	19
I -4-4 Les causes de rupture	20
I -4-1-1 Des problèmes techniques.....	20
I -4-1-2 Des causes naturelle	20
I-4-4-3 Des causes humaines :	21
I -5 Les infiltration	21
I -5-1 Defintion et parameter description de l'infiltration.....	21
I -5-2 Le régime d'infiltration $i(t)$	21
I -5-3 L'infiltration cumulative, notée $I(t)$	21
I -5-4 Facteur influncant l'infiltration	22
I -5-5 Détermination de la ligne de situation	23
I -5-6 Détermination des pressions interstitielles.....	30

CHAPITER II : Apercu sue la méthode des elements finis

II - La méthodes des éléments finis (MEF)	34
II-1 Définition.....	34
II-1-2 Le Maillage.....	34
II-1-3 L'objectif de la méthode des éléments finis.....	35
II-1-4 Domaines d'application de la MEF.....	35
II-1-5 Concepts de base.....	35
II-2 Présentation du logiciel Plaxis.....	35
II-2-1 Le logiciel PLAXIS.....	35
II-2-2 Les points forts de Plaxis.....	36
II-2-3 Les sous programmes de PLAXIS.....	36
II-2-3-1 PLAXIS-Input.....	36
II-2-3-2 PLAXIS-calculation.....	36
II-2-3-3. PLAXIS-Output.....	36
II-2-3-4. PLAXIS-Curves.....	36
II-2-3-5 Le code PLAXIS 3D Tunnel.....	36
II.2.4. Les modèles de comportements utilisés dans Plaxis.....	36
II-2-4-1 Comportement élastoplastique.....	37
II.2.4.3. Modèle élastique linéaire.....	38

CHAPITER III : présentation et analyse la stabilité du barrage de soubella

III.1 Introduction.....	42
III.2 Les objective a attendre par ce barrage.....	42
III.3situation du barrage	42
III.4 Présentation du barrage de Soubella.....	43
III.5 Caracteristiques de l'ouvrage.....	45
III.6Géométrie et la stratification de la structure avec des noeuds signifiants.....	45
III.7Caractéristiques des matériaux.....	46
III.8Maillage	46
III.9Phases de calcul.....	47
III.10Résultats et interprétations.....	48
III.11Récapitulation des Coefficients de sécurité.....	54
III.12 Conclusion.....	55
Conclusion général.....	57

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 :Les différents types de barrage en remblai

Figure I.2 : Coupe transversale d'un barrage en enrochement

Figure I.3 :Barrage homogène

Figure I.4 : Barrage zoné avec un noyau étanche

Figure I.5 :Barrage à masque étanche

Figure I.6 :Barrage à masque amont

Figure I.7 :Evolution du nombre des barrages de 1950 à 2000 (Messaid.V B, 2009)

Figure I.8 : Accidents de barrages durant le 20^e siècle (Messaid.B, 2009)

Figure I.9 : Evolution générale du régime d'infiltration et de l'infiltration cumulative au cours du temps

Figure I.10 :Régime d'infiltration en fonction du temps pour différents types de sol

Figure I.11: Ligne de Saturation dans un barrage en terre

Figure I.12: Déterminations de la grandeur Δ

Figure I.13: Etude par analogie électrique

Figure I.14: Point d'intersection de la ligne de Saturation avec le parement aval

Figure I.15: Courbe de Casagrande

Figure I.16: Trace des lignes de courant et des lignes équipotentiels

Figure II.1: représente le maillage du talus

Figure II. 2: Modèle monodimensionnel du comportement élastique parfaitement

Figure II. 3: Représentation du comportement élastique parfaitement plastique.

Figure II.4: Représentation du comportement élastoplastique avec écoulement.

Figure II.5: Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire, (Logiciel Plaxis 8.2).

Figure II.7: Définition du module à 50% de la rupture

Figure II.8: Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb (Logiciel Plaxis 8.2).

Figure III.1: Localisation géographique du barrage de SOUBELLA

Figure III.2: Représentation du modèle Géométrique du barrage

Figure III.3: Représentation de barrage

Figure III.4: Déplacements total ux en fin de construction

Figure III.5: Les déplacements horizontaux

Figure III.6: Les déplacements verticaux

Figure III.7: Distribution des pressions interstitielles

Figure III.8: Ligne de saturation et degré de saturation

Figure III.9: Distribution des pressions interstitielles

Figure III.10: Déplacements horizontaux (fonctionnement normale)

Figure III.11: Déplacements verticaux (fonctionnement normale)

Figure III.12: Déplacements totaux en cas de vidange rapide

Figure III.13: Les déplacements verticaux en cas de vidange rapide du barrage

LISTE DES TABLEUX

Tableau III 1: Caractéristiques de la fondation

Tableau III.2: Caractéristiques des matériaux du barrage

Tableau III.3: Coefficients de sécurité calculé pour les différents cas

Les barrages sont des ouvrages d'art fait le plus souvent artificiellement et disposé en travers d'un cours d'eau. Il permet, d'en arrêter l'écoulement, de créer une retenue ou d'élever le niveau de l'eau en amont. Ainsi, plusieurs objectifs justifient la construction d'un barrage tels que l'irrigation, la lutte contre les inondations, la production d'électricité et le stockage de l'eau. Cependant, l'endommagement d'un barrage en terre peut causer des dommages économiques et aussi des pertes de vies humaines. Outre les inondations, les séismes sont les phénomènes naturels majeurs qui causent de telles catastrophes.

Les barrages exigent toujours une grande fiabilité en matière de sécurité. De nombreux chercheurs se sont particulièrement penchés sur l'étude du comportement des structures en remblai en général, et les barrages en terre en particulier parce que plus des trois-quarts des barrages du monde sont en remblai, dans le but de dégager des méthodes de calcul plus appropriées.

L'étude de la stabilité d'un barrage en terre met en jeu les méthodes générales d'étude de la stabilité des talus parmi les plus utilisées.

L'analyse de la stabilité des pentes est d'une grande importance pour tous travaux d'ingénierie où il en est question. Son importance a pris de l'ampleur lorsque des accidents graves se sont produits à travers le monde pour cause d'instabilité de pentes ou talus. Les problèmes de stabilité de pentes se rencontrent fréquemment dans la construction des barrages.

L'étude de la stabilité des talus est la partie essentielle de la conception des barrages en terre. Différents cas doivent être étudiés en tenant compte de l'état des pressions interstitielles à l'intérieur de la digue. Dans leur construction et leur fonctionnement, les barrages subissent des conditions de chargement très variées et on observe des ruptures totales de barrages à tous les stades.

Les mécaniciens des sols ont mis au point des méthodes de calcul qui permettent d'évaluer la sécurité d'un barrage dans les cas suivants :

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

Le but de ce mémoire est de faire une étude numérique de la stabilité d'un barrage, par la méthode des éléments finis à l'aide du code de calcul PLAXIS.

I.1 Définition :

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

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

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

La géologie (nature des roches sur lesquelles sera édifié le barrage, agrégats extraits sur place) et la topographie (largeur de la vallée), commande le type de barrage utilisé.

Les barrages forment avec le terrain sur lequel ils sont construits un ensemble indissociable : à chaque site, un type de barrage, un dimensionnement adapté tant sur le plan technique qu'économique. C'est pourquoi il n'existe pas de barrage type standard .

De plus, certains sont formés par la juxtaposition de plusieurs structures différentes justifiées par des caractéristiques de sol de fondation particulières et aussi par des choix économiques [4] .

I-2- Différents types des barrages :

I-2-1 barrage en béton :

Un barrage en béton est une structure solide et rigide et réalisée selon l'importance du projet par exemple :

- Un besoin d'évacuateur de crues.
- Production de l'énergie électrique.
- L'existence d'une fondation rocheuse de bonne qualité.

I-2-2 Barrage en remblai :

La plupart de ces barrages ont une structure souple, ils sont construits par des matériaux naturels comme l'argile, les roches, et les pierres, ses parties principales sont :

- Le noyau : on utilise des sols fins pour assurer l'étanchéité du barrage et sa position est variée, verticale, inclinée, centrée...etc.
- Les recharges : on les construisent par des sols différents que le sol du noyau (sols frottant perméables) pour supporter et protéger le noyau.
- Le drain : à partir de son nom, il assure l'écoulement de l'eau dans le sol et diminue la Pression interstitielle pour cela il doit contenir des sols très perméables.
- Les filtres : ce sont des parties peu épaisses, on les place entre les différentes parties contre l'infiltration des eaux et pour éviter le phénomène de renard (l'érosion interne).
- le rip-rap : couche superficielle constituée par des blocs d'encrochements sur les côtés du remblai pour le protéger contre les vagues, la relation entre les dimensions des blocs et l'épaisseur du rip-rap et les vagues sont présentées dans le tableau I.01.

Ce type de barrages est distingué par sa base le plus grand que sa hauteur de 4 à 7 fois, et le coût de la construction est moins cher par rapport aux autres barrages en béton.

Les premiers font l'objet de nombreuses méthodes de calcul basées sur la résistance des matériaux et la théorie de l'élasticité notamment [2].

Les seconds, et surtout les barrages en terre, sont un des principaux champs d'application de la mécanique des sols [2].

I-2-2-1 Les barrages en remblai :

Barrages en remblai se partagent en deux groupes (**Figure I-1**)

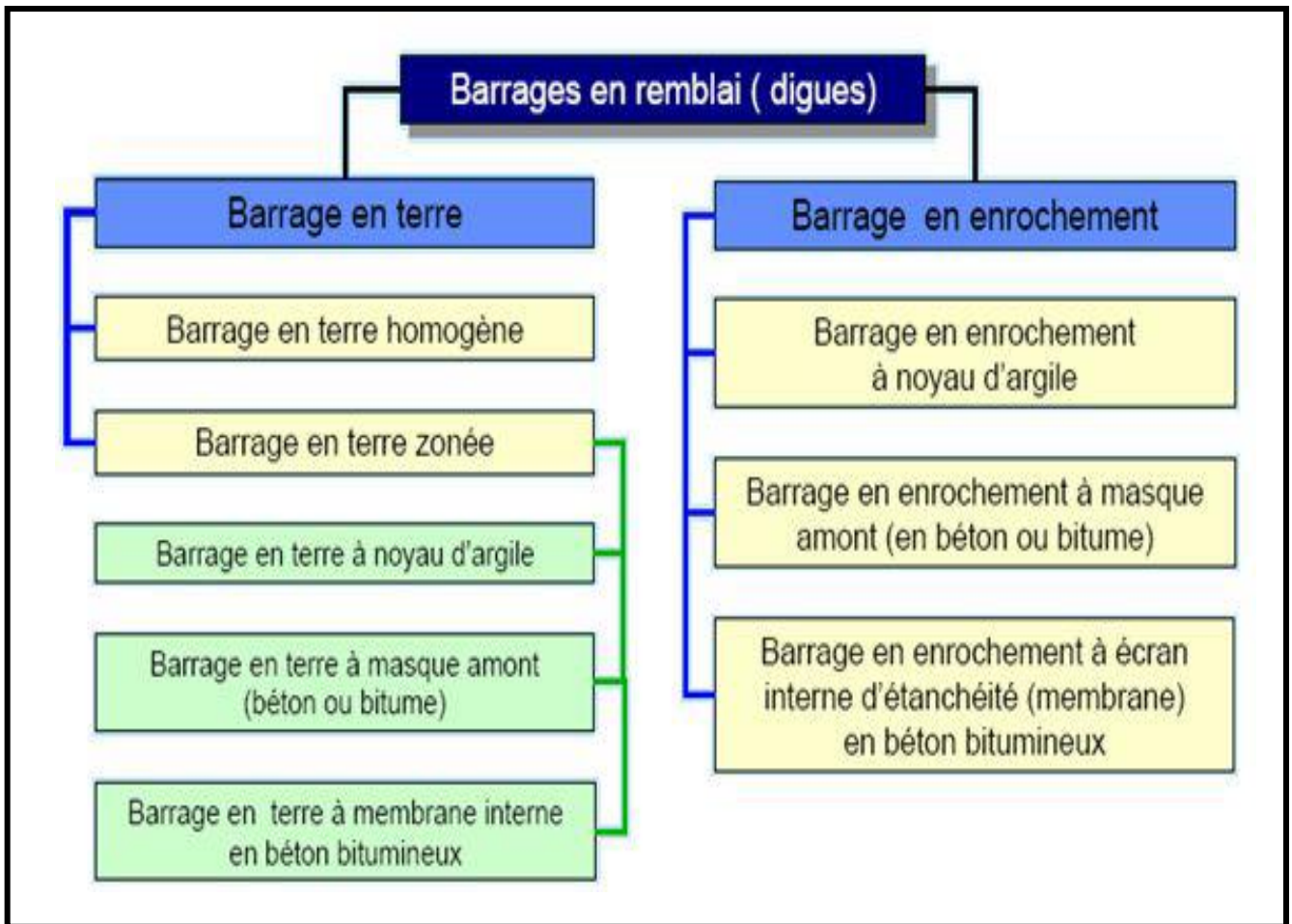


Figure I-1: Les différents types de barrage en remblai

I-2-2-1-1 Barrages en enrochements :

Un barrage en enrochement n'est pas autre chose qu'un tas de cailloux à grande échelle, qui résiste par sa masse aux efforts auxquels il est soumis [5-9].

Mais n'étant pas étanche par lui-même, il faut lui adjoindre un organe d'étanchéité qui constitue la partie la plus délicate, aussi bien au stade du projet qu'à celui de la réalisation.

De même que sur quelques mètres, le parement aval est constitué par des enrochements rangés, mais pour des raisons différentes. C'est que l'intérieur du massif, si des blocs ne sont pas en équilibre stable et que, par suite d'une cause ou d'une autre, cet équilibre est détruit, il se produit un réarrangement des blocs qui se traduit simplement par un certain tassement .

Ceci dit, la mise en place du massif proprement dit d'encrochements peut être effectuée de plusieurs manières [11].

Sur le parement aval, l'équilibre pourrait être rompu de manière à ce qu'un bloc soit éjecté du massif et roule sur le parement aval, ce qui formerait un trou amorce de déséquilibres ultérieurs pour la même raison le pied aval sera constitué d'encrochement rangés.

Pour des raisons de statique et d'hydraulique, le corps d'un barrage en béton ou remblayé doit être relié à un parement vertical d'étanchéité qui s'enfonce profondément dans le sous-sol rocheux. La profondeur de cet élément étanche dépend de la hauteur du barrage, donc de la pression dynamique .

Le parement d'étanchéité peut être réalisé avant ou pendant les travaux de construction du barrage. Dans le dernier cas, le parement est effectué à partir d'une galerie de surveillance située dans le corps du barrage. Si, après stockage des eaux, une fuite apparaît dans le parement, l'eau d'infiltration sera évacuée dans la galerie de surveillance par un drain situé sur le pied du parement .

En outre, cette galerie servira d'entrée pour effectuer plus tard des travaux d'étanchéité et des missions de contrôle [12].

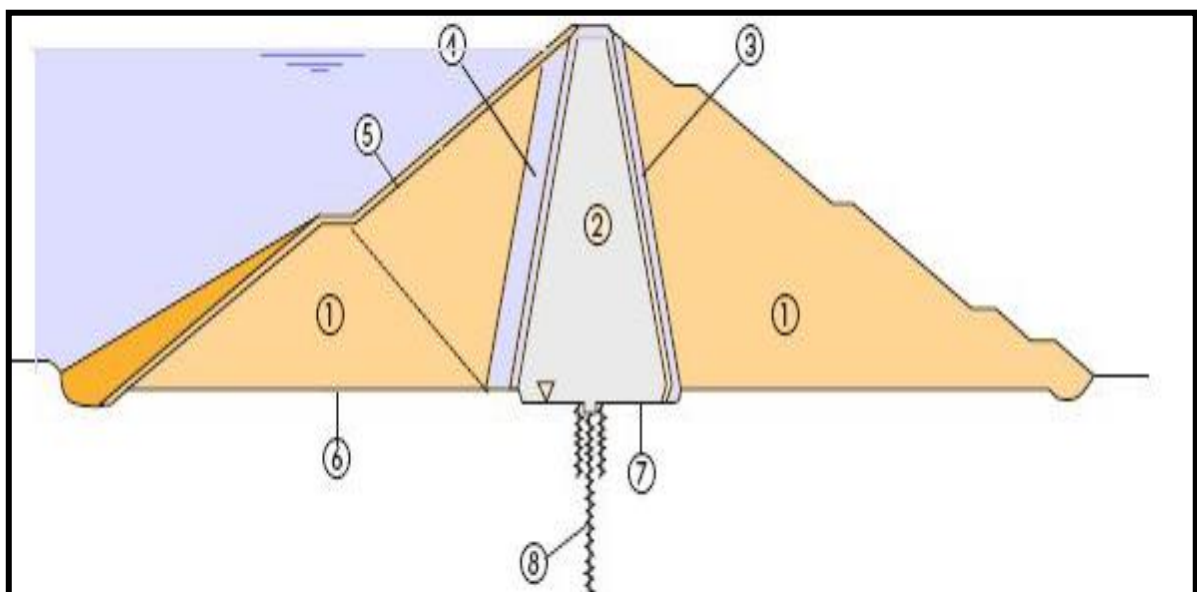


Figure I-2: Coupe transversale d'un barrage en enrochement**Légende :**

- 1) Enrochement, taille maximale 1000 mm
- 2) Noyau étanche en matériau limoneux et argileux
- 3) Filtres-drains en matériau grossier et en matériau fin, de 2,0 m chacun
- 4) Zone de transition, granulométrie maximale du matériau 150 mm
- 5) Ripa-rap
- 6) Fondation en blocaille naturelle
- 7) Fondation sur terrain en place
- 8) Voile d'étanchéité

I-2-2-1-2 Enrochements en vrac :

Ils sont simplement déversés depuis des wagons circulant sur une voie, ou depuis des camions. Pour accélérer le tassement, nous arrosons le remblai ainsi formé avec de l'eau sous pression (7 kg/cm²) ; l'eau enlève les poussières restées collées aux enrochements ou produites par les chocs au moment de la mise en place, la pression produit un certain compactage, et entraîne les plus petits enrochements dans les intervalles des plus gros .

La consommation d'eau est élevée, plusieurs fois le volume d'enrochements, mais cette technique est essentielle pour diminuer les tassements à des valeurs de l'ordre de 1% .

La grosseur des blocs doit être la plus grande possible compte tenu du matériel de transport dont nous disposons, ceci pour une question économique : qui va de quelques centaines de litres à plusieurs mètres cubes [5] .

Il est recommandé de prévoir la construction du massif par étages successifs, d'une dizaine de mètres de hauteur par exemple, pour éviter le déversement des enrochements sur une grande hauteur qui d'une part provoque une certaine ségrégation et d'autre part provoque dans le massif des tassements irréguliers [2-14].

Les chocs des blocs tombant et roulant sur les enrochements déjà en place produisent un certain compactage et sont donc favorables, et constituent comme un essai de qualité pour les blocs : ceux qui se cassent ainsi auraient fini par casser, mais après la mise en service de l'ouvrage, ce qui produit alors des tassements différés plus gênants .

Cependant, de plus en plus, on compacte les enrochements mis en place en couches de 0,5 à 2 ou 3 m au moyen de rouleaux vibrants, lourds (8t), exactement comme s'il s'agissait d'un massif de terre .

Les tassements résiduels, après mise en eau, se comptent alors en dixièmes d'unités pour cent, et la consommation d'eau est bien plus faible (500 litres/m³ d'enrochement, par exemple) [14] .

I-2-2-1-3 Enrochements arrimés :

Nous réalisons ainsi, soit l'ensemble du massif pour réduire les fruits des parements, soit surtout les parements seulement sur quelques mètres d'épaisseur. Si les blocs sont trop lourds, ils sont mis en place à la grue, les intervalles étant bouchés par de petits enrochements mis en place à la main [14].

I-2-2-2 Barrages en terre :

Les barrages en terre peuvent être constitués par des matériaux de caractéristiques divers, à la différence des barrages en béton ou même en enrochement dont les matériaux constitutifs restent contenus dans des fourchettes beaucoup plus étroites .

Tout ingénieur étudiant et projetant un barrage doit adopter la solution la plus économique résolvant le problème posé .

Une solution, et parfois même la seule solution, est la construction de la digue à partir de matériaux se trouvant dans le site du barrage projeté [5].

D'une manière générale si l'on dispose sur place et en quantité suffisante de matériaux terreux permettant d'obtenir après compactage des conditions d'étanchéité et de stabilité satisfaisantes. Ainsi le type de barrage le plus facile à réaliser est le barrage homogène .

Les ouvrages en terre ont atteint de nos jours d'énormes proportions. Le plus imposant d'entre eux est le barrage d' Oroville au U.S.A de 235 m de hauteur qui a nécessité la mise en place de 61 millions de m³ de matériaux. Le plus volumineux ouvrage du monde est le barrage de New Cornella Tailigs au U.S.A qui atteint 209,5 millions de m³ pour 30 m de hauteur [6] .

En France, l'ouvrage de ce type le plus important est celui de Serre Poncon, haut de 129 m sur fondations et d'un volume de 14 millions de m³. En Russie, le barrage de Rogun est le record mondial de hauteur devant le barrage de Nurek, avec une hauteur de 335 m au lieu de 300 m [9] .

I-2-2-2 -1 Barrage homogène :

Le barrage en terre homogène est constitué d'un massif en terre compactée imperméable, muni d'un dispositif de drains dans sa partie aval et d'une protection mécanique contre l'effet du batillage dans sa partie amont (**figure I-3**) [5].

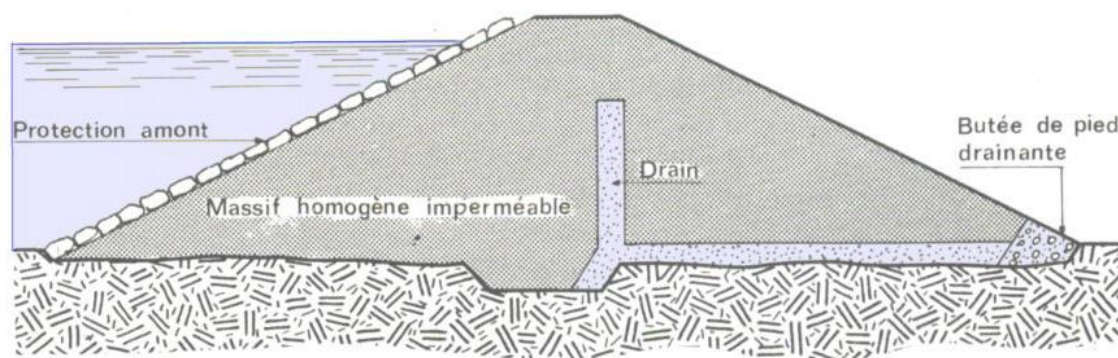


Figure I-3: Barrage homogène

I-2-2-2 -2 Barrage zoné avec un noyau étanche :

Souvent l'hétérogénéité des matériaux disponibles sur place ou leurs caractéristiques géotechniques ne permettent pas d'envisager une digue homogène étanche (**figure I-4**) .

Dans ce cas, une solution couramment adoptée consiste à concevoir un massif en plusieurs zones, dont chacune est constituée d'un matériau différent suivant le rôle que doit jouer chaque zone .

La fonction d'étanchéité est assurée par un noyau étanche réalisé en matériau argileux qui pourra être placé en amont du barrage ou au centre de celui-ci [5].

Les barrages zonés, comme le barrage de Serre-Ponçon (Hautes Alpes h=24 m), sont des barrages en remblai constitués de plusieurs types des matériaux disposées de façon à assurer séparément les fonctions de stabilité du barrage et l'étanchéité .

Le découpage du corps du barrage en matériaux différents est appelé zonage. Il permet de faire de grandes économies dans les volumes mis en oeuvre et d'utiliser au mieux les matériaux disponibles sur le site. Le noyau imperméable est constitué de terres argileuses, d'argile, de terres caillouteuses ou tout autre matériau terreux comportant une forte proportion de matériaux fins lui peut avoir recours à des matériaux de substitution tels qu'une paroi moulée ou bien une superposition de couche de béton bitumineux ou d'asphalte.

Les zones encadrant le noyau imperméable sont en tout venant compacté, elles assurent la résistance et la stabilité du barrage , en particulier pour le talus amont en cas de vidange rapide [9].

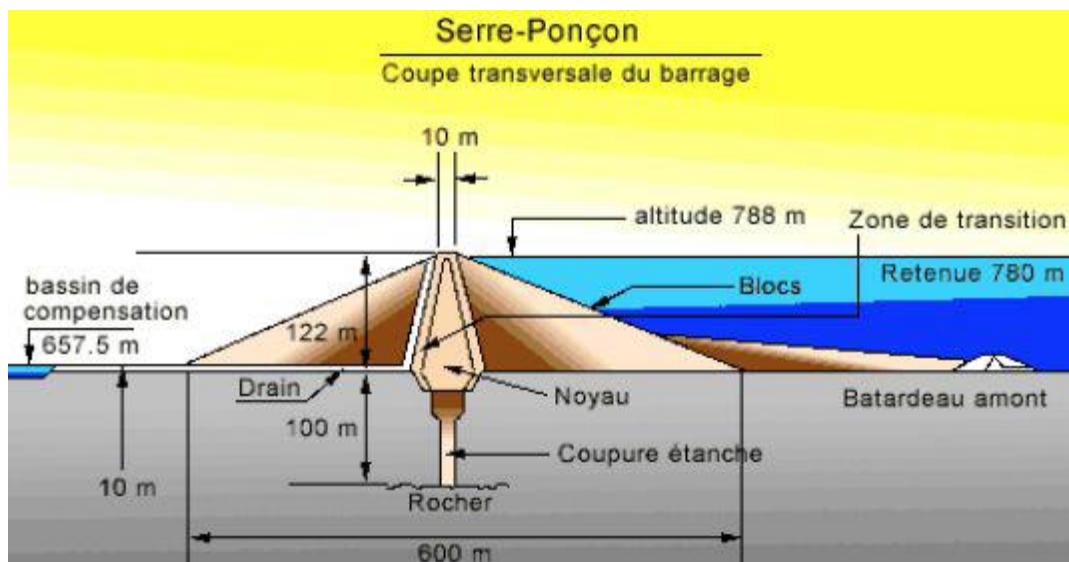


Figure I-4: Barrage zonné avec un noyau étanche

I-2-2-2 -3 Barrage à masque amont :

Les barrages à masque sont constitués d'un remblai plus ou moins perméable assurant la stabilité d'ensemble. Un écran imperméable, appelé masque, est mis en place sur le parement amont de façon à rendre le barrage étanche et lui permettre de retenir l'eau du réservoir (**figure I-5**).

Le masque qui constitue l'organe d'étanchéité amont est classiquement réalisé en béton, avec des produits bitumineux ou encore au moyen d'une géomembrane. Son épaisseur est limitée, ce qui lui permet de s'adapter aux déformations faibles mais inévitables du massif support (les géomembranes peuvent même accepter des déformations importantes). La présence du masque en parement amont présente le double avantage de permettre des réparations en cas de dégradation du masque, mais aussi d'autoriser des vidanges de retenue très rapides.

Le corps du barrage assurant la stabilité peut être en matériau quelconque pour autant qu'il soit peu déformable [9].

De nombreux barrages à masque sont réalisés en enrochements. La qualité du compactage lors de la mise en oeuvre du matériau a une grande influence sur les déformations et tassements ultérieurs .

Pour améliorer la sécurité du barrage, il n'est pas rare de trouver dans les barrages à masque d'autres matériaux fonctionnels [7].

- Un matériau de réglage ou de transition servant de support à l'étanchéité mince et la mettant à l'abri de tout poinçonnement par des éléments grossiers du massif support ;
- Une cheminée drainant, un tapis drainant ou les deux pour évacuer les infiltrations éventuelles à travers le masque ;
- Des matériaux de protection soit du parement aval (terre végétale engazonnée, enrochements, maçonnerie de pierres sèches, soit du masque d'étanchéité comme des dalles de protection ou des pavés auto-bloquants mettant l'étanchéité mince à l'abri des agressions extérieures telles que la glace, les projectiles ou les chutes de blocs.

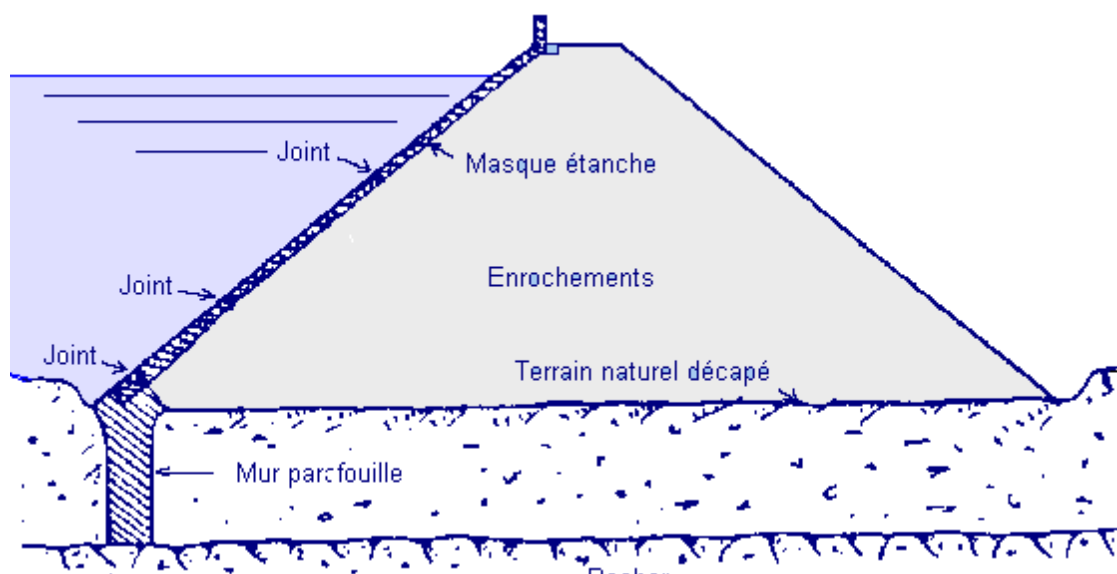


Figure I-5: Barrage à masque étanche

La réalisation d'un noyau étanche peut présenter des difficultés telles que le manque de matériaux convenables et la difficulté de mise en oeuvre .

Nous devons comparer alors cette technique à celle d'une digue homogène à masque amont étanche .

Le masque amont (**Figure I-6**) est une paroi étanche plaquée sur le talus amont du barrage .

Il existe de nombreuses natures de masque étanche telles que le béton de ciment ou le béton bitumineux, les chapes préfabriquées, les membranes souples .

Le masque amont présente l'avantage de pouvoir être exécuté après l'édification du remblai et de pouvoir être réparé aisément [9].

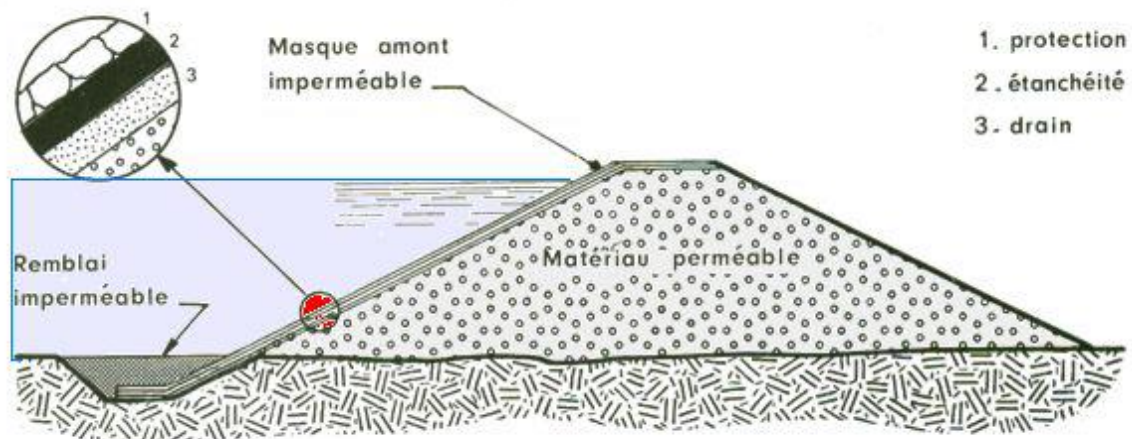


Figure I-6: Barrage à masque amont

I-3 Avantages et inconvénients de divers type de barrage

I-3-1 Barrage poids

Avantages [9-10]

- Faibles contraintes dans le béton .
- Faibles contraintes transmises par la fondation au rocher.
- Les variations de températures ne produisent que de faibles variations de contraintes.
- L'évacuateur de crue peut facilement combiner avec le barrage (diriger les crues directement par dessous).
- Le gradient des sous-pressions à travers la fondation est faible.
- Les points délicats sont : la résistance mécanique et l'étanchéité.

Inconvénients [5-10]

- Les sous-pressions sont importantes dans la fondation.
Moyen risque de tassement.
- Le volume du béton est important (pour le barrage-poids évidé, il est plus faible).
- Le volume d'excavation de la fouille est important.
- Fragilité au séisme (si les joints entre les blocs ne sont pas faits par injections).
- L'échauffement du béton par la prise du ciment est assez problématique.

I-3-2 Barrage à contrefort

Avantages [9-10]

- Les contraintes transmises par la fondation au rocher sont moyennes.
- Les sous-pressions au niveau de la fondation sont faibles.
- Le volume du béton est faible.
- L'échauffement du béton est faible.
- Les risques de tassements sont moyens.

Inconvénients [9-10]

- Très susceptible au séisme. La résistance à l'accélération latérale est presque inexistante.
- La fouille est importante.
- Le gradient des sous-pressions au niveau de la fondation est localement très élevé.
- Les contraintes dues au gradient de température peuvent devenir importantes à la tête du contrefort.

I-3-3 Barrage à voûte multiple

Avantages [5-10]

- Le volume du béton est faible.
- La fouille est assez petite.
- Les sous-pressions au niveau de la fondation sont faibles.
- L'échauffement du béton est très faible pendant la construction.

Inconvénients [9-10]

- Les contraintes sont importantes dans les voûtes. • Grand risque de tassements. Les contraintes de température peuvent être très grandes.
- Très susceptible au séisme.
- La combinaison du barrage avec l'évacuateur de crue est difficile.
- Les sous-pressions dans les fissures du rocher peuvent provoquer des glissements d'appuis.
- La structure est très vulnérable (attentats, guerre).

I-3-4 Barrage à voûte

Avantages [5-10]

- Le volume du béton est faible.

- La fouille est assez petite.
- La résistance au séisme est haute.
- Les sous-pressions au niveau de la fondation sont faibles (la surface de la fondation est petite).

Inconvénients [9]

- Les contraintes sont importantes dans le béton et dans le rocher.
- Les forces sont transmises obliquement dans les appuis.
- Moyen risque de tassements.
- L'échauffement du béton par la prise du ciment est à considérer.
- L'intégration de l'évacuateur de crues (grands débits) dans le barrage est difficile.
- Le gradient des sous-pressions au niveau de la fondation est très grand.
- Les sous-pressions dans les fissures du rocher peuvent provoquer des glissements d'appuis.

I-3-5 Digue en terre /Enrochement à noyau

Avantages [13]

- Le corps du barrage est très flexible et adaptable aux conditions du terrain.
- Peu susceptible aux tassements et aux séismes.
- Petite à moyenne fouille. La digue n'est pas forcément fondé sur un rocher sain.
- La compression du sol est faible.
- Le gradient des sous-pressions au niveau de la fondation ou du noyau est faible.

Inconvénients [5-13]

- Mise en place de grands volumes de matériaux.
- Le remblai du noyau en argile est influencé par les conditions atmosphériques (climat pluie).
- L'inconvénient majeur est les infiltrations à travers le massif.

I-3-6 Digue à masque amont (béton ou béton bitumineux)

Avantages [5-10]

- Le corps du barrage est très flexible et adaptable aux conditions du terrain.
- Les tassements limités sont tolérables.
- Pas très susceptible au séisme. Au dessous du masque, un système de drainage performant est nécessaire à cause de la fissuration.
- Le volume des déblais est moyen.
- Le masque doit être connecté au rocher (directement ou par une parafouille).
- La compression du sol est faible.
- La présence du masque en parement amont présente le double avantage de permettre des réparations en cas de dégradation du masque, aussi d'autoriser des vidanges de retenue très rapides.
- Le masque amont présente l'avantage de pouvoir être exécuté après l'édification du remblai et de pouvoir être réparé aisément.
- Diminué les infiltrations à travers le massif.

Inconvénients [3-4]

- Mise en place de grands volumes de matériaux.
- Le gradient est très élevé près de la connexion entre le masque et le rocher (plinthe).

Le tassement

I-4 Rupture de barrage

I -4-1 Définition :

Les ruptures de barrages sont des événements très rares. Elles peuvent être de différents ordres (problèmes techniques, causes naturelles ou causes humaines) et correspondent à une destruction totale ou partielle de l'ouvrage. Les causes, ainsi que les mécanismes en jeu lors d'une rupture sont variables en fonction des caractéristiques propres au barrage.

I -4-2 Le risque de rupture des barrages

Dans le monde, on compte 45 000 grands barrages dont 80 % ont une hauteur inférieure à 30 m et seulement 1 % ont une hauteur supérieure à 100 m (**Figure I-7**). D'après la

Commission internationale des grands barrages (CIGB), tout ouvrage de plus de 15 m de haut au-dessus de la surface générale des fondations est considéré comme « grand barrage » ainsi que tout ouvrage dont la hauteur serait comprise entre 10 et 15 m et présentant des caractéristiques particulières : grand réservoir, évacuateur de crues important, etc.

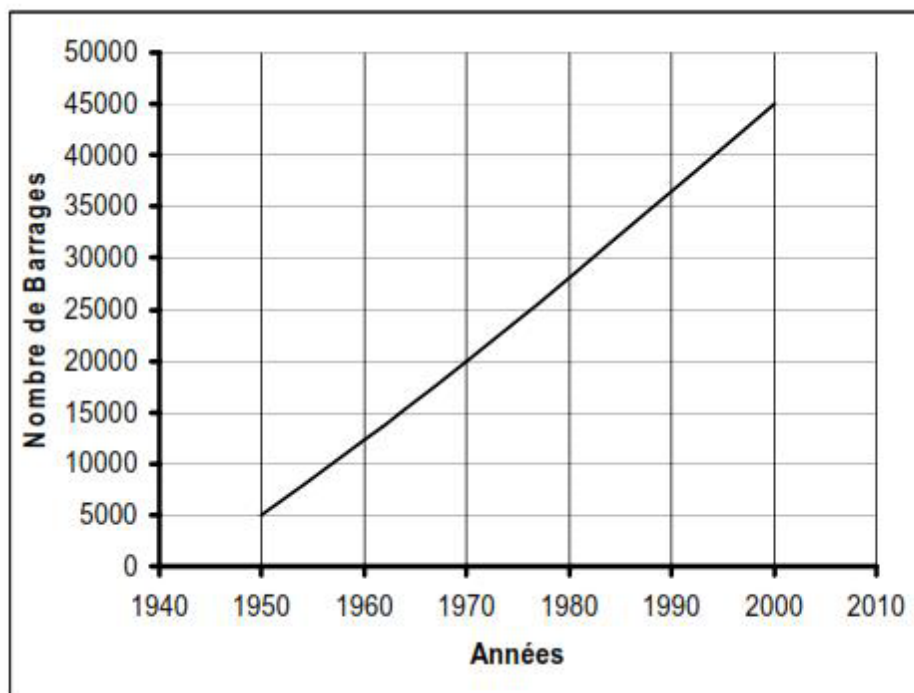


Figure I-7: Evolution du nombre des barrages de 1950 à 2000 (Messaid. B, 2009)

Le risque de rupture de barrage entre dans la catégorie des risques technologiques. Les causes ainsi que les mécanismes mis en jeu lors d'une rupture sont variables et dépendent des caractéristiques propres du barrage (**Figure I-8**). Quelques grandes catastrophes mondiales très connues ont fait plusieurs milliers de morts, mais la plupart des ruptures n'ont pas causé de pertes en vies humaines, soit parce que le barrage dominait des régions non urbanisées, soit parce que l'alerte avait été donnée à temps. Ainsi, la rupture du barrage de Teton (États-Unis), le plus haut barrage rompu (93 m), n'a causé que 11 morts. Cependant, le nombre de personnes qui ont été victimes de ce phénomène est minime lorsque ce chiffre est comparé à ceux d'autres catastrophes plus meurtrières. Cette faible valeur ne doit pas conduire à penser que le risque de rupture de barrage est négligeable car elle est le résultat d'efforts attentifs poursuivis depuis des décennies. Il convient de souligner les limites de l'analyse du risque de rupture de barrage. En effet, cette analyse repose sur deux éléments qui ne sont connus qu'avec une certaine incertitude : le nombre de grands barrages et le nombre de ruptures

observées. La première Incertitude est due à une définition plutôt imprécise du terme « grand barrage ». La seconde incertitude, qui porte sur le nombre de ruptures observées, est due au fait que tous les spécialistes n’abordent pas de la même façon le phénomène de rupture.

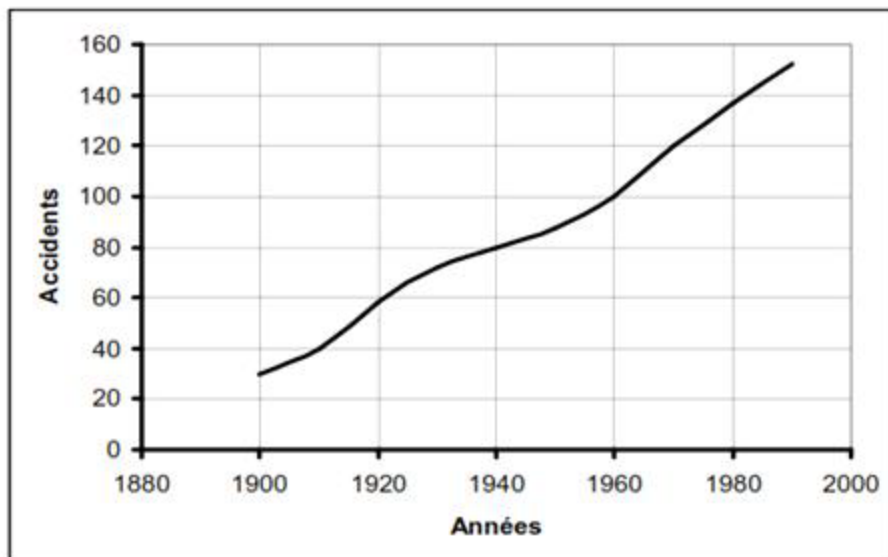


Figure I-8: Accidents de barrages durant le 20^e siècle (Messaid.B, 2009)

I-4-3 Les types de rupture

L’importance de connaître l’impact de l’onde de submersion sur l’environnement du barrage nous a amené à vouloir modéliser l’écoulement d’eau qui est provoqué par la rupture d’un barrage. On peut considérer deux types différents de rupture : la rupture instantanée et la rupture progressive. La rupture instantanée est l’hypothèse la plus pessimiste, (montée de crue extrêmement rapide), alors que la rupture d’un barrage de glissement de terrain est partielle mais permet la libération de la totalité du volume d’eau.

La rupture d’un barrage est rarement instantanée. Que cela soit pour un barrage en béton ou bien en remblai. Il y a généralement la formation d’une brèche dans le barrage, qui s’agrandit progressivement. La libération de l’eau se fait donc de façon graduelle. Ce processus de formation de brèche dans un barrage ou une digue a fait l’objet de plusieurs études pour en étudier la dynamique. Cela reste un processus complexe et en général, on fait l’hypothèse que volume d’eau est lâché instantanément : on parle d’effacement du barrage.

Cette hypothèse va dans le sens de la sécurité, mais peut conduire à majorer le risque hydraulique induit par l’onde de crue, en particulier pour les barrages en remblai (qui sont

majoritaires) ; pour des barrages en remblai, on observe que la largeur l de la brèche est généralement située dans la fourchette $hb \leq l \leq 3hb$, ou hb est la hauteur du barrage. Pour ces barrages, temps, nécessaire à former une brèche varie de façon considérable (de quelques minutes à quelques heures) selon le matériau et la cause de la rupture.

I -4-4 Les causes de rupture :

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

I -4-4-1 Des problèmes techniques

Peuvent entraîner la rupture d'un ouvrage. Il peut s'agir d'un défaut de fonctionnement des vannes permettant l'évacuation des crues ou bien d'un vice de conception, de construction ou de matériaux. Le type de barrage, les matériaux utilisés, la nature des fondations ainsi que l'âge de l'ouvrage vont avoir une influence sur l'apparition de ces problèmes. Cependant, l'évolution des techniques de construction rend les barrages modernes beaucoup plus sûrs.

I-4-4-2 Des causes naturelle :

Peuvent également être à l'origine de rupture de barrage.

Il en est ainsi des crues exceptionnelles, d'intensité supérieure à celle retenue pour le dimensionnement des ouvrages évacuateurs, appelée crue de projet. Le niveau de sécurité retenu est généralement compris entre la crue millénaire et la crue décennale. Les barrages en remblai ne supportent pas la submersion et sont donc plus vulnérables aux débordements. La phase de chantier pour les barrages en construction est une période sensible aux risques de crue, car les ouvrages d'évacuation ne sont pas encore opérationnels.

Les glissements de terrains, soit de l'ouvrage lui-même dans le cas de barrages en remblai, soit des terrains entourant la retenue sont également une cause de rupture.

L'ouvrage peut être déstabilisé par un glissement (barrage de Malpasset, 1959) ou bien submergé par la vague engendrée par un glissement en amont de la retenue (barrage du Vajont, 1963). Enfin les séismes peuvent causer des dommages mineurs à ne pas négliger (déformations, tassements, fissures, etc.). Le risque sismique est systématiquement pris en compte lors de la

conception des ouvrages, même s'il est peu élevé. Les ruptures de barrages dues aux séismes sont d'ailleurs très rares.

I-4-4-3 Des causes humaines :

Peuvent enfin être à l'origine d'accidents : études préalables pas assez approfondies, contrôle d'exécution insuffisant, erreurs d'exploitation, défaut de surveillance et d'entretien ou encore actes de malveillance, sabotage, attentat, guerre (les barrages sont néanmoins protégés par la convention de Genève).

I -5 Les infiltration :

I -5-1 Définition et paramètre description de l'infiltration

L'infiltration désigne le mouvement de l'eau pénétrant dans les couches superficielles du sol et l'écoulement de cette eau dans le sol et le sous-sol, sous l'action de la gravité et des effets de pression.

I -5-2 Le régime d'infiltration $i(t)$:

nommé aussi taux d'infiltration, qui désigne le flux d'eau pénétrant dans le sol en surface. Il est généralement exprimé en mm/h. Le régime d'infiltration dépend avant tout du régime d'alimentation (irrigation, pluie), de l'état d'humidité et des propriétés du sol.

I -5-3 L'infiltration cumulative, notée $I(t)$:

est le volume total d'eau infiltrée pendant une période donnée. Elle est égale à l'intégrale dans le temps du régime d'infiltration (**Figure I-9**).

$$I(t) = \int_{t=t_0}^t i(t) \cdot dt$$

Avec, $I(t)$: infiltration cumulative au temps t [mm], $i(t)$: régime ou taux d'infiltration au temps t [mm/h].

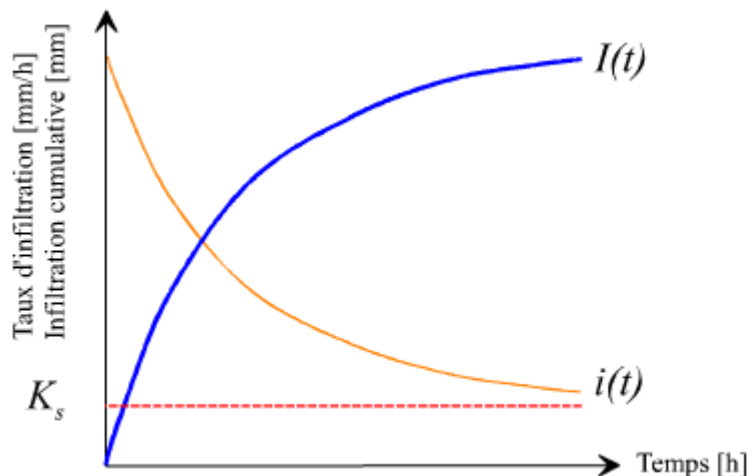


Figure I-9: Evolution générale du régime d'infiltration et de l'infiltration cumulative au cours du temps

Avec : K_s = conductivité hydraulique à saturation

La conductivité hydraulique à saturation K_s est un paramètre essentiel de l'infiltration. Il représente la valeur limite du taux d'infiltration si le sol est saturé et homogène.

I -5-4 Facteur influençant l'infiltration :

L'infiltration est conditionnée par les principaux facteurs ci-dessous :

- **Le type de sol** (structure, texture, porosité) - Les caractéristiques de la matrice du sol influencent les forces de capillarité et d'adsorption dont résultent les forces de succion, qui elles-mêmes, régissent en partie l'infiltration.

- **La compaction de la surface du sol** due à l'impact des gouttes de pluie (battance) ou à d'autres effets (thermiques et anthropiques) - L'utilisation de lourdes machines agricoles dans les champs peut par exemple avoir pour conséquence la dégradation de la structure de la couche de surface du sol et la formation d'une croûte dense et imperméable à une certaine profondeur. La figure 1.5 montre à titre d'exemple les différentes évolutions du régime d'infiltration au cours du temps selon le type de sol.

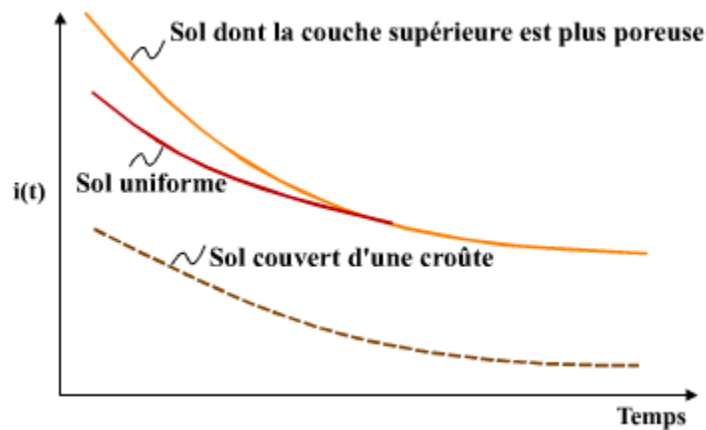


Figure I-10 : Régime d'infiltration en fonction du temps pour différents types de sol

- **La topographie et la morphologie** : Une forte pente favorise les écoulements au dépend de l'infiltration.

- **Le débit d'alimentation** (intensité de la précipitation, débit d'irrigation).

- **La teneur en eau initiale du sol** (conditions antécédentes d'humidité) L'humidité du sol est un facteur essentiel du régime d'infiltration, car les forces de succion sont aussi fonction du taux d'humidité du sol. Le régime d'infiltration au cours du temps évolue différemment selon que le sol est initialement sec ou humide.

Les infiltrations dans les barrages en terre doivent être abordées sous trois angles différents ou on devait aboutir à :

- La détermination de la ligne de saturation ;
- La détermination des pressions interstitielles ;
- Le calcul du débit de fuite ;

I -5-5 Détermination de la ligne de saturation :

On parle d'une ligne de saturation dans une coupe transversale car dans la réalité c'est une surface suivant laquelle la pression est égale à la pression atmosphérique.

La méthode pour tracer de cette ligne a été proposée par Kozeny qui a montré que pour un barrage en terre homogène, la ligne de saturation est assimilable à une parabole dans sa partie médiane. (Figure I-11).

L'équation de la ligne de saturation s'écrit de la manière suivante :

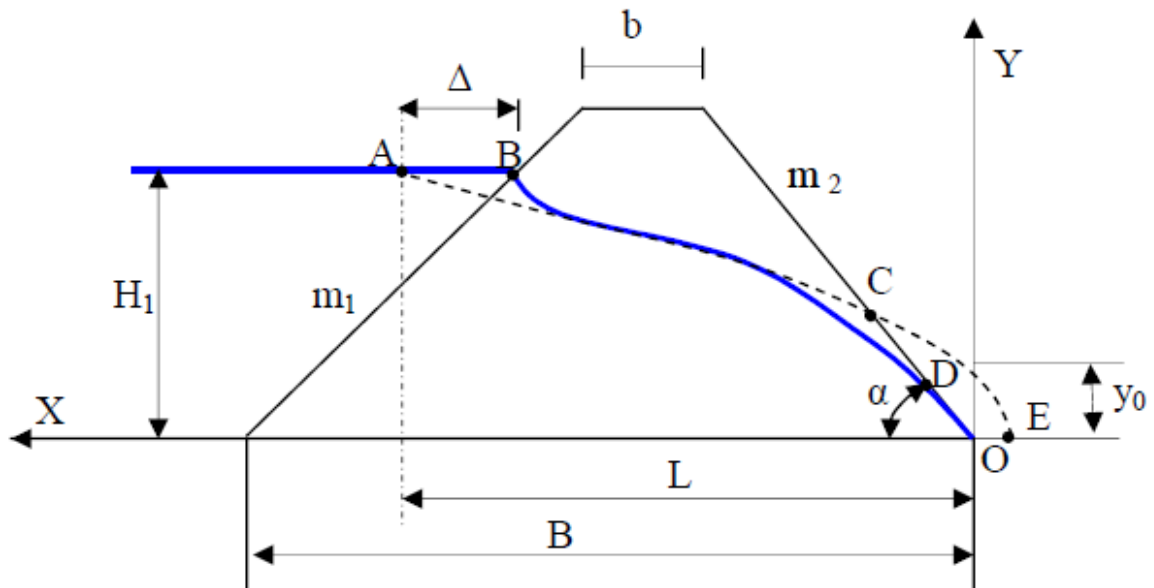


Figure I-11: Ligne de Saturation dans un barrage en terre

$$y^2 - y_0^2 - 2xy_0 = 0$$

Avec :

$$y_0 = \sqrt{H_1^2 + L^2} - L$$

Cette ligne de saturation doit être corrigée au droit du parement amont et aval du barrage.

a) Distance entre les deux points d'intersection du plan d'eau avec la parabole théorique et le talus amont (Δ) :

En traçant la parabole de Kozeny celle-ci coupe le plan d'eau à une distance qui ne coïncide pas avec le passage réel. Elle doit être corrigée par une courbe normale au talus amont et tangente à la parabole théorique à l'aval. Pour calculer la distance séparant les deux points nous disposons de deux méthodes (**Figure I-12**).

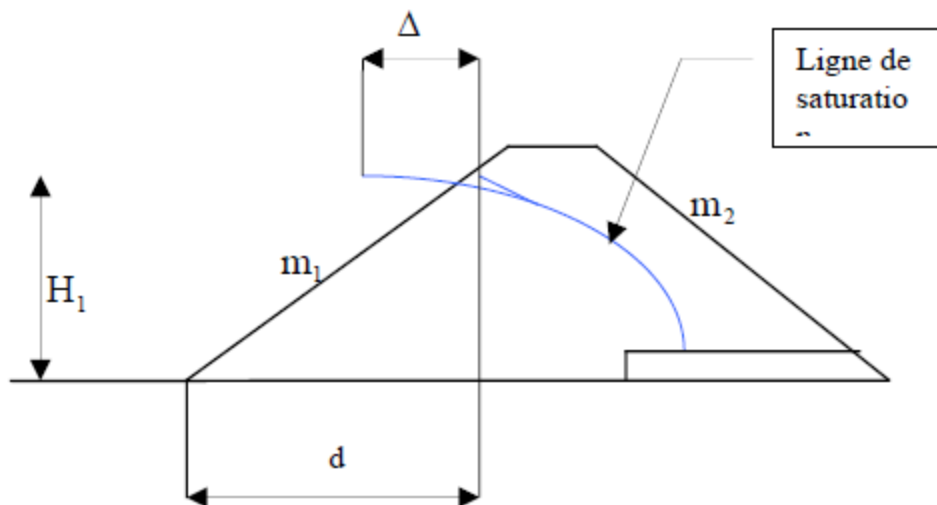


Figure I-12: Déterminations de la grandeur Δ

Méthode de Casagrande.

D'après Casagrande, la parabole théorique coupe le plan d'eau amont en un point situé à une distance horizontale du parement amont égale à 0,3 de la projection horizontale de la partie mouillée du même parement.

L'équation de la ligne de saturation est une parabole théorique partant d'un point situé sur la surface libre de la retenue est à une distance égale à 0,3 de la projection horizontale de la partie mouillée du talus amont.

En pratique le tracé serait corrigé au voisinage de parement amont en considérant ce dernier comme équipotentielle et donc la ligne de saturation doit lui être perpendiculaire et rejoint la parabole théorique en lui étant tangente.

Soit.

$$\Delta = 0,3.d$$

Qui peut s'écrire.

$$\Delta = 0,3.m_1.h_1$$

Avec.

Δ : Distance entre les deux points d'intersection du plan d'eau avec la parabole théorique et le talus amont.

m_1 : Pente du talus amont.

h_1 : Charge à l'amont.

- Méthode du changement du talus amont.

Cette méthode a été proposée par un groupe de professeur de l'ex U.R.S.S., elle consiste à procéder pour les besoins de calcul au changement du talus amont en parement vertical et en gardant la même valeur des pertes de charge lors du passage de l'eau dans les deux cas.

Soit.

$$\Delta = \lambda.h_1 = (m_1/2m_1 + 1) H_1$$

Avec.

Δ : Distance entre les deux points d'intersection du plan d'eau avec la parabole théorique et le talus amont

m_1 : Pente du talus amont.

h_1 : Charge à l'amont.

- **Méthode de l'analogique électro- hydrodynamique :**

Beaucoup de phénomènes hydrauliques sont clarifiés par l'utilisation de l'analogie électrique. D'une façon générale les lois régissant le passage d'un courant électrique dans un conducteur sont analogues aux lois de l'écoulement d'un fluide dans un milieu poreux.

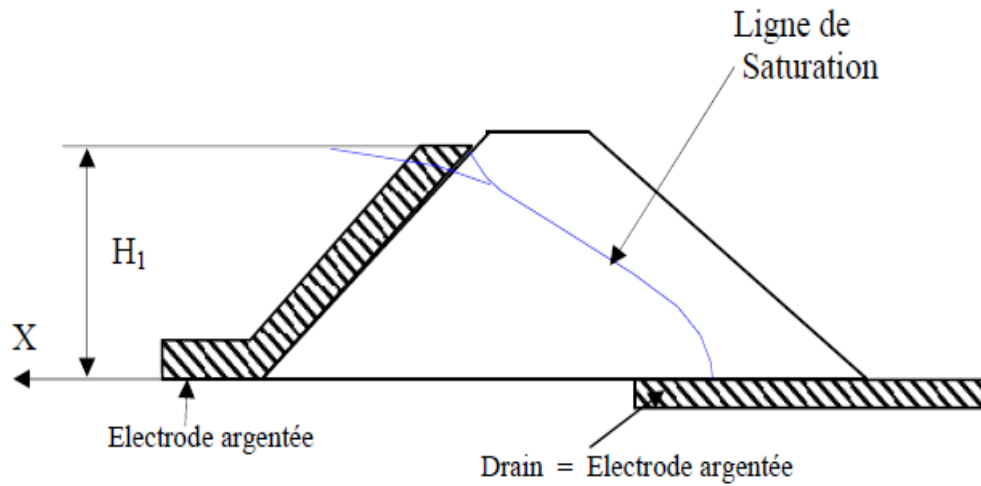
Ainsi entre les grandeurs physiques caractérisant les deux phénomènes électriques et hydraulique on peut trouver les correspondances tel que :

- Tension électrique = charge hydraulique.
- Densité du courant = vitesse de filtration.
- Conductibilité électrique = perméabilité.
- Intensité de courant = débit.

De ce qui précède, les écoulements de filtration sont souvent étudiés par des modèles électriques où le passage des grandeurs électriques aux grandeurs hydrauliques se fait par les règles des similitudes (**Figure I-13**).

La technique la plus ancienne est celle de la cuve rhéoélectrique où le conducteur n'est autre que de l'eau placée dans une cuve à parois isolante et de forme adoptée au problème à résoudre. Cette technique est pratiquement abandonnée au profit de celle du papier conducteur.

Dans cette dernière on utilise un papier spécial appelé « Teledeltos » sur lequel on découpe le modèle correspondant à l'ouvrage et on y place des électrodes qui sont représentées par de la peinture à base d'argent.



3

Figure I-13 : Etude par analogie électrique

b) Détermination du point d'intersection de la ligne de saturation avec le talus aval :

La ligne de saturation coupe le parement aval en un point qui ne coïncide pas avec le point de passage de la parabole théorique de Kozeny. Généralement la ligne de saturation passe à deux tiers de la distance séparant le point de passage de la parabole théorique en partant du pied aval du barrage. (Figure I-14).

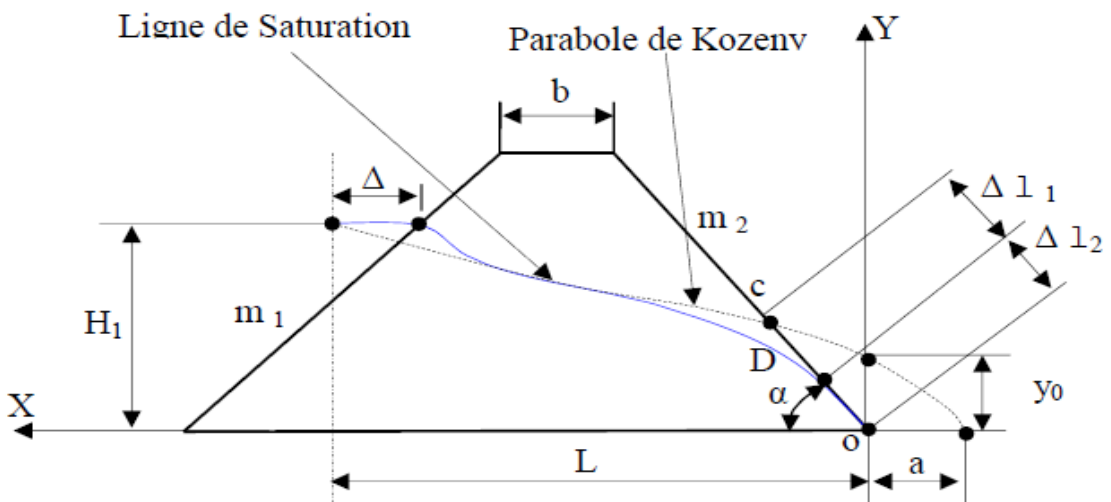


Figure I-14: Point d'intersection de la ligne de Saturation avec le parement aval

En pratique on peut utiliser deux méthodes :

- Méthode 1

Avec les notations de la figure 1.10

$$\Delta l_2 = \frac{2}{3}(\Delta l_1 + \Delta l_2)$$

Et

$$\frac{\Delta l_1}{\Delta l_2} = \frac{3}{8} \cos \frac{\alpha}{2}$$

Méthode 2

Cette méthode est celle de Casagrande où il a démontré que Δl_2 ne dépend que de la distance focale de la parabole de base de Kozeny et de l'angle du talus aval du barrage ce qui lui a permis de dresser une courbe de variation (**Figure I-15**).

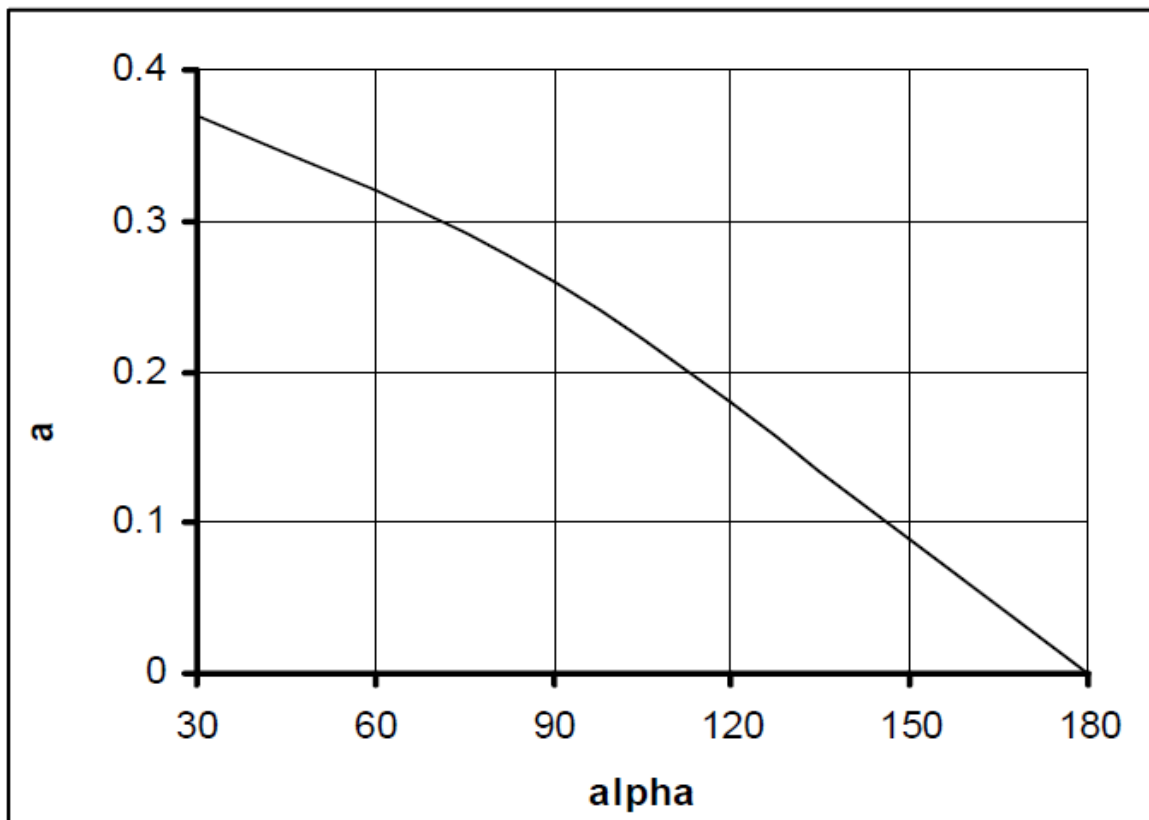


Figure I-15: Courbe de Casagrande

Avec

$$\alpha = \frac{\Delta l_1}{\Delta l_1 + \Delta l_2}$$

Si $\alpha < 30^\circ$

$$\Delta l_2 = \sqrt{H_1^2 + L^2} - \sqrt{L^2 - H_1^2 \cdot \cot^2 \alpha}$$

Si $30^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$

$$\Delta l_2 = y_0 \cdot \frac{\alpha}{1 - \cos \alpha}$$

On signale que pour les barrages dotés de drainage, la ligne de saturation est rabattue pour passer dans le drain.

I -5-6 DÉTERMINATION DES PRESSIONS INTERSTITIELLES.

Dans un sol homogène et isotrope soumis à un écoulement d'eau permanent et sans variation de volume du sol (l'arrangement du squelette du solide ne se modifie pas), les deux équations qui régissent l'écoulement sont :

- **La condition de continuité de la phase liquide.**

$$\text{div } \vec{v} = 0$$

- **La loi de Darcy.**

$$\vec{V} = -k \overrightarrow{\text{grad}}.h .h$$

De ces deux équations nous pourrions avoir le système suivant :

$$\begin{cases} \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \\ v_x = -k \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \\ v_z = -k \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \end{cases}$$

La condition de continuité s'écrit alors :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \Delta h = 0$$

En général l'écoulement a lieu entre des limites où sont imposées des conditions d'écoulement ou de charge hydraulique. Habituellement on a à définir une fonction qui satisfait à l'équation de Laplace avec ses conditions aux limites.

En pratiques, comme les écoulements dans les barrages en terre, la résolution de l'équation de Laplace consiste à rechercher (**Figure I-16**) :

- les lignes équipotentielles.
- les lignes de courant.

En général l'équation de Laplace n'est pas intégrable et on a recours aux méthodes suivantes pour la détermination des réseaux d'écoulement :

- recherche de solution analytique à partir du potentiel complexe dans les cas géométriquement simples
- méthodes numériques.
- méthodes analogiques
- manuellement par approximations successives.

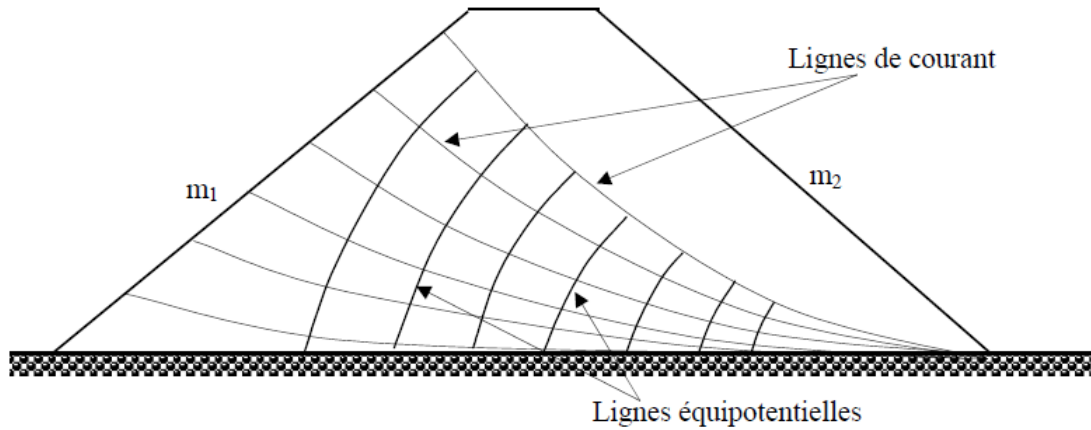


Figure I-16: Trace des lignes de courant et des lignes équipotentiellles

Dans la construction des barrages en terre, les réseaux d'écoulement nous permettent de résoudre deux problèmes essentiels :

- Le calcul du débit d'infiltration.
- Le calcul de la pression interstitielle.

Les lignes de courants et les lignes équipotentiellles forment un réseau orthogonal où deux lignes de courants forment un tube de courant dans lequel le débit reste constant. Le calcul du débit est fait pour chaque tube de courant et la somme des débits donnent le débit total circulant à l'intérieur de ces limites géométriques.

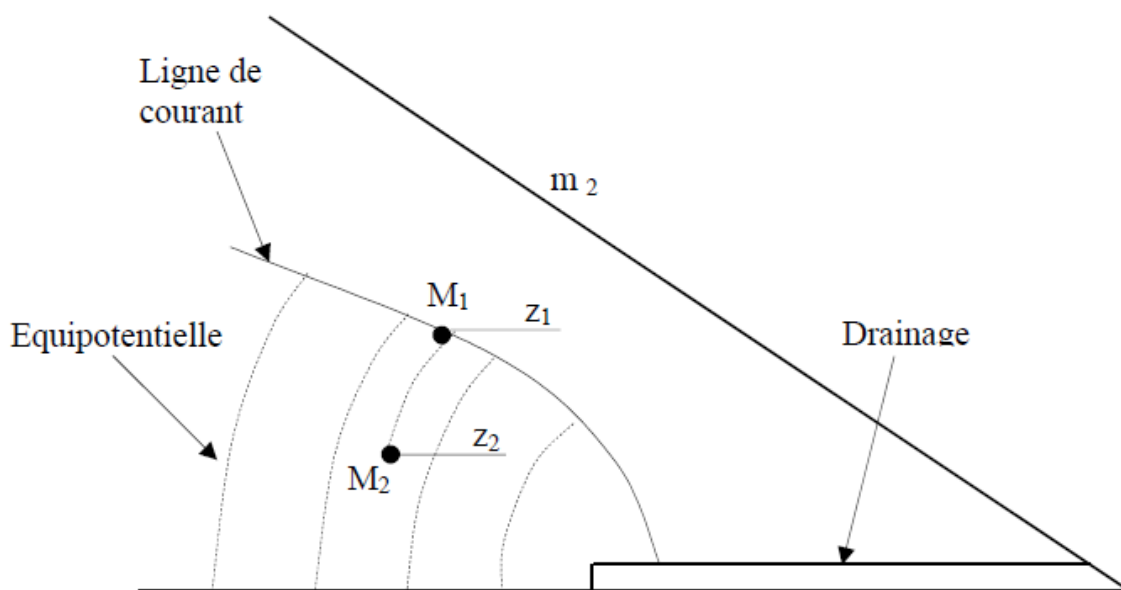


Figure 1.12 : Détermination de la pression interstitielle

La détermination de la pression interstitielle se fait d'après la figure ci-dessus suivant l'expression suivante :

$$U_{M_2} = (z_1 - z_2) \cdot \gamma_w$$

En conclusion, on note que l'infiltration des eaux à travers le corps du barrage ou sa fondation, est un phénomène qui est dû au gradient hydraulique et au coefficient de perméabilité. L'écoulement gravitaire de ces filets d'eaux entraînant avec lui les particules fines du sol. Ainsi, sous l'effet de pression elle forme un petit tunnel qui est dévastateur pour l'ouvrage et un danger pour sa stabilité.

La perméabilité dans un barrage en terre existe toujours, même si les pertes d'eau par infiltration sont faibles et pour déterminer ces infiltrations, il est impératif d'évaluer la ligne de saturation et le débit de fuite de l'eau par infiltration.

II -1 La méthodes des éléments finis (MEF)

II -1-1 Définition : La méthode des éléments finis est une méthode de calcul approchée qui consiste à transformer les équations différentielles de la mécanique des milieux continus en un système linéaire fini d'équations algébriques, que l'on résout par des techniques numériques traditionnelles. Pour ce faire, le milieu réel est remplacé par un milieu équivalent contenu dans un contour polygonal, le plus proche possible du contour réel. Ce milieu équivalent est ensuite divisé en sous-domaines réguliers, appelés éléments finis (triangles et quadrilatères Pour un problème plan ; hexaèdres et pentaèdres pour un problème tridimensionnel). Le champ de déplacement à l'intérieur et sur le contour de chaque élément fini est déterminé par une interpolation polynomiale entre des valeurs du champ en certains points de l'élément, Appelés nœuds. L'ensemble forme par les éléments finis est appelée maillage. [15]

II-1-2 Le Maillage :

Le solide est décomposé en éléments de forme géométrique simple ayant des côtés communs et dont les sommets ou nœuds sont les points d'articulation de plusieurs éléments entre eux. Ces nœuds seront les points d'application des forces intérieures ou extérieures. [16]

L'opération de décomposition est le maillage. Un bon maillage doit faciliter les opérations prévues par un programme d'ordinateur. Il faut donc adopter une méthode systématique de numérotation des éléments et des nœuds. [16]

Il existe de nombreux programmes d'ordinateur qui assurent l'exécution du maillage. Un point essentiel est la numérotation des éléments et des nœuds qui doivent s'intégrer à la logique du programme de calcul. Vient ensuite le choix du type d'élément.

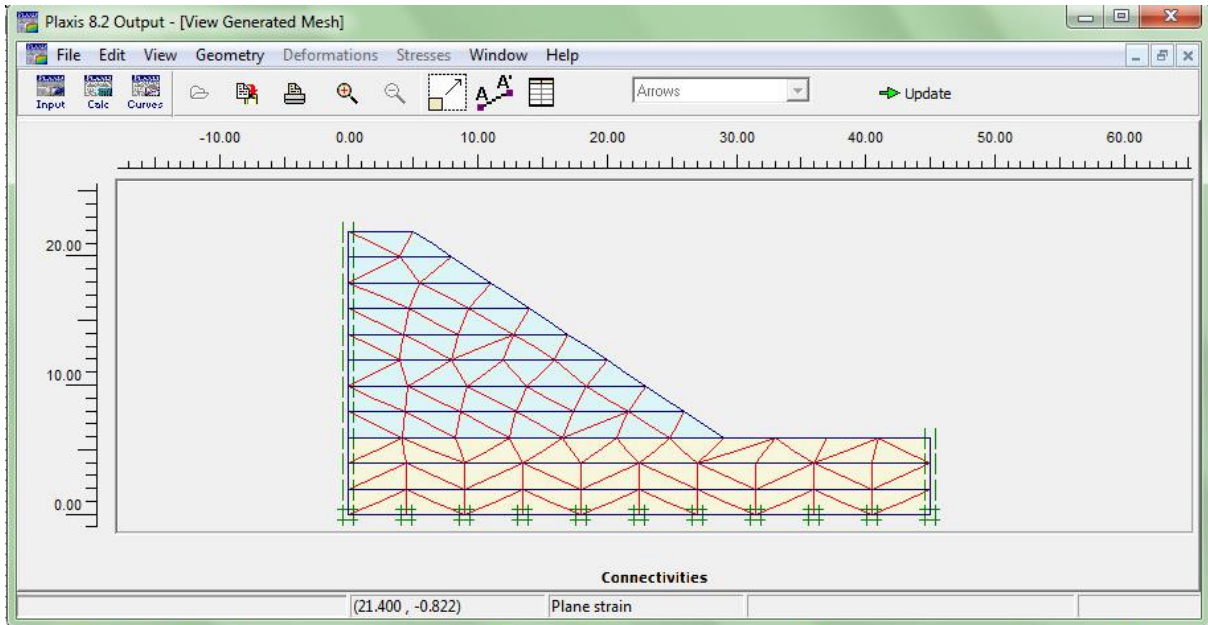


Figure II-1 : représente le maillage du talus.

II-1-3 L'objectif de la méthode des éléments finis

- Apprendre la méthode des éléments finis (MEF) ;
- Maîtriser les concepts de base de la modélisation numérique ;
- Être capable de résoudre des problèmes mécaniques et physiques.

II-1-4 Domaines d'application de la MEF

- Analyse linéaire (statique et dynamique) ;
 - Analyse non linéaire (grands déplacements, grandes déformations, contact et Frottement, flambage, ...) ;
 - Mise en forme des matériaux thermique (en régime permanent et transitoire,..) ;
- Mécanique des fluides ;
- Électromagnétisme ;
- Dynamique rapide (choc, impact, crash) ;
- Optimisation des structures.

II-1-5 Concepts de base

La MEF consiste à remplacer la structure physique à étudier par un nombre finis d'éléments ou de composants discrets qui représentent un maillage. Ces éléments sont liés entre eux par un nombre de points appelés nœuds. On considère d'abord le comportement de chaque partie indépendante, puis on assemble ces parties de telle sorte qu'on assure l'équilibre des forces et la compatibilité du déplacement réel de la structure en tant qu'objet Continu. [17]

La MEF est extrêmement puissante puisqu'elle permet d'étudier correctement des structures continues ayant des propriétés géométriques et des conditions de charges compliquées.

Elle nécessite un grand nombre de calculs qui, cause de leur nature répétitive, s'adaptent parfaitement à la programmation numérique. [17]

II-2 Présentation du logiciel Plaxis**II-2-1 Le logiciel PLAXIS**

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

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

II-2-2 Les points forts de Plaxis

- La convivialité de l'interface pour la saisie des données et pour l'interprétation des résultats
- Générateur automatique de maillage

- Jeu complet de lois de comportement de sol et la possibilité de définir ses propres lois de comportement
- Couplage avec les calculs d'écoulement et de consolidation
- Prise en compte des éléments de structure et de l'interaction sol-structure
- Calculs de coefficient de sécurité

II-2-3 Les sous programmes de PLAXIS

L'interface du programme PLAXIS contient :

II-2-3-1 PLAXIS-Input : ou pré-procession, ce sous-programme contient des options Nécessaires a la création et a la modification d'un modèle géométrique, a la génération du Maillage des éléments finis et à la définition des conditions initiales.

II-2-3-2 PLAXIS-calculassions : ou la procession programme contient les facilités Utiles à la définition des phases et la procédure de calcul de l'élément finis.

II-2-3-3. PLAXIS-Output : programme post-procession pour la visualisation des Résultats de la phase de calcul(les déplacements, les contraintes).

II-2-3-4. PLAXIS-Cures : permet de présenter les résultats sous forme des courbes, Par exemple : des courbes de déplacements.

II-2-3-5 Le code PLAXIS 3D Tunnel

PLAXIS 3D Tunnel est un logiciel géotechnique aux éléments finis spécialement destines a l'analyse en trois dimensions des déformations et de la stabilité des projets de Tunnel, galerie,...etc. D'ou les applications géotechnique nécessitent des lois de Comportement complexe pour la simulation du comportement des sols et des roches, qui non Linéaire, anisotrope et dépend du temps [20].

De même, il est nécessaire de prendre en compte les pressions interstitielles, qu'elles soient hydrostatique ou non.

Le logiciel est doté de fonctionnalité qui permet la modélisation de la structure et

Traiter tout les interactions entre l'ouvrage et le sol (prévoir le comportement de l'ouvrage .un résumé des fonctions essentielles. [17]

II.2.4. Les modèles de comportements utilisés dans Plais

Plusieurs lois de comportement ont été utilisées dans les logiciels de calcul en géotechnique en se basant sur les méthodes des éléments finis. Les lois de comportement expriment une relation entre le tenseur de contraintes, le tenseur de déformations et leurs accroissements respectifs pouvant impliquer un critère de rupture ou de limite d'élasticité. Le choix d'un modèle dépend du comportement du matériau à étudier et du type d'analyse que l'ingénieur géotechnicien souhaite effectuer.

L'utilisation de lois de comportement complexes dans des modèles éléments finis pour l'ingénierie est délicate. Elle demande pour la détermination des paramètres des études spécifiques lourdes sortant du cadre des projets d'ingénierie. L'intégration de telles lois dans des codes éléments finis est difficile. Le coût de ces calculs est généralement important et peu de codes sont actuellement opérationnels. La démarche suivie dans le développement de Plais est de fournir a l'utilisateur un code éléments finis qui soit a la fois robuste et convivial, permettant de traiter des problèmes géotechniques réels, dans un délai raisonnable en utilisant un modèle de comportement de sols dont les paramètres puissent être déterminés a partir d'une étude géotechnique normale.

Différents modèles de comportement, plus ou moins sophistiqués, ont été implémentés dans Plais : élastique linéaire, Mohr-Coulomb, modèles de sol avec écrouissage ou spécifiques aux sols mous, etc. Il reste toutefois a l'ingénieur de choisir le modèle le mieux adapte au problème qu'il désire traiter en fonction des conditions rencontrées in situ.

II-2-4-1 Comportement élastoplastique

Le comportement élastoplastique (cas élastique parfaitement plastique) peut être représenté par un modèle monodimensionnel, en série un ressort de raideur K , pour symboliser l'élasticité du matériau, a un patin de seuil SO (figure II- 2).

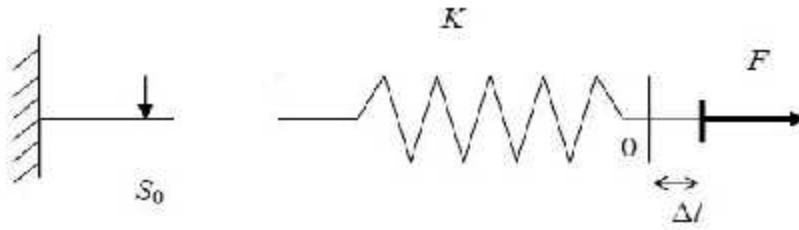


Figure II- 2-Modèle monodimensionnel du comportement élastique parfaitement

Le courbe effort déplacement ou contrainte déformation que l'on trouve est présentée sur la figure II- 3.

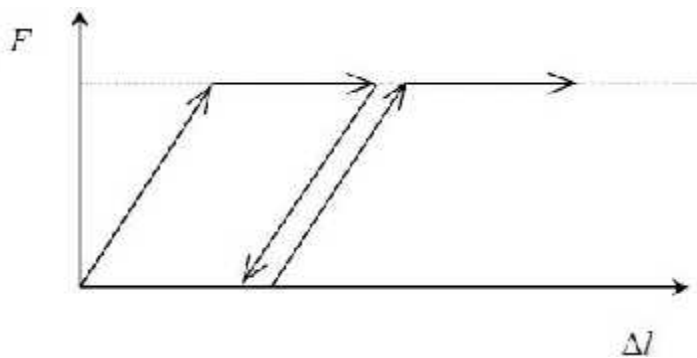


Figure II- 3- Représentation du comportement élastique parfaitement plastique.

Lors d'une décharge, le comportement est élastique et réversible. La longueur de la déformation plastique est à priori indéterminée.

Le type de comportement représenté par la figure II.4 est un comportement élastique-plastique sans écrouissage. (La figure II.4) représente un comportement élastique plastique avec écrouissage.

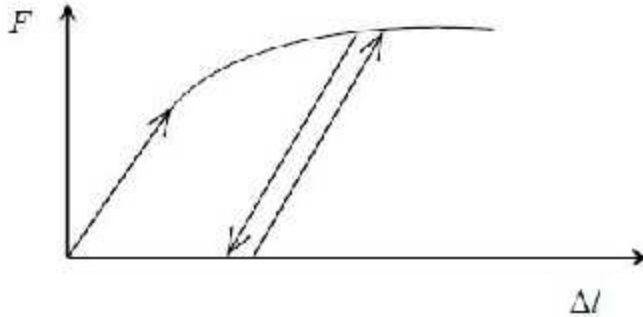


Figure II- 4- Représentation du comportement élastoplastique avec écrouissage.

II.2.4.3. Modèle élastique linéaire

Le modèle élastique utilisé dans Plais est classique. Les tableaux de rentrée des données demandent le module de cisaillement G et le coefficient de poisson ν . L'avantage de G est d'être indépendant des conditions de drainage du matériau ($G_u = G'$), ce qui n'est pas le cas des modules d'Young : le module de Young non drainé est supérieur au module de Young drainé. Il aurait pu sembler logique, si G est utilisé comme paramètre élastique, d'utiliser K comme second paramètre. [19]

D'une part K_u est infini (correspondant à $\nu = 0.5$) et il est moins courant d'emploi. G est en fait le module mesuré dans les essais pressiométriques. On passe de G à E par la relation :

$$E = 2G(1 + \nu).$$

Le modèle élastique de Plais 3D Tunnel peut être employé surtout pour modéliser les éléments de structures béton ou métal en interaction avec le sol. Il peut aussi être intéressant pour certains problèmes de mécanique des roches.

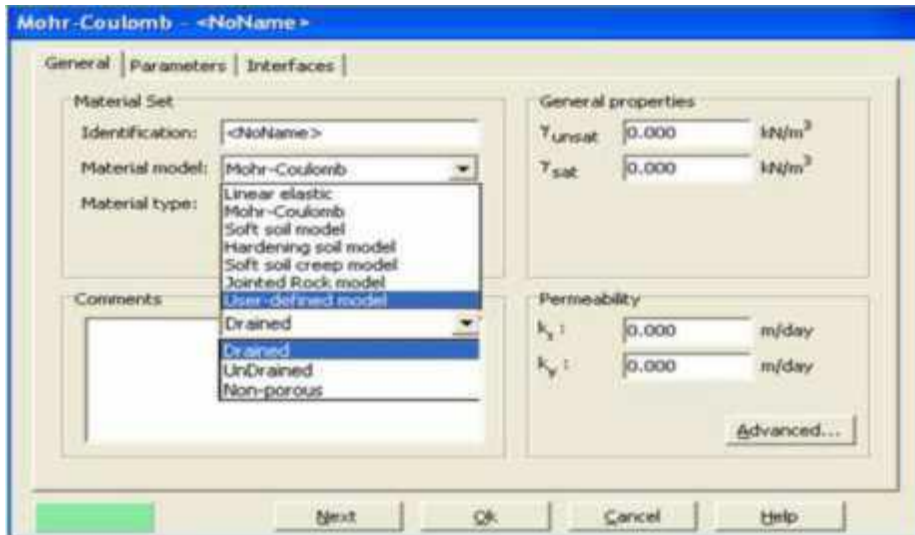


Figure II.5. Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire, (Logiciel Plais 8.2).

Le modèle de Mohr-Coulomb demande la détermination de cinq paramètres Les deux premiers sont E et ν (paramètres d'élasticité). Les trois autres sont c ; Φ et Ψ Respectivement, la cohésion ; l'angle de frottement et l'angle de dilatance. Ce sont des paramètres classiques de la géotechnique, certes souvent fournis par des essais de laboratoires, mais nécessaires à des calculs de déformation ou de stabilité. [8]

Dans le plan de Mohr–Coulomb, la droite intrinsèque est représentée par :

$$\tau = \sigma_n \tan\varphi + c$$

- σ_n et τ : Sont respectivement les contraintes normales et tangentielles de cisaillement;
- C et φ : Sont respectivement la cohésion et l'angle de frottement du matériau.

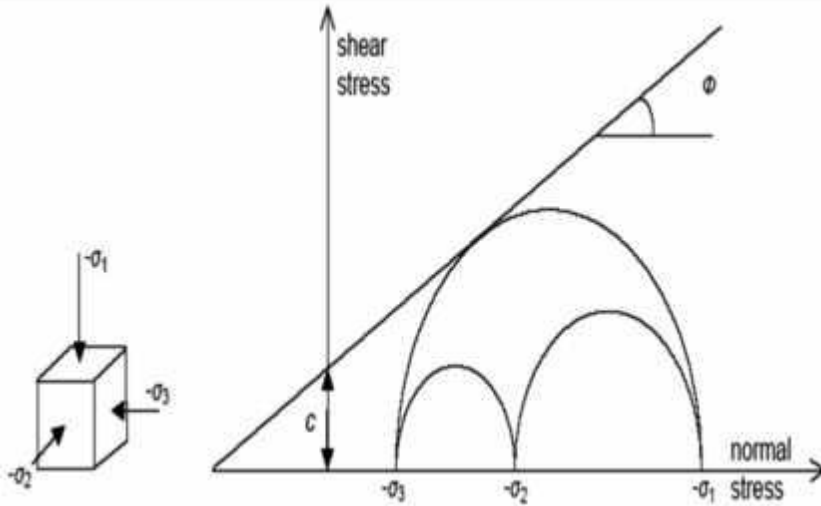


Figure II.6. Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb.

a- Module de Young E :

Le module de Young varie en fonction de la déformation et de la contrainte moyenne. Dans le modèle de Mohr-Coulomb, le module est constant. Ce dernier nécessite des essais spéciaux. Il est conseillé de prendre un module moyen, par exemple celui correspondant à un niveau de 50 % du déviateur de rupture. [15]

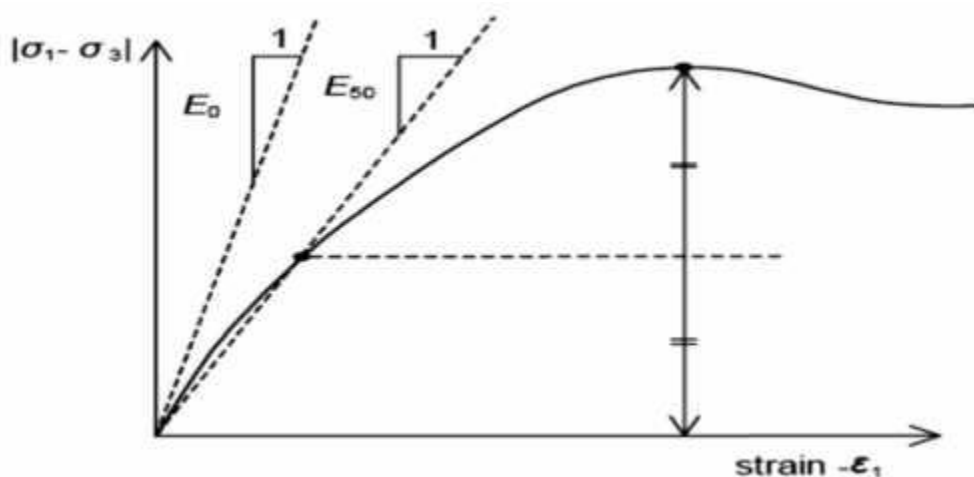


Figure II.7. Définition du module à 50% de la rupture.

b- Coefficient de Poisson (ν) :

Le comportement global d'un massif fracturé est fortement anisotrope. Toutefois l'anisotropie de la matrice rocheuse est relativement faible et négligeable par rapport à celle qui est induite par la présence des fractures. Pour cette raison, nous admettons que le comportement de la roche est isotrope est caractérisé par un module de Young E et un Coefficient de poisson ν .

Les valeurs du coefficient de Poisson se situent entre 0.2 et 0.4.

c- Angle de frottement (ϕ) :

Plais ne prend pas en compte une variation d'angle de frottement avec la contrainte moyenne. Il peut être celui de frottement de pic ou celui de frottement du palier. On peut le déterminer à partir de la courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb.

d- La cohésion (C) :

Les roches sont beaucoup plus cohésives que les sols, mais il existe d'importantes différences de la valeur de la cohésion entre les types de roches, par exemple entre un granite et la craie. Le degré d'altération de la roche est un facteur à prendre en compte.

La cohésion est également en fonction de la présence de discontinuités. En effet, ces dernières sont les points faibles d'une roche et en déterminent fortement la résistance au cisaillement. Ainsi, lorsque de la présence des discontinuités, la résistance au cisaillement d'une roche sera dépendante de la résistance au cisaillement des joints de ces discontinuités et non de celle de la matrice. [21]

e- Angle de dilatance (ψ) :

C'est le paramètre le moins courant. Il peut cependant être facilement évalué par la règle suivante :

$$\Psi = \phi - 30^\circ, \text{ pour } \phi > 30^\circ ;$$

$$\Psi = 0^\circ, \text{ pour } \phi < 30^\circ.$$

Le cas où $\psi < 0^\circ$ correspond à des sables très lâches.

La valeur $\psi = 0^\circ$ correspond à un matériau élastique parfaitement plastique ou il n'y a donc pas de dilatance lorsque le matériau atteint la plasticité, c'est souvent le cas pour les argiles ou pour les sables de densité faible ou moyenne sous contraintes assez fortes.

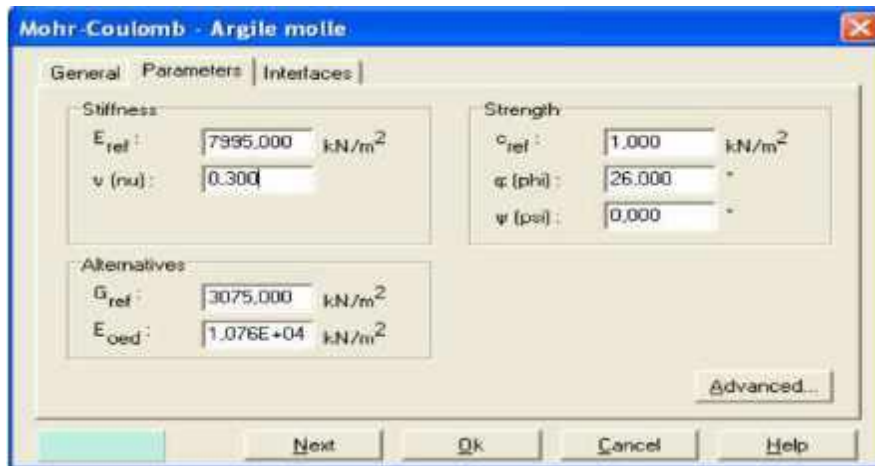


Figure II.8. Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb (Logiciel Plais 8.2).

III.1 Introduction :

Ce chapitre se propose d'analyser le comportement d'un barrage en terre avec noyau central d'étanchéité. L'exemple étudié est une représentation simplifiée d'une géométrie typique d'un barrage en remblai. Il a été construit au-dessus d'une couche de fondation.

La modélisation a été établie et calculée avec le logiciel PLAXIS 8.2. Et cela dans le but de vérifier la stabilité du barrage sous différentes situations géostatiques telles que la vidange.

III.2 Les objectifs à attendre par ce barrage :

L'importance du barrage de Soubella représentée par l'irrigation et l'alimentation des communes proches par l'eau potable : Ain El-Khedra, Belaïba, Berhoum, Dehahna, OuledAddiGuebala et OuledDerradj.

III.3 situation du barrage :

Le site du barrage de Soubella est situé sur l'oued du même nom dans la commune de Magra (Wilaya de M'Sila), à environ 60 km à l'est de la ville de M'Sila et à 4 km au nord de la ville de Magra. Il est approximativement à la même distance au Sud de la Wilaya de Sétif.

Le site du barrage est caractérisé par un verrou topographique très étroit à l'amont d'une zone habitée. Les rives calcaires sont particulièrement abruptes voire subverticales au droit du défilé.

Cette gorge étroite s'ouvre sur une vaste plaine que l'oued Soubella traverse avant de se jeter dans le chott el Hodna.

La route nationale RN28 qui relie Magra à Sétif permet d'accéder facilement au site. Le site est situé à l'amont immédiat du pont permettant à la RN28 de franchir l'oued Soubella, 3 à 4 km au nord de la ville de Magra.

Le site du barrage de Soubella a pour coordonnées UTM :

$$X = 694\,499 \text{ m}$$

$$Y = 3\,952\,558 \text{ m}$$

$$Z=725\text{m}(\text{fond de vallée}) [21]$$



Figure III.1: Localisation géographique du barrage de SOUBELLA

III.4 Présentation du barrage de Soubella :

Le barrage de Soubella est composé par plusieurs matériaux à partir leurs granularités, chaque matériau placé dans une zone bien déterminé dans le corps du barrage pour protéger le noyau, la séparation entre les différentes zones se fait par les filtres de transition.

On peut classer le barrage de Soubella selon la nature des matériaux de construction (argile compacte, pierres cassées...etc.) et la hauteur du barrage 67 m (35 m-75 m) dans la classe II.



Figure III.2 : Localisation géographique du barrage de Soubella.

[Google earth]

Notre barrage de Soubella constitue comme tous les barrages en terre par des matériaux naturels comme l'argile, des roches, des pierres, ses parties principales sont :

- 1- le noyau : on l'utilise par des sols fins pour assurer l'étanchéité du barrage et sa position est centrée.
- 2- les recharges : on les construit par des sols différents que le sol du noyau (sols frottant perméables) pour supporter et protéger le noyau.
- 3- le drain : à partir de son nom, il assure l'écoulement de l'eau dans le sol et diminue la pression interstitielle pour cela il doit contenir des sols très perméables.
- 4- les filtres : ce sont des parties peu épaisses, on les place entre les différentes parties contre l'infiltration des eaux et pour éviter le phénomène de renard (l'érosion interne).
- 5- le rip-rap : couche superficielle constitué par des blocs d'engrèvements sur les côtés du remblai pour le protéger contre les vagues, la relation entre les dimensions des blocs.
- 6- batardeau amont et aval : on le construit pour protéger notre chantier de travaux contre le risque de la crue par les eaux arrivées de l'oued.
- 7- bermes: elles donnent la stabilité aux digues et réduisent la vitesse des eaux qui glissent sur les surfaces du talus aval, en contribuant à éviter l'érosion. Ils servent aussi d'appui aux revêtements des talus en amont.
- 8- écran d'injection : Elle permet de couper ou de diminuer le flux d'eau à travers la fondation, Il est construit en injectant un mélange de ciment et d'eau qui remplit les pores et les fentes. (Dans notre cas on a trois profils avec un espacement de 2 m). [22] [23]

III.5 Caractéristiques de l’ouvrage :

- Longueur en crête de la digue..... $L=246,5$ m
- Largeur de la crête..... $lc = 10.00$ m
- Largeur maximale de la base de la digue $lbd = 80$ m
- Pente amont $Pam = 1/3,1$
- Pente avale $Pav = 1/2.7$
- Hauteur maximale de la digue..... $H = 48$ m
- Volume d'eau de la retenue $Ve = 69$ HM3

III.6 Géométrie et la stratification de la structure avec des nœuds signifiants :

Pour que le logiciel PLAXIS puisse faire les calculs correctement et complètement on doit lui saisir les données du projet suivantes.

Pour les réglages généraux, on a choisi :

Les déformations sont considérés planes.

Eléments à 15 nœuds.

Unités : m(Mètre), kN (Kilo newton), j (jour)

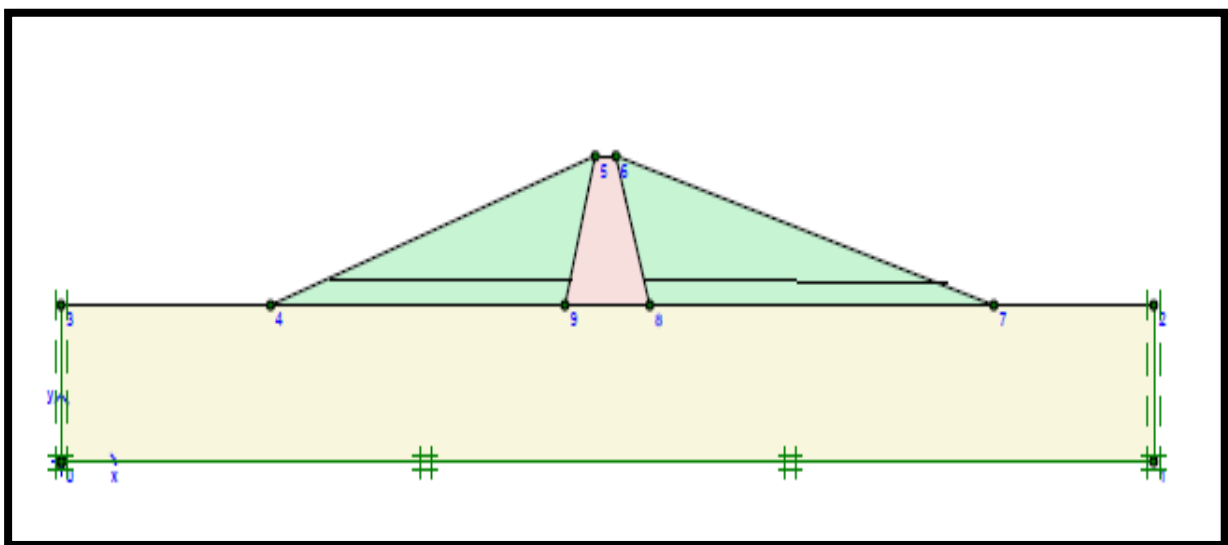


Figure III.3 : Représentation du modèle Géométrique du barrage

III.7 Caractéristiques des matériaux :

Tableau III.1 : Caractéristiques de la fondation [24]

	N°	C'(KPa)	ϕ' (°)	γh (KN/m3)	γ_s (KN/m3)	E (MPa)	ν
Fondation marneuse	1	30	25	22	22	7500	0.3
Fondation calcaire	2	5000	45	22	22.5	6000	0.3

Tableau III.2 : Caractéristiques des matériaux du barrage [24]

	N°	C'(KPa)	ϕ' (°)	γh (KN/m3)	γ_s (KN/m3)	E (MPa)	ν
Recharge amont	1	10	33	20	21	765	0.3
Recharge aval	2	10	33	20	21	765	0.3
Noyau argileux	3	25	21	19	20	216	0.4
Filtres & drains	4	70	40	19	22	770	0.3

III.8 Maillage :

On a choisi des éléments à 15 nœuds. Pour plus de précision, le maillage est raffiné au niveau de la digue.

En ce qui concerne les conditions aux limites mécaniques, la base de la fondation est bloquée dans les deux directions alors que les frontières verticales sont bloquées dans le sens horizontal seulement pour permettre les tassements **Figure III.4**

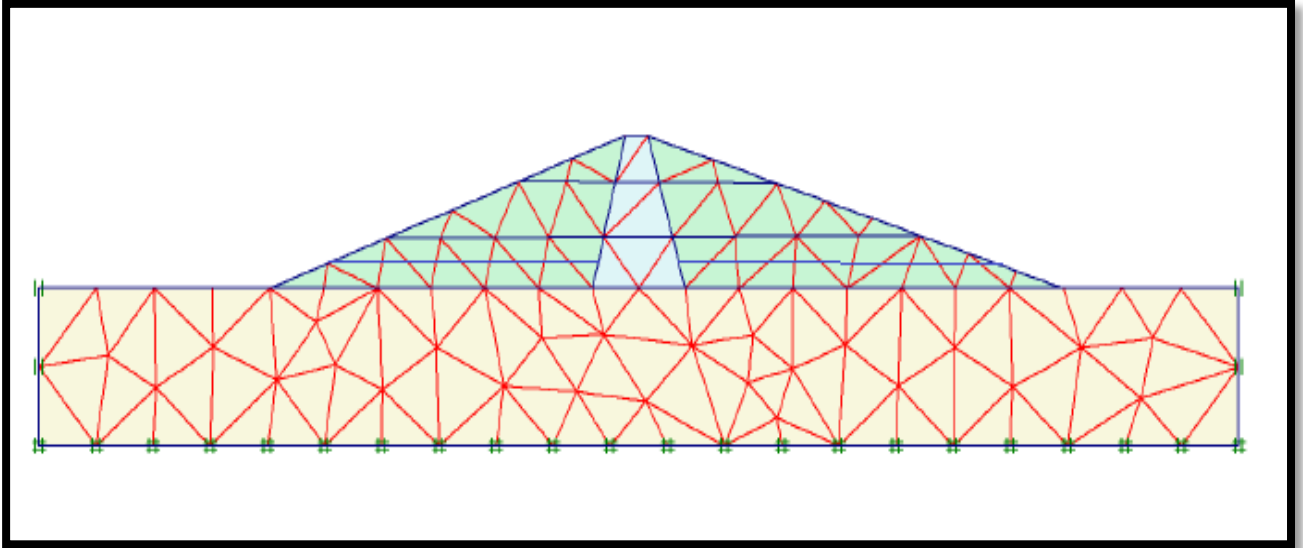


Figure III.4 :représentation du Maillage

III.9 Phases de calcul :

Les calculs numériques ont été faits en 5 phases qui sont :

- **Le première phase :**

Des calculs pour l'analyse de la stabilité du barrage en fin de sa construction (barrage vide).

- **De la 2ième phase jusqu'à 4ième phase :**

Des calculs pour l'analyse du comportement du barrage au cours de remplissage progressif du barrage par les eaux sous l'effet du poids

Propre du barrage et les forces hydrostatiques

- **La 5ième phase :**

Des calculs pour l'analyse de la stabilité du barrage en cas de vidange Rapide.

III.10 Résultats et interprétations :

- cas fin construction (barrage vide)

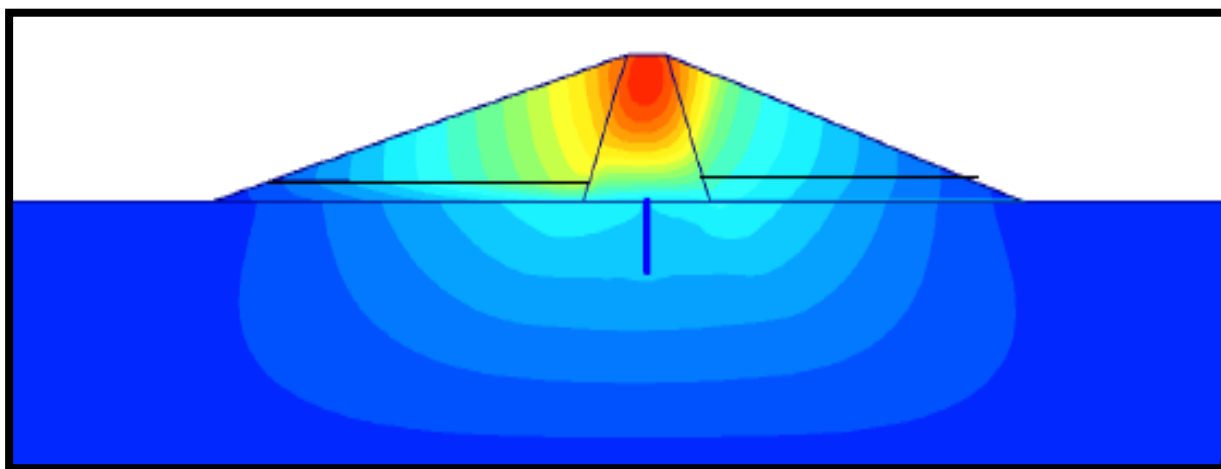


Figure III.5 : Déplacements totaux en fin de construction.

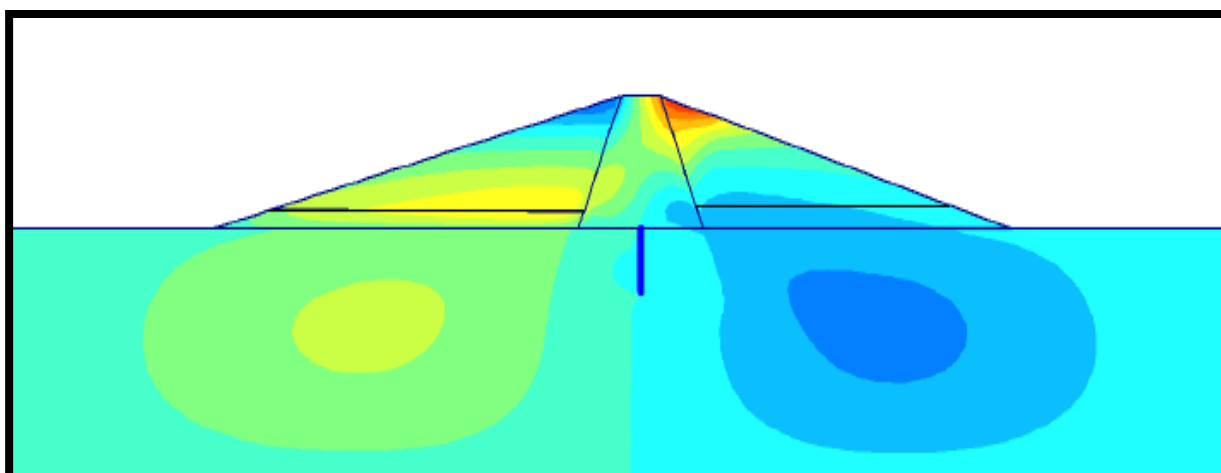


Figure III.6 : Les déplacements horizontaux.

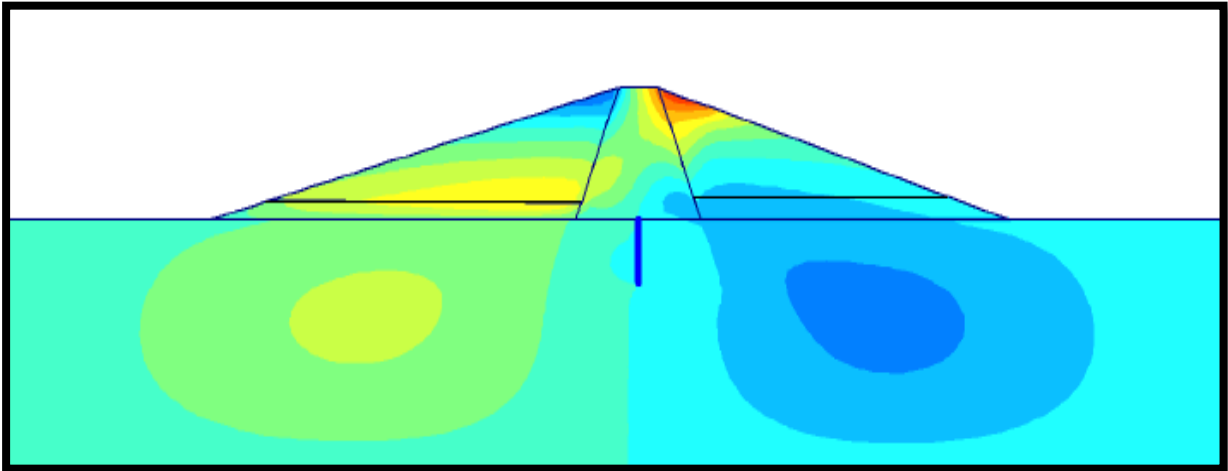


Figure III.7 : Les déplacements verticaux.

Les déplacements s'orientent vers le centre de la digue au niveau de la crête et vers l'extérieur au niveau des deux talus à la base.

Les déplacements horizontaux et verticaux sont plus grands dans l'amont car le talus repose sur le tapis étanche en argile.

Le coefficient de sécurité trouvé par la méthode « c- ϕ réduction »

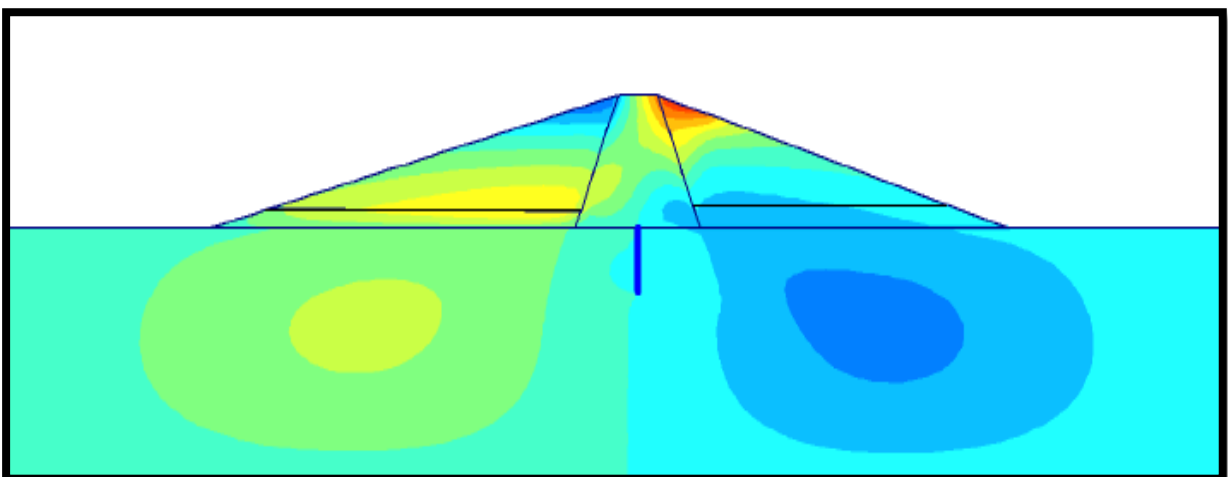


Figure III.8 : Distribution des pressions interstitielles

Ce logiciel a montré dans la **Figure III.8**. Une répartition des pressions interstitielles hydrauliquement une sens significative présentée par l'absence de noyaux argileux et la

transmettre vers la fondation du talus aval loin des zones de glissement, cette observation nous assure le bon fonctionnement du barrage.

En aval et vers le sommet du barrage, il n'y a aucun effet des pressions interstitielles sans aucun appel au niveau d'eau dans le piézomètre réalisé dans ce barrage, contrairement à l'effet de la pression qui rend efficace dans la fondation du côté amont, ce s'explique par le fait que la fondation est une fondation mauvaise qui impose le bon choix de type de barrage.

• cas fonctionnement normal (barrage plein d'eau)

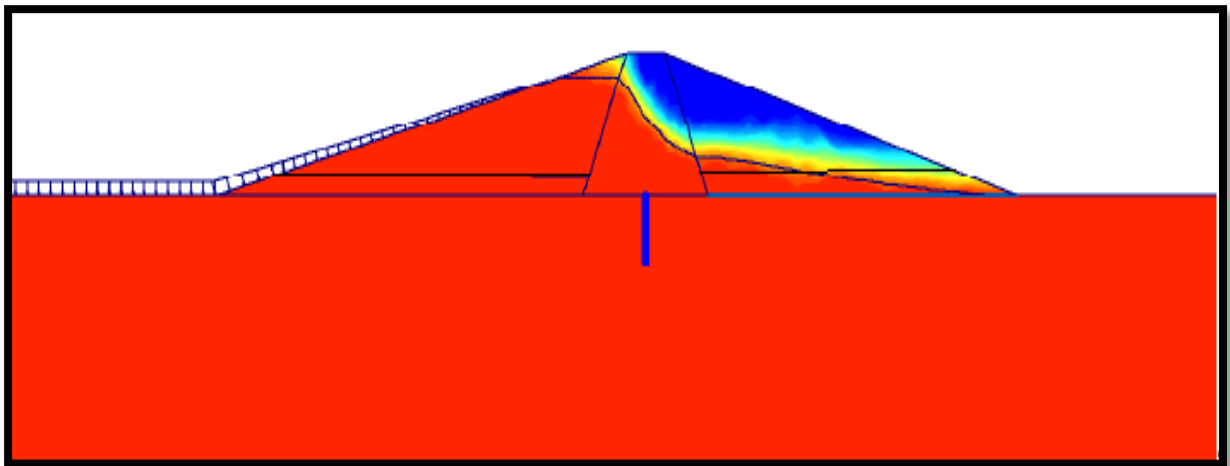


Figure III.9 : Ligne de saturation et degré de saturation (Plais).

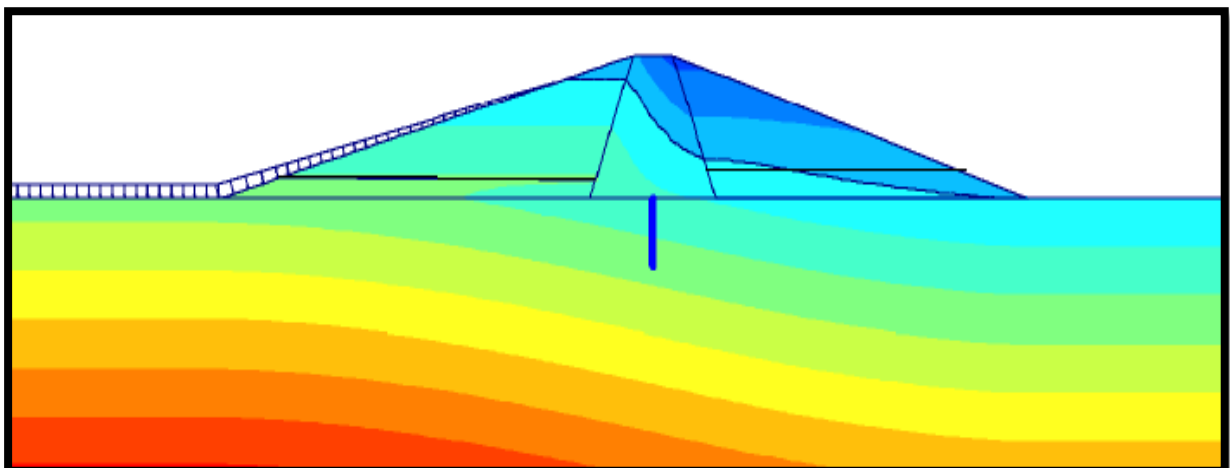
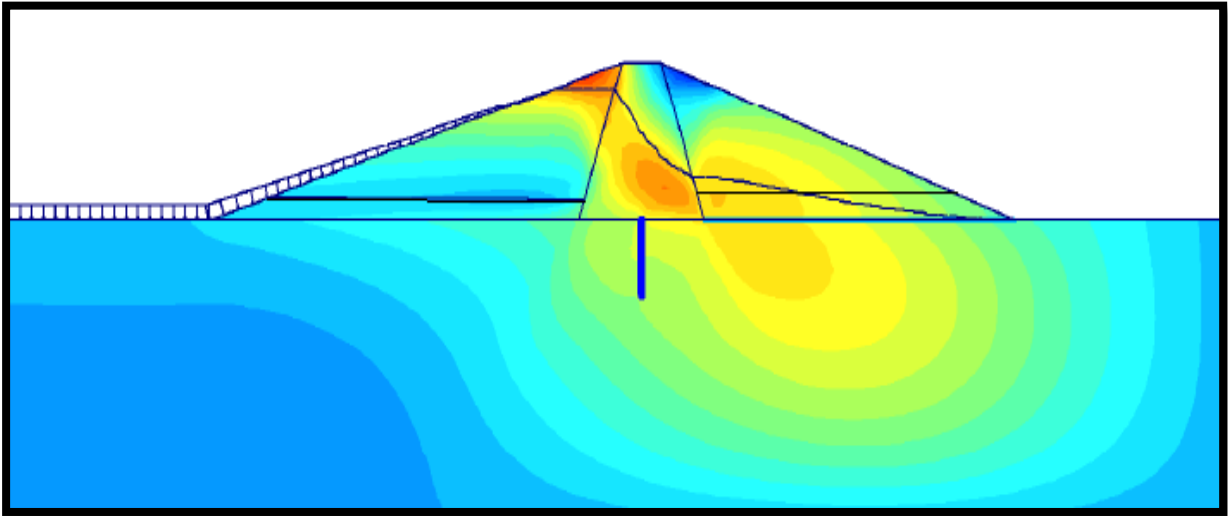


Figure III.10 : Distribution des pressions interstitielles**Figure III.11 : déplacements horizontaux (fonctionnement normale)**

L'image de logiciel **Figure III.11** indique clairement l'endroit probable de déplacement horizontal qui sont généralement l'interface de ligne de saturations entre la zone sèche et la zone humide deux positions considérables :

A la proximité de crête au côté amont

Dans le noyau en argile

Les deux endroits ne posent aucun problème

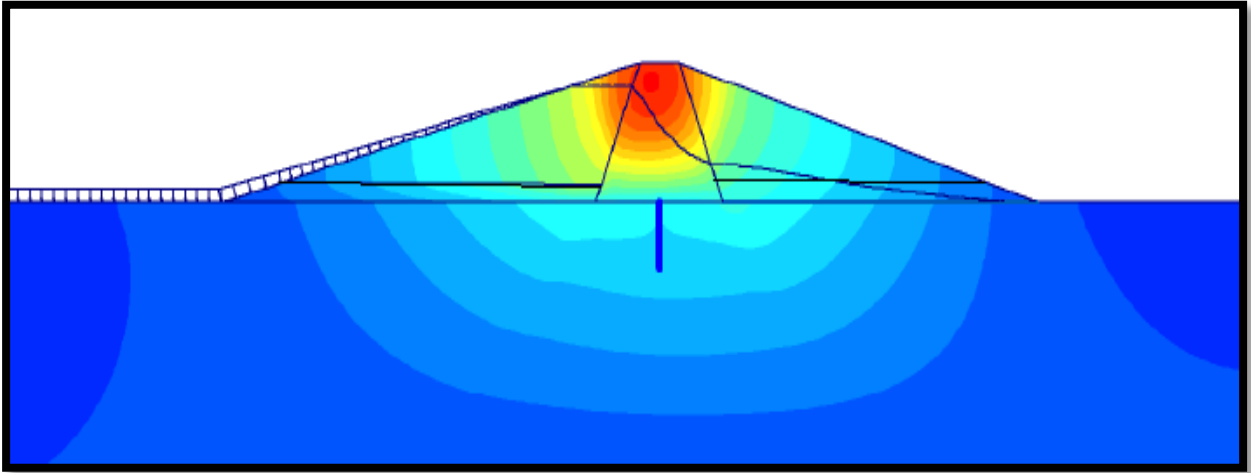


Figure III.12 : déplacements verticaux (régime permanent)

L'image traitée par logiciel a montré un déplacement que un seul endroit probable de produire un déplacement vertical à la partie supérieure humide et sec compris la partie supérieure de noyaux en raison de la faible force verticalement exercée sur noyaux.

Les déplacements horizontaux sont plus grands dans l'aval sauf au niveau de la crête loin de la surface d'eau.

Le coefficient de sécurité trouvé dans ce cas par la même méthode « c-φ réduction » de PLAXIS est **Fs= 1,22**

- Cas de vidange rapide

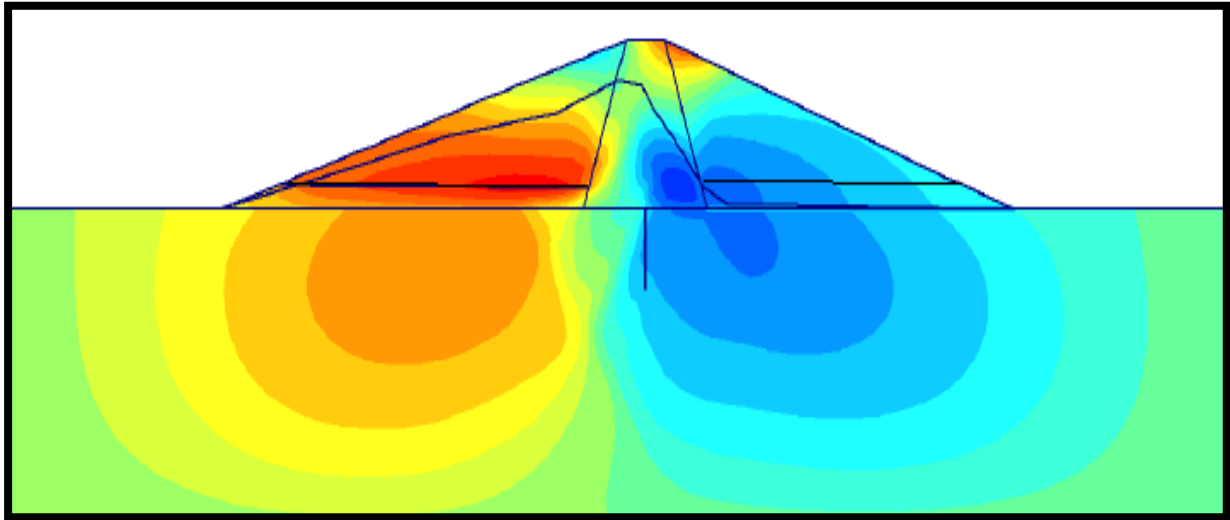


Figure III.13 : Déplacements totaux en cas de vidange rapide.

De manière général comme des observations pertinentes l'image de logicielle nous a donné a une idea de déplacement de corps de barrage en cas vidange rapide , cette opération a une important dans la protection de noter barrage dan les cas des inondations et des séismes

L'image monter qui il ya une seul propableliéé avec le déplacement de la ligne de saturations que se dernier crée toujours a l'interface périodiquement avec l'abaissement de ce lui ci jusque le tapis filtre

Cette déplacement ne aucuninfluence sur l'ensemble de barrage .

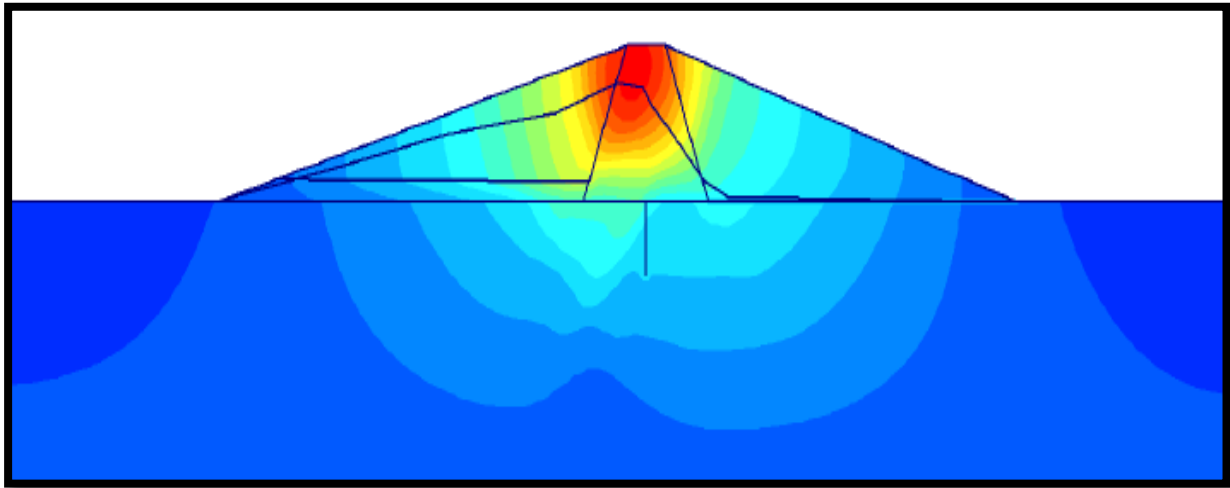


Figure III.14 : Les déplacements verticaux en cas de vidange rapide du barrage.

Le coefficient de sécurité trouvé dans ce cas par la même méthode « $c-\phi$ réduction » de PLAXIS est $F_s = 1,2$

III.11 Récapitulation des Coefficients de sécurité :

Coefficients de sécurité :

Seule l'allure du champ des incréments de déplacements est significative dans un calcul de stabilité (*Phi-c reduction*). Celle-ci fournit une indication du mécanisme de rupture qui serait obtenu par un calcul traditionnel de type équilibre limite pour des surfaces de rupture circulaires.

Les calculs numériques en tout de la phase de construction du barrage :

Tableau III.3 : Coefficients de sécurité calculé pour les différents cas

Cas de charge	Fs
Fin de construction	1.3
Retenue Normale	1.22
Vidange Rapide	1.2

III.12 Conclusion :

Notre travail est entièrement étudié la stabilité du barrage en remblai de type enrochement avec noyau d'argile par l'utilisation d'un logiciel plaxis par la méthode des éléments finis Pour les trois fonctionnements de barrage (fin construction, plein d'eau, vidange rapide)

Le logiciel a montré la situation de stabilité pour les trois cas de fonctionnement

Ces images correspondent à la répartition des pressions interstitielles qui n'ont aucun danger sur la totalité de corps de barrage à l'exception qui généralement a des solutions recommandées

Les images traduisent le déplacement verticaux et horizontaux pour les trois cas de fonctionnement du barrage ont montré seul la partie supérieure et sommet de noyaux d'argile à cause du passage brusque de la ligne de saturation. Ces images ont des rôles pertinents dans le comportement de cette stabilité par différentes couleurs de bleu jusqu'à le rouge respectivement de la sécurité vers le danger possible notamment la fondation puisque cela est de tupealluionnaires et l'intermédiaire de ces couleurs telle que le couleur turquoise et le jaune et le marron, chacun a ses degrés de risque

La valeur de coefficient de sécurité sont presque égaux pour les trois cas de fonctionnement, ces dernières valeurs sont presque à l'unité s'expriment que :

Le barrage est neuf (neuveux et ces dimensionnements justes)

Enfin ce logiciel est utile pour l'ingénieur hydraulicien dans la conception des ouvrages hydrauliques.

Conclusion général

L'observation de la réponse des digues et barrages en terre en cours de construction et la mise en eau montre qu'elles dépendent de plusieurs facteurs à savoir : la géométrie du barrage, les propriétés mécaniques des matériaux de construction

Dans notre mémoire on a utilisé le logiciel de calcul par la méthode des éléments finis (PLAXIS) a été utilisé pour l'évaluation du coefficient de sécurité ainsi que l'influence des pressions interstitielles sur la stabilité du barrage. Des résultats ont été obtenus pouvant servir comme base de données dans le domaine de l'analyse statique des comportements des barrages en terre.

L'analyse des résultats de simulation de la présente étude a permis de dégager les

Conclusions suivantes :

En fin de construction

Les déplacements s'orientent vers le centre de la digue au niveau de la crête et vers l'extérieur au niveau des deux talus à la base. Les déplacements horizontaux sont plus grands dans l'amont car le talus repose sur le tapis étanche en argile.

En fonctionnement normal :

Les déplacements s'orientent vers le centre de la digue au niveau de la crête et vers l'aval au niveau des deux talus à la base à cause de la charge d'eau et les pressions hydrostatiques appliquées sur le talus amont.

En vidange rapide :

A cause de l'élimination de la charge d'eau les déplacements sont encore plus marqués dans le talus amont.

Ce calcul numérique est vérifié analytiquement par la méthode des éléments finis, dont on a obtenu presque la même valeur de FS dans tous les cas (fin construction ,retenue normal, vidange rapide), donc le barrage de Soubella est stable

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [3] Brousek N., « la protection des parements des barrages en terre et en enrochement " », XI^{ème} ICOLD, Madride, 1973.
- [4] J. M. Durand et al: Technique des petits barrages en Afrique sahélienne et équatoriale, cemagref éditions –ISBN 2- 85362-511-7/1999.
- [5] Djemili. L: Critères de choix de projet des barrages en terre « étanchéité par le masque en béton bitumineux », thèse de Doctorat, 2006
- [6] CIGB, Barrages en remblai : protection du talus amont, 1993.
- [7] Alonso (E.), Poulain (D.), Influence des caractéristiques mécaniques et des pressions interstitielles sur la stabilité des barrages en terre homogènes, journées nationales d'étude AFEID-CFGB « petits barrages », Bordeaux, Cemagref édition, 1994 .
- [8] CFG., Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéités par géomembranes, Comité Français des Géosynthétiques, Rueil-Malmaison, 1991.
- [9] Ministère de l'agriculture française: Technique des barrages en aménagement rural, édition, 1977.
- [10] ROLLEY R. Dir. Technique des barrages en aménagement rural, 1989.
- [11] FRY J.J., CARRERE A. Modélisation des barrages en remblai. In: Colloque Technique 2001 du CFGB, Aix-en-Provence, 2001.
- [12] CARRERE A. Conception des barrages voûtes. In: Colloque Technique 2001 du CFGB, Aix-en-Provence, 2001.
- [13] [http : www.edf.fr](http://www.edf.fr) (se site EDF présente les barrage et leurs fonctionnements).

[14] <http://www.aude.pref.gouv.fr/ddrm/risque-barr/bar2.html> (se site présente des exemples de rupture de barrage).

[15] **Akram KOUCHY** « étude de soutènement provisoire le cas métro d'Alger. » Mémoire Magister de l'université EL Hadj Lakhdar-Batna,[2012].

[16] **Michel KERN**, « Introduction à la méthode des éléments finis. », Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris ,France,[2004/2005].

[17] **JAMEL Idris**, « Accidents géotechnique des tunnels et des ouvrages souterrain-méthodes analytiques pour le retour d'expérience et la modélisation numérique. », Thèse de Doctorat de l'université NANCY-INPL,[23 octobre 2007].

[18] **Lahmadi AZZIDDINE**, « étude paramétrique de l'interaction entre ouvrage-bâtimentexcavation. », Mémoire de Magister de l'université EL Hadj Lakhdar-Batna,[2006].

[19] **TOUFIK Khefache**, « Modélisation du creusement d'un tunnel en milieu urbain cas du métro d'Alger », Mémoire de Magistère de l'université de Abderrahmane Mira-Bejaia. [2007].

[20] **ZHAO Jian**, « Rock Mechanics, Mécanique Des Roches, propriété des discontinuités», 4^{eme} Partie, EPEL-ENAC-LMR, [2008].

[21] **ISMAIL Kerikech ,FOUAD Benarfa**, « conception et calcul d'un tunnel, cas métro d'Alger », Mémoire d'Ingénieure de l'Ecole Nationale Polytechnique,[2006/2007].

[22] **Coyne et Bellier** (mars 2009) avant-projet détaillé mémoire de synthèse rapport 12035-rp- 0501-b.

[23] **Rodriguez, Bernardo La Rosa**, Santos (2003/2004) Manuel de conception et projets typiques des digues en terre. Alger.

[24] **Coyne et Bellier** (novembre 2008) avant-projet détaillé mémoire justificatif rapport 12035-rp-0502-a.