

**Ministère de l'enseignement supérieure  
Et de la recherche scientifique  
Université Amar Thelidji- Laghouat**



**Faculté de Génie Civil et d'Architecture  
Département Génie Civil**

**MEMOIRE**

**Présenté pour l'obtention du diplôme De  
MASTER**

**Présenté par : Madjda Kennani**

**FILIERE : Hydraulique**

**Option : Ressources Hydraulique**

**THEME**

**Effet De La Dimension De La Base  
Perméable Sur Le Débit D'infiltration  
à Travers Un Barrage En Terre**

**Jury de soutenance :**

- |                                |      |             |
|--------------------------------|------|-------------|
| - M <sup>r</sup> HAMLAT A.     | Pr   | Président.  |
| - M <sup>r</sup> Lakhdari M.F. | M AA | Examineur.  |
| - M <sup>r</sup> Djehiche A.   | Pr   | Rapporteur. |

**Année universitaire :2021/2022**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## ***Remerciements***

*Je tiens à remercier tout d'abord « ALLAH », qui nous a donné la force de faire ce modeste travail.*

*Je tiens à remercier personnellement mon encadreur Mr DJEHICHE A.E.K. pour ses orientations, et pour avoir contribué à l'élaboration de ce présent mémoire.*

*Et ainsi que Tous les enseignants du département génie civil qui ont contribué à notre formation et les connaissances qu'ils nous ont transmises grâce auxquelles nous avons pu réaliser ce travail.*

*Sans oublier mes amies et collègues.*

## ***DEDICACE***

*A toutes personnes ayant contribuées a ma formation et mon éducation durant tout mon*

*curriculum vitae*

# SOMMAIRE

---

---



---

## SOMMAIR

|                            |   |
|----------------------------|---|
| INTRODUCTION GENERALE..... | 1 |
|----------------------------|---|

### CHAPITRE I

#### Généralités sur les barrages en terre

|   |    |
|---|----|
| I.1 INTRODUCTION .....                          | 2  |
| I.2 Définition .....                            | 2  |
| I.3 Généralités sur les milieux poreux .....    | 3  |
| I.3.1 Définition des milieux poreux .....       | 3  |
| I.3.2 Les paramètre des milieux poreux.....     | 3  |
| I.4 Drains et filtres du barrage en terre ..... | 6  |
| I.4.1 Rôle des drains et filtres .....          | 6  |
| I.4.2 Constitution des drains et filtres .....  | 7  |
| I.5 Différents types de drain .....             | 7  |
| I.6 Les barrages en terre en Algérie .....      | 10 |
| I.7 Conclusion .....                            | 28 |

### CHAPITRE II

#### Les méthodes et les outils numériques de calcul

|  |    |
|--|----|
| II. 1 Introduction .....                           | 30 |
| II. 2 Méthode de résolution de l'infiltration..... | 30 |
| II. 2.1 Méthode graphique .....                    | 31 |
| II. 2.2 Méthode numérique .....                    | 32 |
| II. 2.3 Méthode analytique .....                   | 34 |
| II.2.4 Méthode expérimentales .....                | 36 |
| II.2.5 Méthode analogique .....                    | 37 |
| II.2.6 Méthode probabiliste .....                  | 37 |
| II.3 Différent méthode de calcul de stabilité..... | 38 |
| II.3.1 Notion du coefficient de sécurité .....     | 38 |
| II.3.2 Méthode des tranches.....                   | 38 |
| II.3.3 Méthode de Fellenius.....                   | 39 |
| II.3.4 Méthode de Bishop simplifiée .....          | 40 |
| II.4 Présentation du logiciel.....                 | 41 |
| II.5 Conclusion .....                              | 48 |

**CHAPITRE III****Application et résultats**

|         |  |    |
|---------|--|----|
| III.1   | INTRODUCTION.....  | 50 |
| III.2   | Résultats des calculs et interprétation .....  | 50 |
| III.2.1 | modèle de calcul .....   | 50 |
| III.3   | Effet de la profondeur de la base perméable sur le débit d'infiltration .....          | 51 |
| III.4   | Effet de la profondeur de la base perméable sur la stabilité du barrage .....          | 55 |
| III.5   | Effet de la pente aval sur la stabilité du barrage.....                                | 58 |
| III.6   | Effet de la perméabilité de la base perméable sur le débit d'infiltration .....        | 59 |
| III.7   | Effet de la perméabilité de la base perméable sur la stabilité<br>du barrage .....     | 61 |
| III.8   | Effet de différent pente amont sur le débit d'infiltration de la base du barrage ..... | 63 |
| III.9   | Exemple de calcul de coefficient de sécurité par la méthode de fellenius manuelle..... | 64 |
| III.10  | Conclusion .....   | 68 |
|         | Conclusion général.....  | 70 |

# Liste des tableaux

---

---

## LISTE DES TABLEAUX

|   |    |
|---|----|
| Tableau III 1 Résultats de simulation de débit d'infiltration de barrage .....                                    | 51 |
| Tableau III.2 Résultats de simulation débit d'infiltration de la base du barrage.....                             | 52 |
| Tableau III.3 Résultats de simulation de coefficient de sécurité $F_s$ .....                                      | 55 |
| Tableau III.4 : Résultats de simulation de coefficient de sécurité en fonction de pente aval .....                | 58 |
| Tableau III.5 : Résultats de simulation de débit d'infiltration en fonction de perméabilité<br>de la base .....   | 60 |
| Tableau III.6 : Résultats de simulation de coefficient de sécurité en fonction de perméabilité<br>de la base..... | 61 |
| Tableau III.7 : Résultats de simulation de débit d'infiltration en fonction de la pente amont.....                | 63 |

# Liste des figures

---

---

**LISTE DES FIGURES**

|  |    |
|--|----|
| Figure I.1 : une portion du sol.....                           | 3  |
| Figure I.2 : disposition de drain (fondation imperméable)..... | 7  |
| Figure I.3 : disposition de drain (fondation perméable).....   | 8  |
| Figure I.4 : drain vertical.....                               | 8  |
| Figure I.5 : drainage de surface.....                          | 9  |
| Figure I.6 : drainage à bande .....                            | 10 |
| Photo I.7 : barrage AIN ZADA .....                             | 10 |
| Photo I.8 : barrage AIN DALIA .....                            | 11 |
| Photo I.9 : barrage Guentira.....                              | 12 |
| Photo I.10 : barrage Hammam debagh.....                        | 13 |
| Photo I.11 : barrage Mexa.....                                 | 14 |
| Photo I.12 : barrage El agrem.....                             | 15 |
| Photo I.13 : barrage Koudiat Medoura.....                      | 16 |
| Photo I.14 : barrage Taksebt.....                              | 17 |
| Photo I.15 : barrage Cheffia.....                              | 18 |
| Photo I.16 : barrage Babar.....                                | 19 |
| Photo I.17 : barrage Fontaine des gazelle.....                 | 20 |
| Photo I.18 : barrage Zit El emba.....                          | 21 |
| Photo I.19 : barrage Beni-Zid.....                             | 22 |
| Photo I.20 : barrage Oued Cherf.....                           | 23 |
| Photo I.21 : barrage Bougous.....                              | 24 |
| Photo I.22 : barrage Boukourdane.....                          | 25 |
| Photo I.23 : barrage Keddara.....                              | 26 |
| Photo I.24 : barrage Tilesdit.....                             | 27 |

---

|  |    |
|--|----|
| Figure II.1 : ligne de saturation selon Kozeny.....  | 31 |
| Figure II.2 : division d'un barrage en éléments finis.....   | 33 |
| Figure II.3 : profil de la courbe de saturation.....   | 34 |
| Figure II.4 : effet de l'anisotropie sur la ligne de saturation .....  | 36 |
| Figure II.5 : la masse du talus découpé en tranches.....   | 38 |
| Figure II.6 : force appliquées sur une tranche dans la méthode de fellenius.....   | 39 |
| Figure II.7 : représentation des forces sur une tranche, méthode de bishop .....   | 40 |
| Figure II.8 : les modules du logiciel GEOSTUDIO 2012.....  | 41 |
| Figure II.9 : fenêtre d'analyse du module SLOPE/W .....  | 43 |
| Figure II.10 : introduction des propriétés des matériaux.....  | 44 |
| Figure II.11 : fenêtre du gestionnaire des solutions .....   | 45 |
| Figure II.12 : tracé des équipotentielles sans drain .....   | 45 |
| Figure II.13 : distribution de la pression interstitielle après les drains .....   | 46 |
| Figure II.14 : choix de la méthode d'analyse .....   | 47 |
| Figure II.15 : visualisation des résultats de calcul de la stabilité .....   | 47 |
| Figure III.1 : les conditions aux limites hydrauliques .....   | 50 |
| Figure III.2 : Variation de débit d'infiltration à travers le corps du barrage en fonction de<br>lprofondeur de la base de barrage $K_1=K_2$ ..... | 51 |
| Figure III.3 : Variation de débit d'infiltration à travers la base du barrage en fonction de la<br>profondeur $K_1=K_2$ .....                      | 52 |
| Figure III.4 : résultats de simulation de l'infiltration $n=1.5K_1=K_2$ .....  | 53 |
| Figure III.5 : résultats de simulation de l'infiltration $n=3K_1=K_2$ .....  | 53 |
| Figure III.6 : résultats de simulation de l'infiltration $n=2K_1=K_2$ .....  | 54 |
| Figure III.7 : Variation du coefficient de sécurité à différent pente amont en fonction de la<br>base du barrage.....                              | 56 |
| Figure III.8 : résultats de simulation de la stabilité $n=1.5K_1=K_2$ .....  | 56 |

---

|  |    |
|--|----|
| Figure III.9 : résultats de simulation de la stabilité $n=2K_1=K_2$ .....  | 57 |
| Figure III.10 : variation de coefficient de sécurité en fonction de différente pente aval .....  | 58 |
| Figure III.11 : Résultats de simulation de l'infiltration, $n=33$ , $K_1=5K_2$ .....   | 59 |
| Figure III.12 : Variation du débit d'infiltration en fonction de différente perméabilité K<br>( $k_2=k_1$ ; $k_2=2 k_1$ ; $k_2=5 k_1$ ; $k_2=10 k_1$ ).....    | 60 |
| Figure III.13 : Variation du coefficient de sécurité en fonction de différente perméabilité K<br>( $k_2=k_1$ ; $k_2=2 k_1$ ; $k_2=5 k_1$ ; $k_2=10 k_1$ )..... | 62 |
| Figure III.14 : Variation du débit d'infiltration en fonction de différente pente Amont(n) .....   | 63 |
| Figure III.15 : résultats de calcul de la stabilité (Fs).....  | 64 |

## ملخص

. يقدم هذا البحث دراسة تأثير أبعاد وعمق قاعدة السد الترابي ، والمنحدر الخلفي و الامامي على معدل التسرب واستقرار السد .ناقشنا طرق التصميم المختلفة وتحليل الاستقرار للسدود الترابية وطرق الصرف .بعد ذلك، انتقلنا إلى عرض برنامج **GEOSTUDIO** ، باستخدام برنامج **SEEP / W** ، وحددنا تدفق التسرب، ثم التوازن الميكانيكي تحت تأثير مختلف الظروف الهيدروليكية (في الظروف العادية) والظروف الميكانيكية. باستخدام **SLPOE / W**. الكلمات المفتاحية: سد ترابي، عمق قاعدة السد الترابي ، المصرف العمودي، الميل الامامي والخلفي، التدفق المتسرب، معامل الاستقرار، **GEOSTUDIO**.

**Résumé**

.

Dans cette recherche présente une étude de l'effet de la dimension et la profondeur de la base du barrage en terre, de la pente avant et arrière sur le taux d'infiltration et la stabilité du barrage.

Nous avons discuté de différentes méthodes de conception et d'analyse de stabilité des barrages en terre et des méthodes de drainage. Ensuite, nous sommes passés à la présentation du programme GEOSTUDIO, à l'aide du programme SEEP/W, et avons déterminé le débit de fuite, puis l'équilibre mécanique sous l'influence de diverses conditions hydrauliques (en temps normal) et mécaniques. Utilisation de .SLPOE / W

**Mots-clés : barrage en terre, profondeur de la base du barrage en terre, drain vertical, pente avant et amont, débit d'infiltration, coefficient de stabilité, GEOSTUDIO.**

**Abstract**

In this research presents a study of the effect of the dimension and depth of the base of the earth dam, the front and back slope on the infiltration rate and the stability of the dam. We have discussed different methods of design and stability analysis of earth dams and drainage methods. Then we went to the presentation of the GEOSTUDIO program, using the SEEP/W program, and determined the leakage rate, then the mechanical equilibrium under the influence of various hydraulic (in normal times) and mechanical conditions. . Using .SLPOE/W

**Key words: earth dam, depth of earth dam base, vertical drain, front and upstream slope, infiltration rate, stability coefficient, GEOSTUDIO.**

**INTRODUCTION**

**GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

La réalisation des barrages en terre a connu une grande évolution poussée par l'accroissement de la demande d'alimenter la population en eau.

La conception d'un barrage est très complexe car peu répétitive et c'est en fonction des conditions du site, des fondations, des matériaux disponibles et du coût de réalisation que le type de barrage est adopté.

La sécurité des barrages constitue le souci permanent des ingénieurs chargés de leur conception, pour au moins deux raisons :

- éviter les ruptures catastrophiques,
- éviter de compromettre l'exploitation de l'ouvrage :

La défaillance ou l'indisponibilité d'un barrage peut affecter des intérêts économiques vitaux et entraîner des dommages sérieux même en l'absence de rupture du barrage

Les statistiques montrent que plus de 75% de ruines de barrages en terre sont causées par une mauvaise conception ou un mauvais fonctionnement des drains. [1]

L'objectif de notre travail est d'exploiter l'outil numérique pour étudier l'effet de la dimension de la base perméable sur le débit d'infiltration à travers un barrage en terre.

Le plan de travail se divise en trois chapitres :

- Le premier chapitre fait le point sur des généralités des barrages en remblai et les différentes méthodes utilisées pour vérifier la stabilité des talus du barrage.
- Le deuxième chapitre présente une partie théorique sur le phénomène des infiltrations à travers les barrages en remblai et une présentation de l'outil numérique GEOSTUDIO.
- Dans Le troisième chapitre Nous présentons les résultats obtenus grâce à cette étude à l'aide d'un programme GEOSTUDIO.

Enfin, ce travail se termine par une conclusion générale et des recommandations pour les futures recherches. Le mémoire comprend également des bibliographies qui se rapportent aux différents sujets traités dans ce travail.

# Chapitre I

---

## Généralités sur les barrages

# CHAPITRE I

## Généralités sur les barrages en terre

### I.1 introduction :

Les barrages en terre peuvent être constitués par des matériaux terreux 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. Ainsi les matériaux de construction peuvent avoir une granulométrie étendue avec une gamme de grains allant du très fins au grossier.

L'utilisation de matériaux locaux généralement bon marché surtout grâce à une mécanisation presque totale des travaux, au fil du temps impose le type de barrage en terre comme la solution idéale.

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 [2]

### I.2 définition :

Le terme "Terre" doit être, pour les ingénieurs, pris dans le sens le plus large du mot et sert à désigner toute sorte de matériaux terreux comprenant non seulement les différents sols définis par le pédologue, mais aussi l'ensemble des matériaux provenant de la désagrégation ou de la décomposition des roches.

Les barrages en terre sont des murs de retenue d'eaux suffisamment étanches construits avec la terre et les matériaux du site suivant des mélanges et des proportions bien définies. Un barrage est dit en terre lorsque le matériau principal de construction est de la terre (sable, sable argileux, argile sableuse,.....etc.).

On en trouve trois types :

- Le barrage homogène,
- Le barrage à noyau étanche,
- Le barrage à masque d'étanchéité,[2]

### I.3. Généralités sur les milieux poreux :

L'infiltration des eaux à travers le corps ou la fondation d'un barrage en terre est un problème qui peut présenter des risques importants sur la stabilité de la digue et l'ouvrage, et par conséquent la sécurité publique. Ce phénomène est évolutif dans le temps et nécessite un suivi et éventuellement un traitement pour assurer la protection de l'ouvrage. [8]

#### I.3.2-Définition du milieu poreux :

Un milieu poreux représente une structure bien définie d'un matériau avec des vides entre les particules, ce dernier peut être occupé par un fluide : air, eau ou de fluide.

#### I.3.3-Les paramètres physiques :

##### a. Le volume :

Il est occupé essentiellement par une matière solide et du vide rempli par un ou plusieurs fluides: air, eau, fluide

$V_a$  : Le volume de l'air

$V_w$  : Le volume de l'eau

$V_s$  : Le volume des grains solide

$V$  : Le volume total

$V_v$  : Le volume du vide

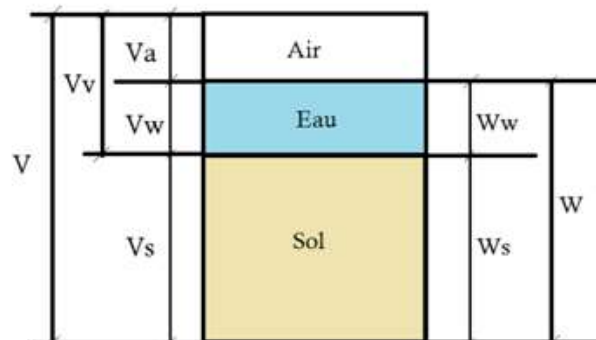


Fig.I.1 : Une portion du sol.[9]

**b. Les poids :**

Ce sont les poids de chaque phase comme montré dans la figure.

$W_w$  : Le poids de l'eau,

$W_s$  : Le poids de la colonne du sol

$W$  : Le poids total

**c. Les poids volumiques du milieu poreux :**

Nous avons plusieurs poids volumiques définis sont comme suit :

**i. Le poids volumique apparent :**

C'est le poids total par unité de volume. Qui peut être considéré dans deux cas

- Le poids volumique humide : C'est le poids de l'eau dans une portion d'un sol.

$$\gamma = \frac{W_w + W_s}{V_a + V_w + V_s}$$

- Le poids volumique sec : Il représente le poids du sec.

$$\gamma = \frac{W_s}{V_a + V_w + V_s}$$

**ii. Le poids volumique absolu des grains solides :**

C'est le poids volumique réel des grains solide.

$$\gamma = \frac{\text{Le poids des grains solide}}{\text{Le volume des grains solide}} = \frac{W_s}{V_s}$$

**d. La teneur en eau :**

Elle représente le rapport du poids de l'eau sur le poids des grains solide.

$$\omega = \frac{\text{Le poids de l'eau}}{\text{Le poids des grains solides}} = \frac{W_w}{W_s}$$

**e. La porosité**

C'est le rapport du volume de vide sur le volume total

$$n = \frac{\text{Le volume de vide}}{\text{Le volume totale}} = \frac{V_v}{V}$$

**f. L'indice de vide :**

Il représente le rapport du volume de vide sur le volume des grains solides.

$$e = \frac{\text{Le volume de vide}}{\text{le volume des grains solide}} = \frac{V_v}{V_s}$$

**g. Le degré de saturation**

C'est un gradient qui représente le rapport du volume de l'eau sur le volume de vide.

$$S_r = \frac{\text{Le volume de l'eau}}{\text{Le volume de vide}} = \frac{V_w}{V_v}$$

- $S_r=1$  : Un sol saturé
- $S_r=0$  : Un sol sec
- $0 < S_r < 1$  : Un sol partiellement saturé

**h. Perméabilité :**

C'est un paramètre structural essentiel dans le modelé d'écoulement, il varie en fonction des caractéristiques physiques du milieu et celles du fluide. Lorsqu'il s'agit d'un milieu saturé le coefficient de perméabilité s'exprime souvent par cette relation

$$k = \frac{\rho g}{32\mu} d^2$$

Ou :

$\rho$  : Masse volumique [ $\text{kg/m}^3$ ].

$g$  : Accélération de pesanteur [ $\text{m/s}^2$ ].

$d$  : Diamètre des grains [m].

$\nu$ : Coefficient de viscosité cinématique du fluide [ $\text{m}^2/\text{s}$ ].9]

**i. Loi de Darcy :**

L'écoulement de l'eau a travers un milieu poreux est régi par la loi de Darcy établie expérimentalement en 1856. Cette loi est une loi empirique a été établie sous un certain nombre des conditions expérimentales d'écoulement particulières qui limitent le domaine de sa validité. Les principales hypothèses sur lesquelles est basée la loi de Darcy sont : la matrice solide est homogène, isotrope, stable et non déformable ; le fluide est homogène, isotherme et incompressible ; l'énergie cinétique est négligeable ; le régime d'écoulement est permanent et laminaire. Dans ce cas, si on considère un tube cylindrique de section  $S$  rempli d'un matériau poreux (sable) sur une longueur  $L$  dans lequel on fait circuler de l'eau sur une hauteur totale  $\Delta H$  (dispositif a niveau constant).

Lorsque le milieu est saturé en eau, on a :

$$Q = K \frac{H_a - H_b}{L} S = k \cdot i \cdot s$$

Ou,

Q : débit d'écoulement, mesure à la sortie [m<sup>3</sup>/s].

k : constante, connue sous le nom de coefficient de perméabilité de Darcy [m/s].

HA: hauteur séparant le niveau de référence, et le niveau de l'eau à l'entrée de la colonne de la couche filtrante [m].

HB : hauteur séparant le niveau de référence, du niveau de l'eau à la sortie de la colonne de la couche filtrante [m].

L : longueur de l'échantillon [m].

i : gradient hydraulique = (Ha-Hb)/l.

S : section de l'échantillon normale à la direction de l'écoulement [m<sup>2</sup>].[10]

## I. 4. Drains et filtres du barrage en terre

### I. 4. 1. Rôle des drains et filtres

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

❖ **Drain** : est un organe qui évacue les eaux provenant d'une infiltration à travers un massif ou d'un ressuyage.

❖ **Filtre** : est un organe destiné à bloquer la migration des particules fines éventuellement entraînées par la circulation de l'eau dans un massif.

La capacité des drains doit être suffisante pour leur permettre d'absorber les débits

provenant non seulement de la percolation normale à travers le noyau et la fondation, mais aussi

les fuites accidentelles pouvant provenir d'une fissuration du noyau (créée par fracturation

hydraulique ou tassement différentiel), ou d'un collage imparfait entre le noyau et sa fondation

ou tout autre organe.

Il faut protéger les drains par des filtres, pour empêcher le sol de se déplacer : si on plaçait

Les drains directement au contact des matériaux à granulométrie fine comme un barrage en terre Avec noyau (ou certaines fondations), l'eau en écoulement entraînerait les particules fines à Travers les vides inter-granulaires du drain et l'on obtiendra ! It une érosion interne nommée Renard. [4]

#### I. 4. 2. Constitution des drains et filtres :

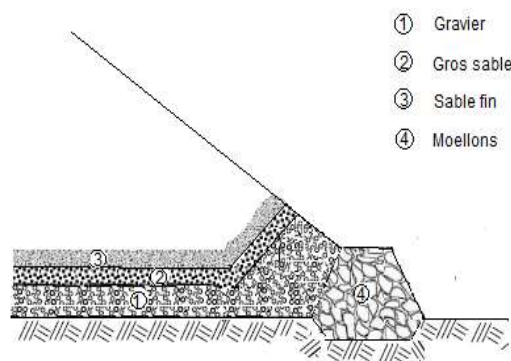
- Les drains sont constitués, soit de graviers perméables, soit d'éléments de tuyaux en Béton poreux ou en plastique perforé également entourés d'une couche de gravier.
- Les filtres sont constitués des couches successives des matériaux perméables, de Granulométries de plus en plus fines assurant la transition entre le drain et les éléments fins des Terres drainées. Dans un filtre, chaque couche doit jouer le rôle de filtre vis-à-vis de la Précédente dans le sens de l'écoulement de l'eau [4]

#### I.5. différents types de drain :

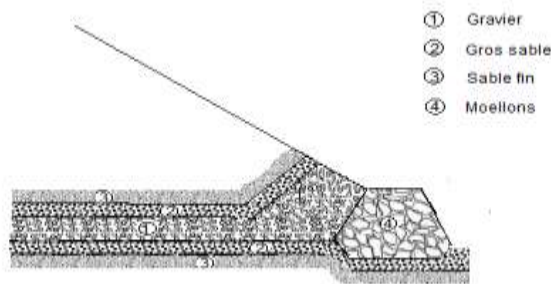
On rencontre plusieurs types de drainages qui différent les uns des autres par leur formes constructives, leur emplacement dans le barrage et le rôle pour lequel ils ont été prévus. [4]

##### a) Drains tapis :

Le tapis drainant aval couvre la moitié aval de la fondation à partir de la base du noyau et conduit les fuites jusqu'au pied aval, son épaisseur minimale est de 50 cm. Lorsque la fondation n'est pas complètement imperméable le drain doit intercepter également les infiltrations à travers la fondation, il doit être protégé contre l'entraînement des éléments fin de la fondation par un filtre inversé. [5]



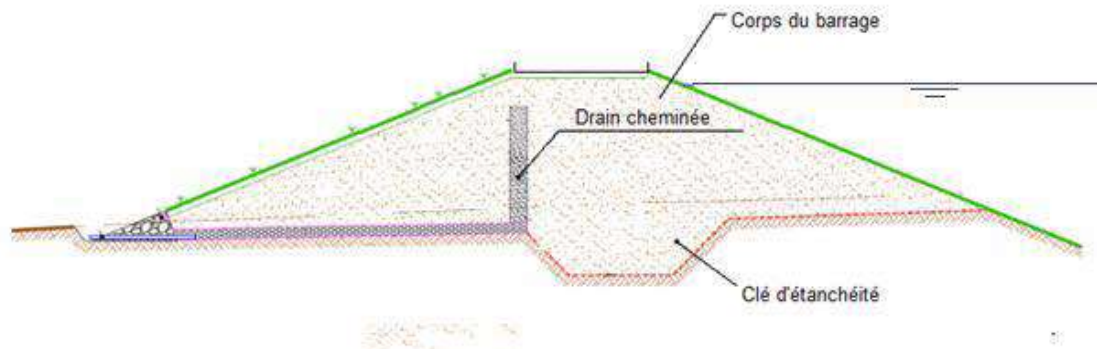
**Fig.I.2: Disposition du drain (fondation imperméable)**



**Fig.I.3: Disposition du drain (fondation perméable) [5]**

### **b) Drain cheminé (vertical):**

Il est disposé quasi verticalement à l'aval du noyau (ou bien vers le centre d'un remblai homogène) ; son épaisseur est souvent de l'ordre de 3 m pour des raisons constructives. Il est mis en œuvre par déversement du matériau dans une tranchée de 1.5 à 2 m de profondeur recreusé dans le massif compacté au fur et à mesure de l'avancement des travaux de réalisation.



**Fig.I.4: Drain vertical [6]**

### **c) Drain de surface :**

Ce type de drainage, est employé dans la construction de petites retenues collinaires. Il présente l'avantage de ne pas exiger de grandes quantités d'enrochement pour sa construction et d'être facilement réparable en cas d'avaries. Il présente l'inconvénient de ne pas influencer la ligne de saturation qui peut déboucher sur le talus aval du barrage

#### **Légende:**

**m** : Pente du talus aval du barrage.

**H<sub>2</sub>** : Hauteur d'eau à l'aval du barrage.

**H<sub>dr</sub>** : Hauteur du drain de surface.

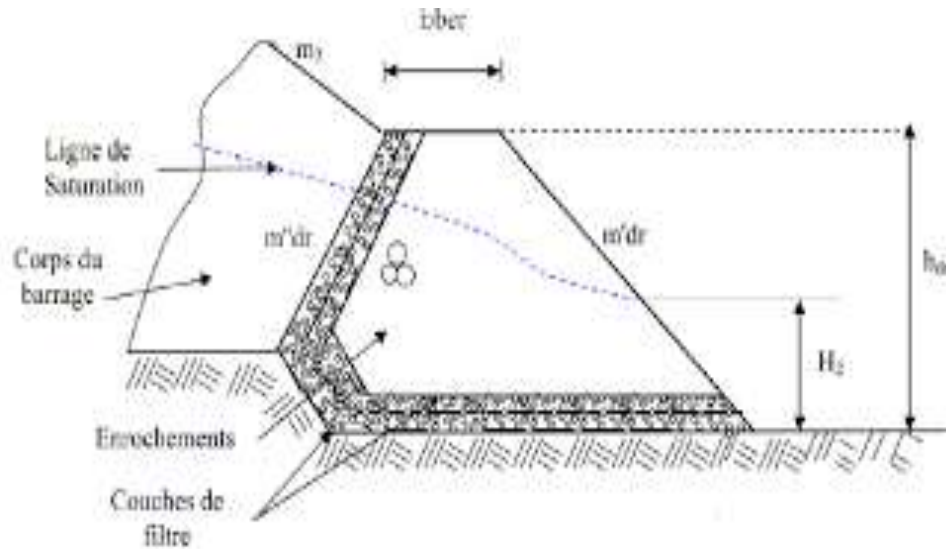


Fig.I.5 : Drainage de surface. [7]

#### d) Drainage a bande :

C'est une variante du drain tapis interne mais la bande drainante n'est pas continue sur sa partie aval. Celle-ci est remplacée par des bandes discontinues.

Ce type de drainage est prévu quand la quantité des enrochements et graviers n'est pas suffisante et que la fondation est imperméable. La bande drainante peut être remplacée par des drains tuyaux.[7]

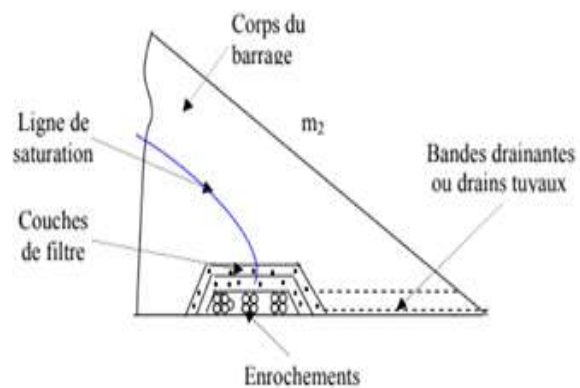


Fig.I.6 : Drainage à Bande

## **I.6 Les barrages en terre en Algérie :**

Selon le ministère des Ressources en eau : l'Algérie compte 70 barrages en exploitation, 14 sont en cours de réalisation et 50 autres barrages à l'étude. Ces derniers devraient être réalisés avant 2020.

### **I.6.1 barrage de AIN ZADA :**

Le barrage de Ain Zada est situé dans la Wilaya de Sétif au nord de l'Algérie, à 23 Km de l'ouest de la ville de Sétif et à 37 Km au nord-est de la ville voisine de Bordj-Bou-Argeridj.

Ce barrage est destiné à l'alimentation en eau potable des villes voisines: Bordj Bou Argeridj, Bougaa, El Eulma et Sétif.[3]



**Photo.I.7 : barrage de AIN ZADA**

## I.6.2 Barrage de AIN DALIA :

Le barrage de Ain Dalia est situé sur le territoire de la Wilaya de Souk Ahras, sur l'Oued Medjerda.

Ce barrage est destiné à l'alimentation en eau potable et industrielle de la région de Souk-Ahras, et au transfert vers l'Ouenza et El Aouinet.

- **Le barrage en chiffre:**

Année de construction : 1984

Année de mise en eau : 1988

Capacité : 82,0 hm<sup>3</sup>

Capacité dernier levé (2004) : 76,08 hm<sup>3</sup>

Apport moyen annuel : 50,00 hm<sup>3</sup>

Envasement annuel : 0,75 hm<sup>3</sup>/an

Surface du bassin versant : 193 km<sup>2</sup>

Hauteur : 62 m

Longueur : 300,0 m

Côte retenue normale (R.N) : 710,00 m

Côte plus hautes eaux (P.H.E) : 712,00 m

Déversoir à seuil libre : 365 m<sup>3</sup>/s



**Photo.I.8 :barrage de AIN DALIA**

### I.6.3 Barrage De guenitra :

Le barrage Guenitra est situé à 50 km au sud-ouest de la ville de Skikda, proche de la localité d'Oum Toub. Le barrage a un double objectif ; assurer l'alimentation en eau potable et en eau industrielle de la ville de Skikda et l'irrigation des périmètres agricoles dans la vallée de Saf-saf et dans la plaine de Medjez Edchich.

- **Le barrage en chiffre:**

Année de construction : 1978

Année de Mise en eau : 1984

Capacité : 125,00 hm<sup>3</sup>

Capacité dernier levé (2004) : 117,82 hm<sup>3</sup>

Apport moyen annuel : 55,00 hm<sup>3</sup>

Envasement annuel : 0,13 hm<sup>3</sup>/an

Surface du bassin versant : 202 km<sup>2</sup>

Hauteur : 69,00 m

Longueur : 151,50 m

Côte retenue normale (R.N) : 139,00 m

Côte plus hautes eaux (P.H.E) : 141,50 m

Déversoir à seuil libre : 757,00 m<sup>3</sup>/s

Vidange de fond : 211,00 m<sup>3</sup>/s



**Photo.I.9 :barrage guenitra**

### **I.6.4 Barrage De hammam debagh :**

Le barrage de Hammam Debagh sur l'oued Bou Hamdane est situé dans la Wilaya de Guelma, à 20 kilomètres à l'ouest de la ville de Guelma, dans l'est algérien.

Le but de l'aménagement est essentiellement la régularisation des apports en vue de satisfaire les besoins pour l'irrigation du périmètre de Guelma-Bouhegouf d'une superficie de 13 000 Ha

#### **Le barrage en chiffre:**

Année de construction : 2005

Année de mise en eau : 2010

Capacité : 200,00hm<sup>3</sup>

Capacité dernier levé (2004) : 65,20 hm<sup>3</sup>

Apport moyen annuel : 69,00hm<sup>3</sup>/an

Envasement annuel : 0,53 hm<sup>3</sup>/an

Surface du bassin versant : 1070,00 km<sup>2</sup>

Hauteur : 95,00 m

Longueur : 430,00m

Côte retenue normale (R.N) : 360,00m

Côte plus hautes eaux (P.H.E) : 370,24m

Déversoir à seuil libre : 2 240 m<sup>3</sup>/s

Vidange de fond : 218,00m<sup>3</sup>/s



**Photo.I.10 : barrage hammam debagh**

### I.6.5 Barrage De Mexa :

Le barrage de Mexa est situé à 75 kilomètres de la ville d'El-Taref.

L'objectif de ce projet est : l'alimentation des villes d'Annaba, El-Taref et El Kalaa en Eau Potable.

- **Le barrage en chiffre:**

Année de construction : 1994

Année de mise en eau : 1998

Capacité : 47,00 hm<sup>3</sup>

Capacité dernier levé (2004) : 30,27 hm<sup>3</sup>

Apport moyen annuel : 103 hm<sup>3</sup>/an

Envasement annuel : 0,11 hm<sup>3</sup>/an

Surface du bassin versant : 650,00 km<sup>2</sup>

Hauteur : 40,00 m

Longueur : 402,00 m

Côte retenue normale (R.N) : 52,00 m

Côte plus hautes eaux (P.H.E) : 58,33 m

Déversoir à seuil libre : 1800,00 m<sup>3</sup>/s



**Photo.I.11 : barrage Mexa**

### **I.6.6 Barrage De El agrem:**

Le barrage d'EL Agrem est situé sur l'oued El Agrem à environ 15 km au sud-est de la ville de Jijel (Wilaya de Jijel).

Il est destiné à l'alimentation en eau potable et industrielle de la ville de Jijel (Wilaya de Jijel) et l'irrigation d'environ 6 500 Ha de périmètres agricoles situés à l'aval.

- **Le barrage en chiffre:**

Année de construction : 1986

Année de mise en eau : 2002

Capacité : 33,90 hm<sup>3</sup>

Capacité dernier levé (2004) : 33,04 hm<sup>3</sup>

Pluviométrie inter annuelle moyenne : 1 225 mm

Apport moyen annuel : 23,00 hm<sup>3</sup>

Envasement annuel : 0,10 hm<sup>3</sup>/an

Surface du bassin versant : 39,50 km<sup>2</sup>

Crue de projet estimé : T = 1000 ans : 450m<sup>3</sup>/s

Crue des travaux : T = 20 ans : 250 m<sup>3</sup>/s

Hauteur : 64 m

Longueur : 395,00 m

Côte retenue Normale (R.N) : 139,00 mNGA

Côte plus hautes eaux (P.H.E) : 141,50 mNGA

Déversoir à seuil libre : 142,0 m<sup>3</sup>/s



**Photo. I.12 :barrage ELagrem**

### **I.6.7 Barrage De Koudiat Medouar :**

Le barrage de Koudiat Medouar est situé sur l'oued Réboua à 35 kilomètres du chef-lieu de Batna. Il fait partie du système du complexe de Béni-Haroun.

Ce barrage est destiné à l'alimentation en eau potable de Batna, Aris, Khenchela, Barika, alimentation en eau industrielle de Batna et l'irrigation de la plaine de Chemora, Batna et Taoufana.

- **Le barrage en chiffre:**

Année de construction : 1993

Année de Mise en eau : 2001

Capacité : 69,0 hm<sup>3</sup>

Capacité dernier levé (2004) : 74,32 hm<sup>3</sup>

Apport moyen annuel : 30,0 hm<sup>3</sup>

Envasement annuel : 0,023 hm<sup>3</sup>/an

Surface du bassin versant : 590 km<sup>2</sup>

Hauteur : 48 m

Longueur : 1280,0 m

Côte retenue normale (R.N) : 992,50 m

Côte plus hautes eaux (P.H.E) : 996,65 m

Déversoir à seuil libre : 867 m<sup>3</sup>/s

Vidange de fond : 2 x 102 m<sup>3</sup>/s



**Photo .I.13 :barrage Koudait Medoura**

### **I.6.8 Barrage De Taksebt :**

Le barrage Taksebt est situé dans la Wilaya de Tizi-Ouzou, sur l'Oued Aissi. Il est destiné à l'alimentation en eau potable (AEP) et industrielle du couloir Tizi-Ouzou -Alger.

La retenue a une capacité utile de 175 hm<sup>3</sup>, permettant la régularisation annuelle de 180 hm<sup>3</sup>.



**Photo .I.14 : barrage Taksebt**

### I.6.9 Barrage De Cheffia :

Le barrage de Cheffia est situé à 50 kilomètres au Sud-Est de la ville d'Annaba

Le barrage est destiné à:

- Alimentation en Eau Potable des villes d'Annaba et Bouhadjar
- Alimentation en Eau Industrielle du complexe sidérurgique d'El-Hadjar
- Irrigation du périmètre de Bou Namoussa (16500 ha)
- Ecrêteur de crue contre la plaine d'El Tarf et d'Annaba.

- **Le barrage en chiffre:**

Capacité initiale : 171,96 hm<sup>3</sup>

Capacité dernier levé (2004) : 158,83 hm<sup>3</sup>

Apport moyen annuel : 140 hm<sup>3</sup>/an

Envasement : 0,17 hm<sup>3</sup>/an

Surface du bassin versant : 575 km<sup>2</sup>

Hauteur : 59 m

Longueur : 650 m

Côte de retenue normale (R.N) : 165,00 m

Côte plus hautes eaux (P.H.E) : 167,00 m

Déversoirs :

Puits vanne circulaire : 1 800 m<sup>3</sup>/s

Seuil libre : 1 200 m<sup>3</sup>/s

Vidange de fond : 225 m<sup>3</sup>/s



**Photo .I.15 :barrage Chiffre**

### **I.6.10 Barrage De Babar :**

Le barrage Babar est situé dans la wilaya de Khenchla à 30 Km de la dite ville et à 9 km au sud-ouest de la ville de Babar.

Ce barrage est destiné à la régularisation des apports de l'oued El Arab en vue d'irriguer les terres environnantes.

- **Le barrage en chiffre:**

Année de construction : 1989

Année de mise en eau : 1995

Capacité initiale : 41,00 hm<sup>3</sup>

Capacité dernier levé (2004) : 38,010 hm<sup>3</sup>

Apport moyen annuel : 19,50 hm<sup>3</sup>

Envasement annuel : 0,68 hm<sup>3</sup>/an

Surface du bassin versant : 567 km<sup>2</sup>

Hauteur : 37 m

Longueur : 673,00 m

Côte retenue Normale (R.N) : 940,00 m

Côte plus hautes eaux (P.H.E) : 942,50 m

Déversoir à seuil libre : 1310 m<sup>3</sup>/s

Vidange de fond : 59,0 m<sup>3</sup>/s



**Photo .I.16 : barrage Babar**

### **I.6.11 Barrage De Fontaine des Gazelles :**

L'aménagement hydraulique de Fontaines des Gazelles est situé dans la Wilaya de Biskra à 35 km au nord-est de ladite ville.

Ce barrage est destiné à l'irrigation de la Palmerais de Loutaya.

- **Le barrage en chiffre:**

Année de construction : 1986

Année de mise en eau : 2000

Capacité : 55,50 hm<sup>3</sup>

Capacité dernier levé (2004) : 54,74 hm<sup>3</sup>

Apport moyen annuel : 20,6 hm<sup>3</sup>

Envasement annuel : 0,30 hm<sup>3</sup>/an

Surface du bassin versant : 1660 km<sup>2</sup>

Hauteur : 52 m

Longueur : 370,0 m

Côte retenue normale (R.N) : 384,00 m

Côte plus hautes eaux (P.H.E) : 388,00 m

Déversoir à seuil libre : 3000 m<sup>3</sup>/s



**Photo .I.17 : barrage Fontaine gazelles**

### **I.6.12 Barrage de Zit el Emba :**

Le barrage de Zit Emba est situé sur l'Oued Hamman dans la partie nord-est de l'Algérie à 2 km de la localité de Bekkouche-Lakhdar dans la Wilaya de Skikda.

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

- **Le barrage en chiffre:**

Année de construction : 1989

Année de mise en eau : 2002

Capacité : 117,39 hm<sup>3</sup>

Capacité dernier levé (2004) : 116,59 hm<sup>3</sup>

Apport moyen annuel : 50,00 hm<sup>3</sup>/an

Envasement annuel : 0,24 hm<sup>3</sup>/an

Surface du bassin versant : 485,00 km<sup>2</sup>

Hauteur : 55,00 m

Longueur : 688,00 m

Côte retenue normale (R.N) : 86,00 m

Côte plus hautes eaux (P.H.E) : 91,00 m

Déversoir à seuil libre : 1094,00 m<sup>3</sup>/s



**Photo .I.18 : barrage Zit El Emba**

### I.6.13 Barrage De Beni-Zid :

L'aménagement hydraulique de Beni Zid se trouve dans la Wilaya de Skikda, dans la région Nord-est de l'Algérie, à 20 km de la ville de Collo.

L'objectif de ce barrage est de satisfaire les besoins en eau potable de la population de Collo et à irriguer les terres de la plaine de Beni Zid et Guebli.

- **Le barrage en chiffre:**

Année de construction : 1988

Année de mise en eau : 2000

Capacité : 40,00 hm<sup>3</sup>

Capacité dernier levé (2004) : 39,39 hm<sup>3</sup>

Apport moyen annuel : 28,50 hm<sup>3</sup>/an

Envasement annuel : 0,52 hm<sup>3</sup>/an

Surface du bassin versant : 58,60 km<sup>2</sup>

Hauteur : 52,60 m

Longueur : 149,00 m

Côte retenue normale (R.N) : 66,00 m

Côte plus hautes eaux (P.H.E) : 71,60 m



**Photo .I.19 : barrage Bin-Zid**

### I.6.14 Barrage De Oued Cherf :

Le barrage d'Oued Cherf est situé sur le territoire de la Wilaya de Oum-El-Baouaghi, sur l'Oued Charef (Bassin de Seybouse), à 20 km de Sedrata et à 15 km du confluent de l'Oued Charef avec l'Oued Nil. Il est destiné à l'irrigation de terrains agricoles dans la plaine Ksar Sbahi (Souk Ahras - Oum el Bouaghi).

- **Le barrage en chiffre:**

Année de construction : 1988

Année de mise en eau : 1995

Capacité : 157 hm<sup>3</sup>

Capacité dernier levé (2004) : 152,65 hm<sup>3</sup>

Apport moyen annuel : 32,98 hm<sup>3</sup>

Envasement annuel : hm<sup>3</sup>/an

Surface du bassin versant : 1710 km<sup>2</sup>

Hauteur : 60 m

Longueur : 297 m

Côte retenue normale (R.N) : 745,00 m

Côte plus hautes eaux (P.H.E) : 750,00 m

Déversoir à seuil libre : 2 200 m<sup>3</sup>/s



**Photo .I.20 :barrage Oued Cherf**

### **I.6.15 Barrage De Bougous :**

Le barrage Bougous est situé sur l'oued Bougous dans la wilaya d'El Tarf, à 20 km à l'est du Chef-lieu, en bordure de la frontière avec la Tunisie.

La réserve d'eau est destinée aux besoins en eau potable et industrielle de la wilaya et à la compensation partielle du volume d'eau suite au réaménagement du barrage de Mexenna situé à l'aval.

- **Le barrage en chiffre:**

Année de construction : 2005

Année de mise en eau : 2010

Capacité : 65hm<sup>3</sup>

Capacité dernier levé : 65,00 hm<sup>3</sup>

Surface du bassin versant : 236,00 km<sup>2</sup>

Hauteur : 71,00 m

Longueur : 635,61 m



**Photo .I.21 : barrage Bougous**

### **I.6.16 Barrage De Boukourdane :**

Le barrage Boukourdane est situé dans la Wilaya de Tipaza, sur l'Oued El Hachem. L'ouvrage a une capacité utile de 97 hm<sup>3</sup> et permet de régulariser un volume de 50 hm<sup>3</sup>. Le bassin versant de l'oued El Hachem s'étend depuis la montagne Bou-Maad au sud jusqu'à la Méditerranée au nord. La superficie du bassin versant est de 177 km<sup>2</sup>

Il est destiné à l'alimentation en eau potable (AEP) de Cherchel, Tipaza et Nador ainsi qu'à l'irrigation de la vallée de l'Oued El Hachem et des régions de Hadjout et du Sahel.



**Photo .I.22 : barrage Boukourdane**

### **I.6.17 Barrage De Keddara :**

Le barrage de Keddara est situé dans la Wilaya de Boumerdes, à 8 km<sup>2</sup> au sud de Boudouaou et à 35 km<sup>2</sup> à l'est d'Alger. Il fait partie de l'aménagement Isser-Keddara destiné à satisfaire les besoins en eau potable des agglomérations algéroises et d'une grande partie de la ville de Boumerdes. Sa retenue est alimentée par les apports des oueds Keddara, El Haad et par la galerie de transfert provenant du barrage du Hamiz

Le barrage dispose d'une capacité de 142.39 millions de m<sup>3</sup>, il se remplit principalement du transfert par pompage des apports de Béni Amrane, de ceux du Hamiz ainsi que de ces apports propres.



**Photo .I.23 : barrage Keddara**

### **I.6.18 Barrage De Tilesdit :**

L'aménagement de TILSEDDIT est implanté sur Oued Eddous, à l'exutoire d'un bassin versant de 843km<sup>2</sup> avec un apport annuel régularisable de 83hm<sup>3</sup>. Le barrage de TILESDDIT est situé au milieu de la partie septentrionale de l'Algérie à 18 km à l'est de la ville de Bouira et à 4 km de la route nationale n° 5 reliant Alger et Constantine. Le barrage de TILESDDIT est implanté dans une région à vocation agricole, la construction du barrage a permis de mobiliser un volume de 83hm<sup>3</sup>, il permet de répondre à la double destination : l'alimentation en eau potable et industrielle (23hm<sup>3</sup>) des agglomérations de la Wilaya de Bouira et d'autre part à l'irrigation (50hm<sup>3</sup>) de la plaine de Sahel. [3]



**Photo .I.24 : barrage Tilesdit[3]**

**I.7. Conclusion :**

Dans ce chapitre on a cite les différents types de barrages en terre et on à représenter quelque barrage en terre existent en l'Algérie

Les filtres et les drains sont des organes indispensables pour le bon fonctionnement des barrages en terre mais leur efficacité est étroitement liée a leur dimensionnement et au choix de leur Emplacement.

# Chapitre **II**

---

## **Les méthodes et les outils numériques de calcul**

## CHAPITRE II

### Les méthodes et les outils numériques de calcul

#### II. 1 Introduction

Le développement des méthodes de calcul numérique sur ordinateur (méthode des différences finies et méthode des éléments finies) a permis de chercher des solutions beaucoup plus réalistes et générales, fondées sur un certain nombre de modèles rhéologiques et d'algorithmes de résolution des divers aspects du comportement des sols.[11]

#### II.2 Méthodes de résolution des infiltrations :

Ces méthodes sont employées pour déterminer les paramètres hydrauliques de l'infiltration (la construction du réseau d'écoulement, la surface de l'eau libre, débit d'infiltration, gradient hydraulique,). De nombreux chercheurs ont étudié les problèmes d'infiltration dans les milieux poreux. Il existe différentes techniques traitant de ce problème chacun d'eux est adapté à certains types de problèmes.

Les équations générales qui régissent d'infiltration constante dans les milieux poreux utilisées pour la détermination des paramètres hydrauliques de l'infiltration peuvent être décrites par l'équation de Laplace.

En principe, quatre méthodes existent pour résoudre les problèmes de débit d'infiltration :

- Méthodes graphiques.
- Méthodes numériques
- Méthodes analytiques.
- Méthodes expérimentales.
- Méthodes analogiques.
- Méthodes probabilistes.

### II.2.1. La méthode graphique :

La méthode graphique est la plus souvent utilisée puisqu'elle permet de visualiser le phénomène d'infiltration à travers le corps de la digue du barrage sous forme d'un graphique. Le principe de cette technique est basé sur le tracé du réseau hydrodynamique de l'écoulement souterrain (les lignes de courant et les lignes équipotentiels et la ligne de saturation qui peuvent nous aider par la suite pour l'analyse de la stabilité du barrage.

La méthode du tracé de la ligne de saturation a été proposée par Kozeny. Il a montré que, dans un barrage en terre homogène non drainé, la ligne de saturation peut être assimilée dans sa partie médiane à une parabole d'axe horizontal dont le foyer est situé au pied du parement aval.[12]

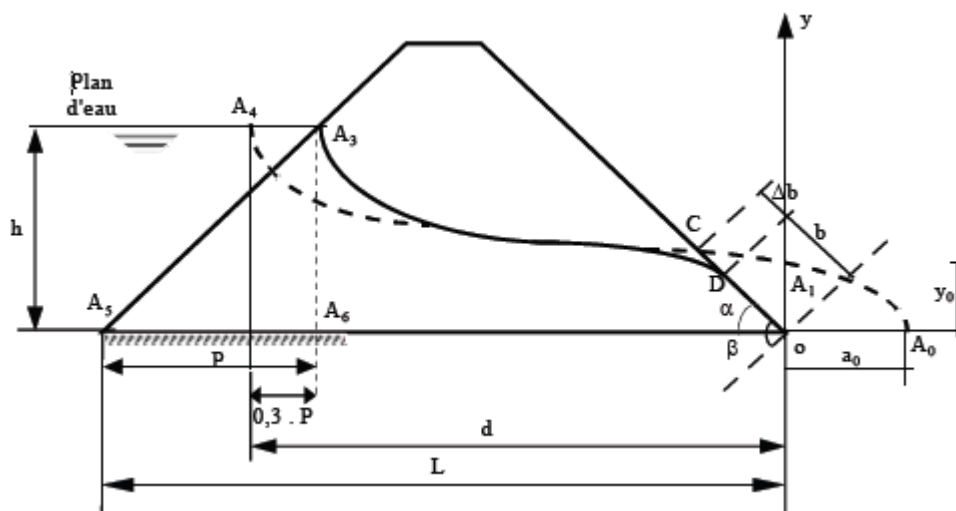


Fig.II.1 : Ligne de saturation selon Kozeny.[12]

Cette méthode est simple, mais très délicate, la qualité du résultat dépend de la patience du dessinateur. Pour améliorer la performance on peut utiliser des méthodes numériques qui permettent d'augmenter la précision d'une part et réduire le temps des calculs d'autre part.

## II.2.2. Les méthodes numériques

Dans le domaine de mécanique des fluides, la plupart des problèmes rencontrés sont traités de point de vue macroscopique par des équations différentielles. Pour certains cas, la modélisation analytique n'est plus possible que pour des problèmes simples. Il est donc nécessaire d'utiliser des méthodes numériques. Aujourd'hui ces méthodes ont connu un développement considérable lié à la croissance des performances des ordinateurs, elles sont actuellement utilisées comme des outils d'étude des écoulements dans de nombreux domaines industriels : industrie pétrolière, aéronautique, nucléaire, etc.

Les méthodes numériques permettent, en effet la résolution des grands problèmes rencontrés dans les cas pratiques dans un temps raisonnable et offrant une très grande souplesse d'emploi.

Parmi les méthodes numériques utilisées on trouve :

- Méthode des éléments finis,
- Méthode des différences finies.[12]

### a. La méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finie (MEF) a été utilisée pour la première fois en 1946 pour la résolution des équations d'équilibre en élasticité ou en élastoplasticité. Il a été démontré ensuite que cette méthode pouvait aussi être utilisée pour résoudre des problèmes physiques régis par des systèmes d'équation aux dérivées partielles comme par exemple celui de répartition de la charge ou des débits dans les écoulements en milieu poreux.

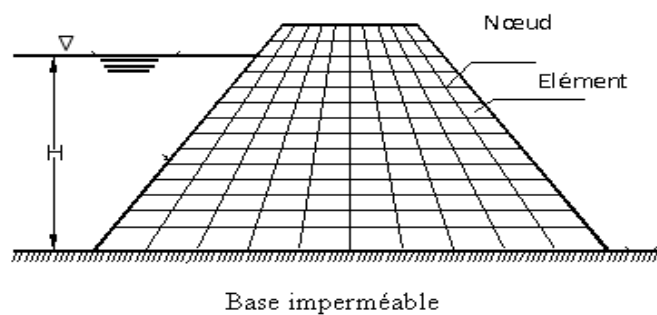
Le principe de cette méthode consiste à remplacer la structure physique à étudier par une représentation schématique de mêmes dimensions, soumise aux mêmes conditions aux limites et formée par un nombre fini d'éléments, lié entre eux par des nœuds, qui représente un maillage.

La méthode des éléments finis est une méthode d'interpolation, qui est très puissante, puisqu'elle permet de simuler le comportement d'un milieu continu soumis à des sollicitations externes connues et/ou à l'action de gravité. Elle utilise des modèles rhéologiques qui relient les contraintes aux déformations. Elle permet notamment de déterminer les efforts et les déformations dans un massif quelconque, de localiser aisément les zones soumises à de fortes contraintes, les zones soumises à des fortes déformations, et les zones en rupture et d'effectuer aussi les calculs d'écoulement.

L'approche par éléments finis comprend deux principales étapes :

- La première se fait en décomposant le domaine matériel à étudier (milieu continu) en une série de sous domaines de formes géométriques simples appelés éléments. Sur chaque élément le Comportement local est représenté par une fonction simple définie analytiquement de manière unique en fonction des coordonnées des nœuds géométriques de cet élément.
- La deuxième étape est une autre discrétisation qui consiste à transformer les équations aux dérivées partielles en équations algébriques en utilisant une approximation simple des variables inconnues.

L'étape suivante est de faire un traitement élément par élément de l'équation. La solution est obtenue sous forme d'une équation générale linéaire ou non du système global formé par l'assemblage des équations algébriques obtenues sur tous les éléments constituant le domaine géométrique.



**Fig.II.2 : Division d'un barrage en éléments finis**

### • Démarche éléments finis

Les principales étapes de construction d'un modèle éléments finis, sont les suivantes :

- Discrétisation du milieu continu en sous domaines ;
- Construction de l'approximation nodale par sous domaine
- Calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème ;
- Assemblage des matrices élémentaires ;
- Prise en compte des conditions aux limites ;
- Résolution du système d'équations.[12]

### **b. La méthode des différences finies :**

La méthode des différences finies est la technique numérique la plus ancienne qui permet la résolution numérique des équations aux dérivées partielles, elle était largement utilisée avant le développement de la méthode des éléments finis. Le principe de cette méthode Consiste à subdiviser le domaine à étudier en un nombre déterminé de nœuds, pour chaque

nœud, les dérivées sont remplacées par une fonction algébrique. La fonction recherchée est représentée par un développement limité en série de Taylor. La résolution de ce système d'équations permet d'obtenir la distribution de la fonction étudiée dans le domaine d'étude. Cette méthode convient pour les géométries simples, mais elle est très difficile à appliquer aux objets à géométrie complexe à cause de la rigidité du maillage. D'autre part, elle prend difficilement en compte des conditions aux limites du type Neumann.

### II.2.3.Méthodes analytiques :

Les méthodes analytiques permettent la résolution mathématiquement rigoureuse d'équations différentielles partielles traduisant des phénomènes physiques, ces méthodes fournissent des solutions précises et exactes, leurs principes sont généralement basés sur des hypothèses simplificatrices d'uniformité, d'homogénéité, des propriétés et des structures, présentant l'avantage par leurs simplicités d'hypothèse et d'exécution.

#### a. Théorie de Dupuit

Les hypothèses admises pour l'établissement des formules de Dupuit sont :

- La loi de Darcy est applicable, c'est-à-dire que les vitesses sont proportionnelles aux Pertes de charge (gradient hydraulique).
- Milieu homogène et isotrope, substratum horizontal l'eau et le milieu poreux sont incompressibles, régime permanent [13]

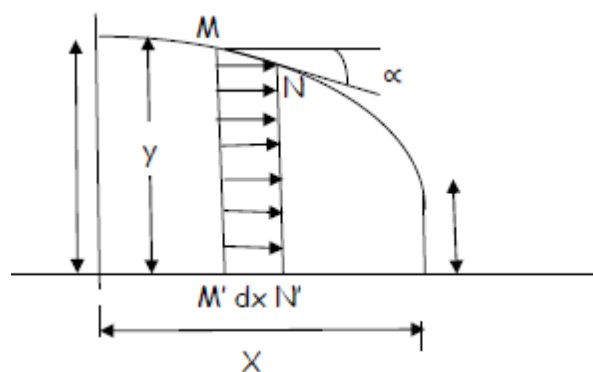


Fig.II.3 : Profil de la courbe de saturation.

Dans une section verticale de la nappe de trace MN, toutes les vitesses  $V$  sont supposées égales, Parallèles entre elles et ayant pour valeur commune  $V = K \, dx/dy$  au signe près,  $x$  et  $y$  étant les coordonnées du point  $M$  situe a la surface de la nappe dans la section transversale considérée. On admet donc que l'écoulement se produit par tranches anneaux verticaux supposes animes sur toute leur hauteur de la vitesse horizontale  $V$  si on considère le filet liquide superficiel traversant en  $M$  et  $M'$  deux tranches infiniment voisines  $MN$  et  $M'N'$ , la perte de charge unitaire entre  $M$  et  $N$  a pour expression exacte d'après Darcy si  $MN = dl$  :

$$T = dy/dl = \sin \alpha \quad (\text{au signe près})$$

L'hypothèse de Dupuit suppose que perte de charge a pour expression :

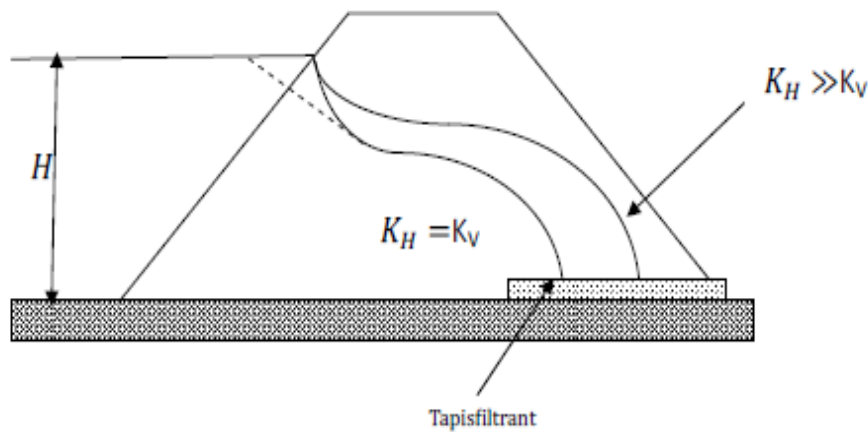
$$I = dy/dx = \tan \alpha$$

En fait cette hypothèse reste valable tant que  $X$  petit c'est-à-dire la courbure de la surface libre est suffisamment faible. Cette hypothèse est en défaut lorsque se trouve près de l'extrémité aval car la pente de la courbe atteint des valeurs assez grandes.

### **b-Méthode analytique semi-empirique de Kozeny :**

#### **- Cas anisotrope :**

En fait, le massif du barrage ne forme pas un ensemble isotrope et les perméabilités sont différentes .Ceci est du au compactage par couches successives qui entraine en générale une anisotropie du remblai. Dans ces conditions, la méthode de détermination de la ligne de saturation que nous venons d'exposer et qui supposait les matériaux parfaitement homogènes et isotropie se trouve en défaut. Il sera cependant, possible de l'appliquer en opérant une transformation au profil de l'ouvrage. Si l'on désigne par  $k_v$  et  $k_h$  les perméabilités dans les directions verticales et horizontales, cette transformation se fera en multipliant les dimensions horizontales par  $\sqrt{k_v/k_h}$  Les ordonnées de la ligne phréatique ainsi obtenues sont reportées sur la section non réduite de l'ouvrage aux points d'abscisses correspondantes.



**Fig.II.4 : Effet de l'anisotropie sur la ligne de saturation.**

### **II.2.4.Méthodes expérimentales :**

Les méthodes expérimentales sont considérées comme utiles pour simuler l'écoulement de l'eau par des modèles en laboratoire. Il y a deux types de modèles, le modèle électrique, qui analogues de l'écoulement de l'eau par un flux de modèles actuels et physiques comme modèle de bassin de perméabilité et le modèle de l'écoulement visqueux (modèle Hèle-Shaw). Ces méthodes ont des inconvénients tels que la construction complexe et l'exploitation. Dans le modèle de Hèle-Shaw, la viscosité du fluide varie avec la température, et le modèle de bassin de perméabilité souffre de la difficulté de représenter la perméabilité correcte du sol.

#### **1- Modèle de bassin de perméabilité :**

En principe, les expériences de bassin de perméabilité représentent des reproductions à petite échelle des systèmes d'écoulement à grande échelle. En substance, on construit une maquette (généralement du sable) du prototype dans un bassin équipé de l'avant perforé et permet le passage de l'eau, lorsque l'état d'équilibre des flux est atteint, un colorant est introduit à divers endroits le long de la limite amont à proximité de la paroi transparente pour former les traces des lignes de courant. Nous avons utilisé un modèle de bassin de perméabilité, afin d'évaluer la longueur du drain horizontal dans les barrages en terre homogène, repose sur une base perméable.[13]

### **II.2.5.Méthodes analogiques :**

Cette méthode physique a pour but de simuler les circulations d'eau souterraine. Elle se base sur l'analogie physique et mathématique entre l'écoulement des eaux souterraines et le courant électrique, les équations et les comportements sont très similaires, cette analogie constitue la base de deux types de modèles analogues, le premier consiste à utiliser un papier conducteur, et l'autre dépend de l'utilisation des réseaux de résistances électriques.

- **Papier conducteurs analogue :**

Cette méthode est la plus utilisée pour l'étude des problèmes d'infiltrations, elle consiste à découper une feuille de papier conducteur selon la même forme géométrique que le domaine d'écoulement souterrain et à créer une différence de potentiel entre les limites à l'aide d'une source de courant. La distribution du potentiel est mesurée avec un voltmètre. Les limites à charge constante sont créées avec une peinture argentée très conductrice, et les limites imperméables sont simulées par des bords non reliés au sein du modèle en papier conducteur.

### **II.2.6.Méthode probabiliste :**

Les méthodes probabilistes sont parmi les méthodes qui permettent l'analyse des problèmes des écoulements en milieu poreux (comme la méthode de Monte-Carlo), elles sont largement rencontrées en géotechnique, en particulier dans le domaine des barrages en remblai, notamment dans le cadre des études d'analyse des risques et de stabilité des barrages, dans ce domaine ces méthodes sont très difficiles et complexes à mettre en œuvre à cause des temps importants de calcul et le nombre limité de mesures.

L'analyse probabiliste de stabilité d'un barrage comporte en pratique deux phases, la première est un traitement statistique des données suivi par un calcul probabiliste. La deuxième phase est l'examen des résultats et les décisions. Les résultats obtenus peuvent être utilisés pour déterminer la probabilité de rupture correspondant à un facteur de sécurité particulier. Cette analyse est basée sur l'existence de plusieurs mesures sur les paramètres géotechniques qui sont prélevés à partir des essais in situ et essais de laboratoire tels que la résistance au cisaillement. Ces données sont très importantes pour la réussite de l'étude.[13]

#### **Remarque :**

La méthode que nous avons utilisée on notre exemple (simulation numérique) est basé sur « la méthode des éléments finis » (GéoStudio).

## II.3. Différent méthode de Calcul de stabilité :

### II.3.1 Notion du coefficient de sécurité :

Pour juger si un talus naturel ou artificiel est stable ou non il est nécessaire d'introduire la notion du coefficient de sécurité qui est une grandeur adimensionnelle.

Le coefficient de sécurité ( $F_s$ ) est par définition donné par l'expression suivante :

$$F_s = \frac{\Sigma \text{Forces généraux résistants}}{\Sigma \text{Forces généraux moteurs}}$$

$F_s > 1$  ; Il n'y pas une rupture.

$F_s < 1$  ; Il y a une rupture.

$F_s = 1$  ; Il y a un équilibre limite.

L'analyse de stabilité consiste alors à rechercher la surface de rupture la plus défavorable, c'est-à-dire, dont le coefficient de sécurité est le plus faible

Généralement, un coefficient de sécurité varie de 1.0 à 1.5 est souhaité suivant les cas d'étude défavorables.

### II.3.2 Méthode des tranches :

La méthode des tranches est dite méthode Suédoise. Elle a été étudiée par Peterson et développée par Fellenius, Bishop.

Son principe est basé sur la division de la masse délimitée par la géométrie et la ligne de glissement probable en tranches verticales pour lesquelles on écrit l'équation d'équilibre séparément et aboutir à la fin aux équations de la masse en totalité.

Dans la pratique des études de constructions de barrage en terre il est d'usage d'utiliser la méthode de Fellenius car elle donne une précision suffisante et acceptable et elle est facile à utiliser surtout. Avec le développement de l'outil informatique on a tendance à préférer la méthode de Bishop. [14]

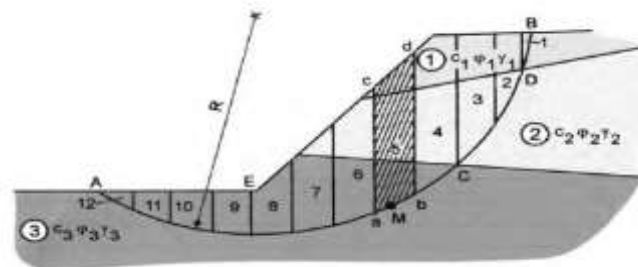
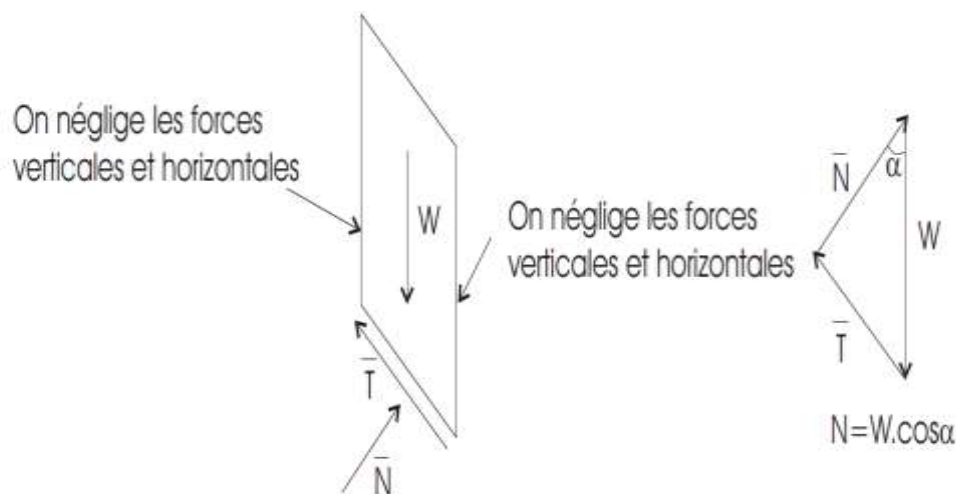


Fig.II.5 : La masse du talus découpé en tranches.

### II.3.3.Méthode de Fellenius :

On étudie la stabilité d'une portion de massif d'épaisseur unitaire de rive à rive et limitée par un cercle dont on fixe, a priori, le centre et le rayon. En réalité, on effectue le calcul pour plusieurs cercles de rupture potentielle de façon à déterminer le cercle de moindre résistance. Au début de la rupture, le mouvement peut être assimilé à une rotation autour du centre du cercle de glissement.

Le volume en mouvement est découpé en tranches verticales. Dans la méthode de Fellenius, on suppose que les forces de « contact » inter-tranches ont une résultante nulle pour chacune des tranches.[14]



**Fig.II.6 : Force appliquées sur une tranche dans la méthode de Fellenius.**

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

- le poids  $W_i$  de la tranche ;
- la composante motrice du poids soit  $T_i = W_i \sin(\alpha_i)$  où  $\alpha_i$  est l'inclinaison locale de la surface de rupture avec l'horizontale ;
- la composante normale du poids sur la surface de glissement soit  $N_i = W_i \cos(\alpha_i)$
- la résultante des forces de pressions interstitielles sur la base de la tranche. Si  $U_i$  est la pression et  $b_i$  l'épaisseur horizontale de la tranche, la résultante des forces de pression est :

$$P_i = \frac{U_i \cdot b_i}{\cos(\alpha_i)}$$

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

$$C_i = \frac{U_i \cdot b_i}{\cos(\alpha_i)}$$

- la contribution du terme de frottement à la résistance :

$$(N_i - P_i) = \tan\varphi$$

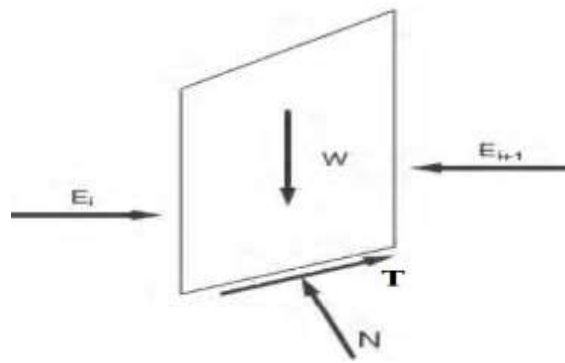
Finalement, le coefficient de sécurité pour un cercle de glissement donné vaut :

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

### II.3.4.Méthode de Bishop simplifiée :

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

$$N \cdot \cos \alpha + T \cdot \sin \alpha - W = 0$$



**Fig.II.7 : Représentation des forces sur une tranche, méthode de Bishop[15]**

Pour en établir les formules générales, nous utiliserons les notations suivantes :

W : Poids de la tranche.

u : Pression interstitielle au niveau de la surface de glissement.

F<sub>s</sub> : Coefficient de sécurité.

b : Largeur de la tranche.

C' : Cohésion effective le long de a b.

φ' : Angle de frottement interne effectif du sol le long de a b.

L'expression finale du coefficient de sécurité de la méthode de bishop simplifiée s'écrit comme suite :

$$F_s = \frac{1}{\sum W \sin \alpha} \sum_m [ \frac{C' \cdot b (W - u \cdot b) \tan \varphi'}{\cos \alpha + \sin \alpha \tan \varphi' F} ]$$

Dans ce cas tous les termes sont connus et F est calculé par itérations successives. On prend pour première valeur F<sub>0</sub>, le coefficient de sécurité obtenu par la méthode de Fellenius.[15]

## II.4.Présentation du logiciel

GeoStudio est un logiciel de modélisation développé par le groupe GEO-SLOP international pour des études géotechniques, géologiques, d'hydraulique souterraine, des sciences de la terre, de l'environnement etc. C'est un logiciel qui permet de combiner plusieurs analyses en utilisant différents modules dans un seul projet de modélisation.

Le logiciel a une capacité analytique rigoureuse, une intégration d'outils sophistiqués et une Large application à divers problèmes surtout géotechniques et géologiques. Il permet de:

- Combiner les analyses dans un seul projet intégré
- Dessiner directement la géométrie ou importer des fichiers CAO
- Résoudre plusieurs analyses simultanément
- Interpréter les résultats avec visualisation et graphiques.

A titre d'exemples, GeoStudio permet de traiter les différents problèmes du sol comme: les glissements des terrains, les tassements, la consolidation, les infiltrations des eaux dans le corps de la digue d'un barrage et d'autres problèmes liés à la géotechnique.[16]



**Fig.II.8 : Les modules du logiciel Geostudio 2012.**

### II.4.1.Principaux modules :

**SEEP/W** : calcule les infiltrations des eaux a travers le barrage (par la méthode des éléments finis).

**SIGMA/W** : analyse les problèmes de la relation contrainte –déformations (par la méthode des éléments finis).

**QUAKE/W** : définit le comportement d'un terrain sous l'effet d'un séisme (par la méthode des éléments finis).

**TEMP/W** : analyse les problèmes géotechniques du sol (par la méthode des éléments finis). Et autres logiciels.

**SLOPE/W** : calculer le coefficient de sécurité d'un talus naturel ou artificiel par les méthodes d'analyses classiques.

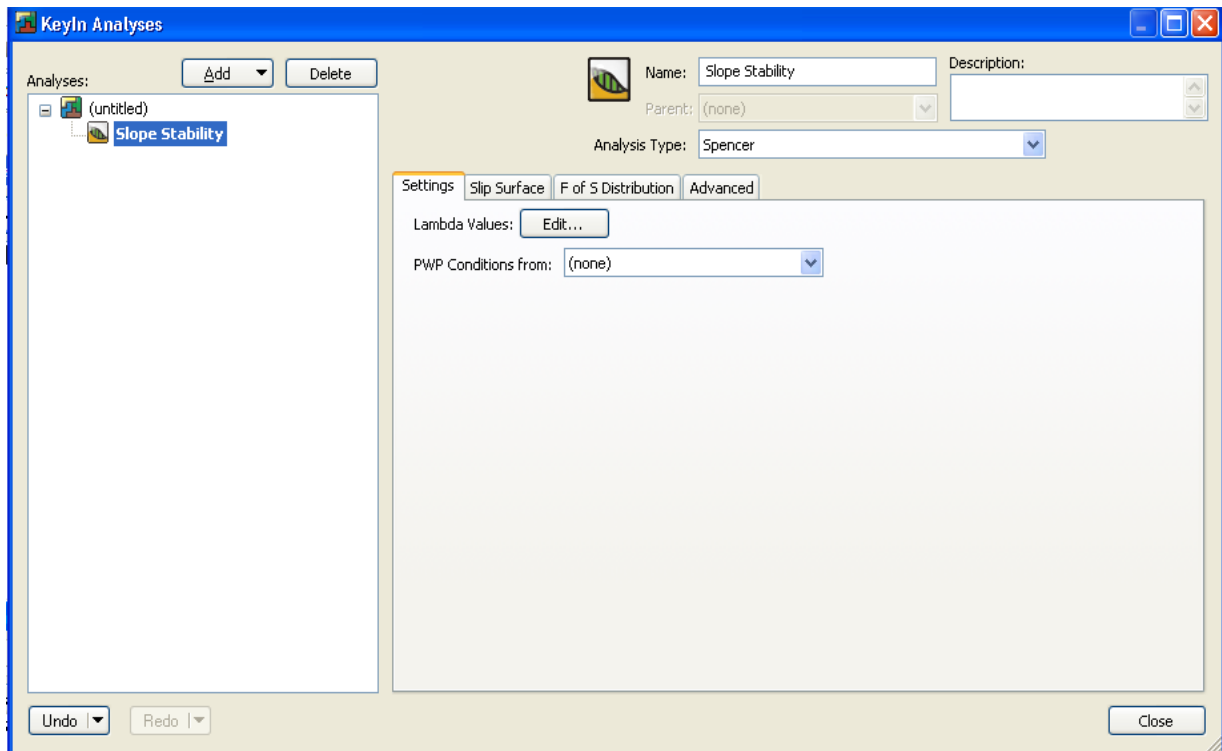
### II.4.2.Le fonctionnement du logiciel:

Le présent logiciel comme tous les autres programmes de calcul servent à fournir des résultats issus d'un nombre défini des paramètres, donc il est nécessaire de suivre les étapes suivantes pour l'achèvement de l'opération de calcul :

➤ **DEFLINE:**

Cette étape est très importante car on va définir le problème et introduire les différentes données spécifiques au problème en vigueur

Créer un espace de travail problématique et des propriétés d'analyse, créez une analyse SIGMA / W et configurez l'espace de travail du problème. Choisissez le type d'analyse, tel que la contrainte In situ, la redistribution des contraintes, la charge / déformation, la pression couplée / la pression de l'eau interstitielle, le changement de volume et la déformation dynamique.



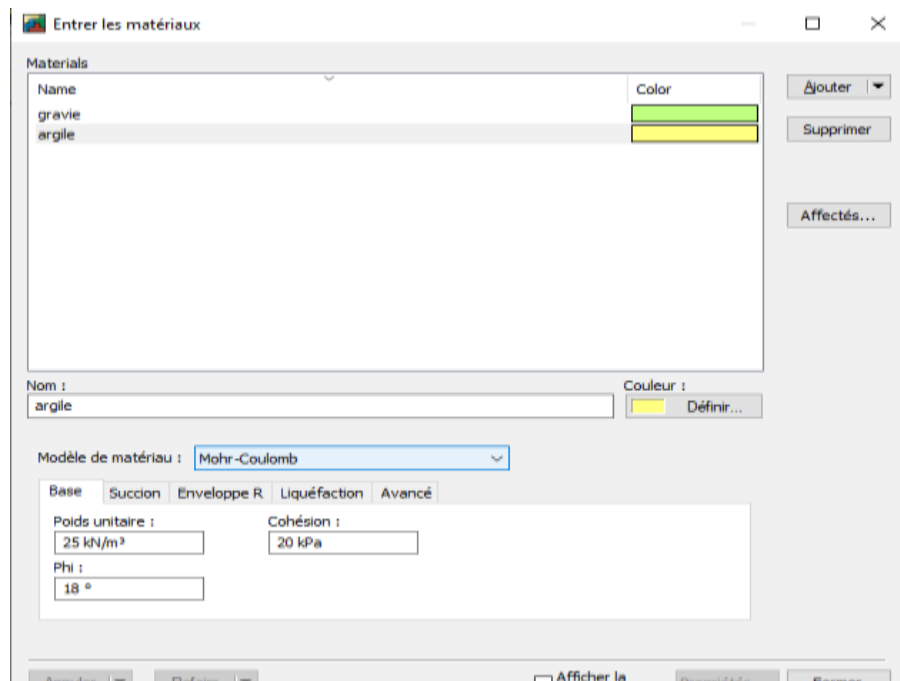
**Fig .II.9 : Fenêtre d'analyse du module SLOPE/W**

➤ **SET :**

Permet la délimitation de la surface du travail, la définition de l'échelle, la définition des réseaux, la détermination du zoom, la fixation d'axes.

➤ **KEYIN :**

Permet le dessin des régions de domaine à l'aide d'outils de dessin CAO, y compris les polygones et les régions circulaires, l'importation de coordonnées, les éléments géométriques copiés-collés, le retour de longueur et d'angle, la division et la fusion de régions.



**Fig.II.10: Introduction des propriétés des matériaux**

➤ **DRAW :**

- Le dessin du rayon et de la surface de rupture.
- Le dessin des réseaux de la surface de rupture.

➤ **Modify :**

Pour rajouter, éliminer, supprimer et modifier des objets dans le problème.

➤ **Sketch :**

- La réalisation de l'esquisse du problème
- Etiquetage du sol
- Rajout d'un titre d'identification du problème
- Eclaircir les ténèbres d'identification

➤ **SOLVE :**

C'est l'étape de résolution du problème, à l'aide des méthodes classiques et la méthode des éléments finis et à partir des données introduites, on détermine le coefficient de sécurité  $F_s$ .

Lorsque le problème est complètement défini, démarrez le processus d'analyse dans la fenêtre **Solve Manager**. Le gestionnaire de solvabilité affiche la progression de la solution, vous permettant d'annuler ou d'arrêter / redémarrer si nécessaire.

➤ **RESULTATS :**

C'est l'étape chargée de traduire et afficher les différents résultats sous une forme graphique ;

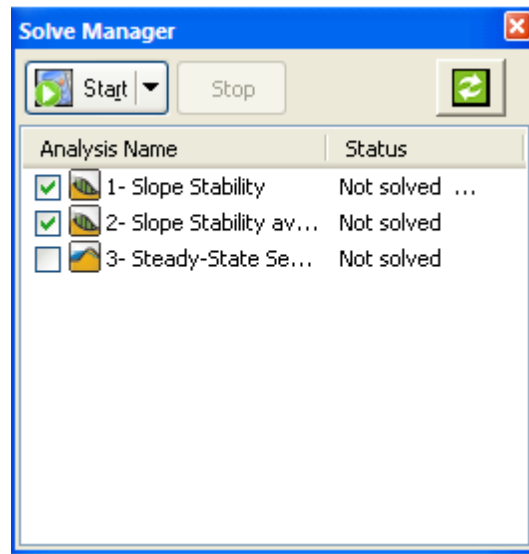


Fig.II.11 : Fenêtre du gestionnaire des solutions

### II.4.3 : Module d'analyse d'infiltration des eaux souterraines SEEP/W .



**SEEP / W** peut être utilisé pour analyser l'écoulement des eaux souterraines à travers des milieux poreux tels que le sol et la roche. Sa formulation rigoureuse saturée-insaturée, associée à un algorithme de sous-relaxation robuste, permet d'analyser les systèmes d'écoulement les plus difficiles de la nature.

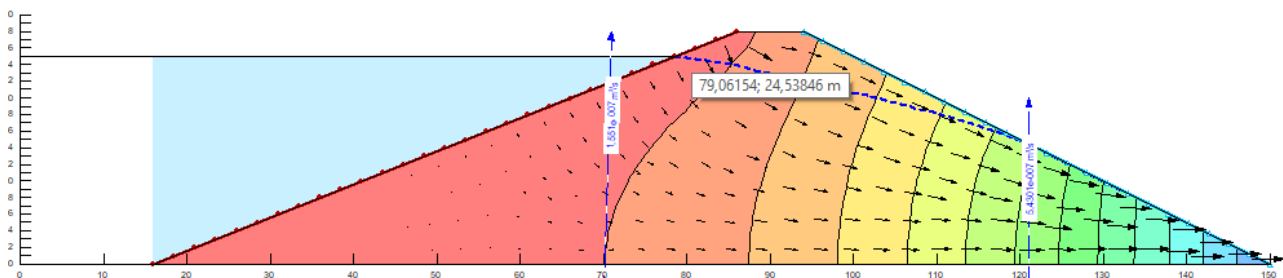
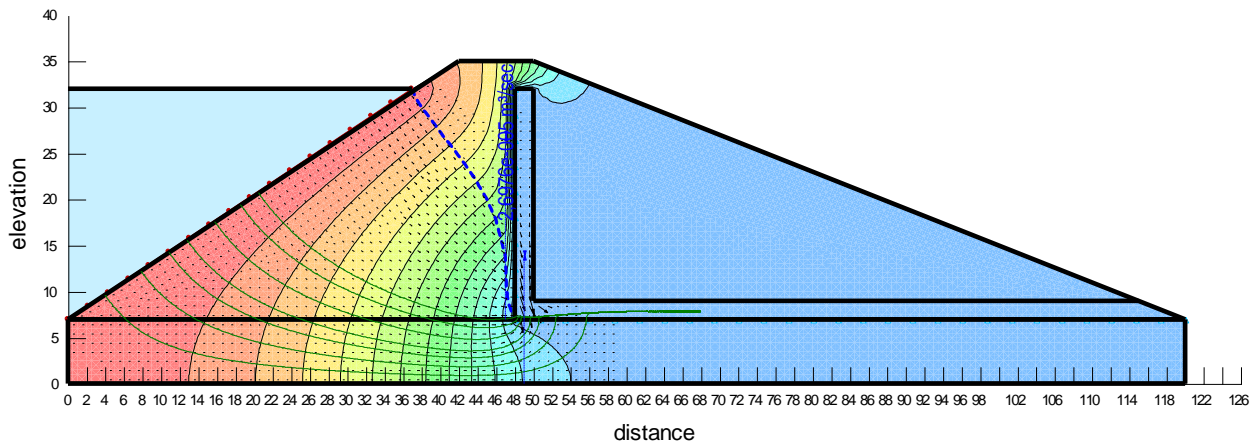


Fig.II.12 : Tracé des équipotentiels sans drain.

**SEEP / W** peut être utilisé pour modéliser les processus transitoires tels que l'infiltration dans le sol sec, la propagation du front d'humidité due aux inondations, les perturbations de la pression interstitielle due au pompage, les fuites provenant des installations de confinement, et le comportement des systèmes soumis à des changements environnementaux.

**SEEP / W** peut également être combiné avec **CTRAN / W** et **TEMP / W** pour la modélisation de systèmes de flux dépendant de la densité.



**Fig.II.13** : Distribution de la pression interstitielle après les drains.

#### II.4.4 : Module d'analyse de stabilité de pente SLOPE/W :



SLOPE / W est le logiciel leader pour l'analyse de la stabilité des pentes de terre et de roche.

SLOPE / W peut efficacement analyser les problèmes simples et complexes pour une variété de modes de défaillance, les conditions de pression de l'eau interstitielle, les propriétés du sol, les conditions de chargement et les options de renforcement.

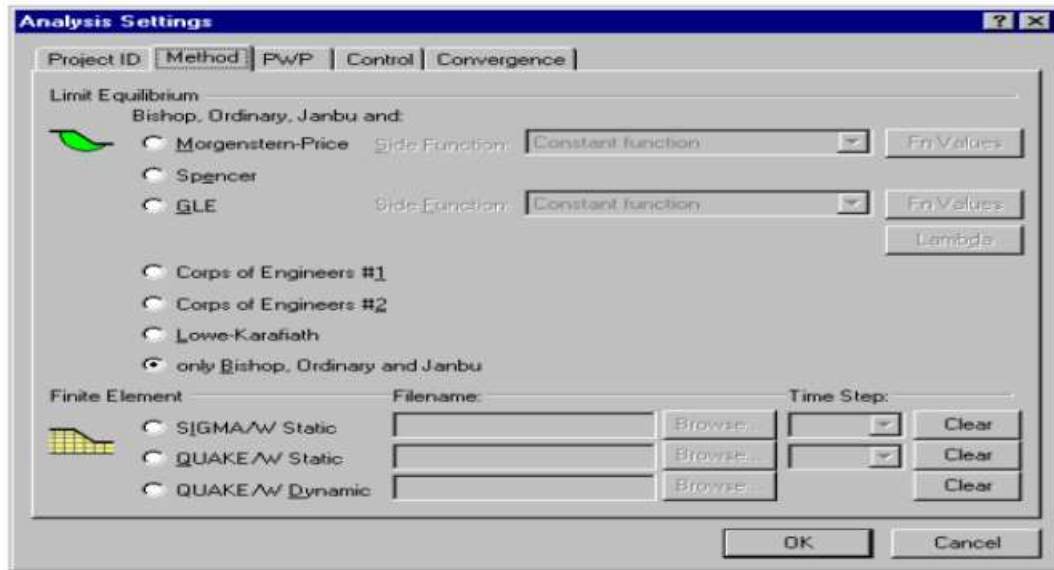


Fig.II.14 : Choix de la méthode d'analyse.

**SLOPE / W** peut prendre en charge l'analyse pseudo-statique, la conception d'états limites, l'analyse probabiliste et de sensibilité, et l'analyse de la vidange rapide. Il peut être combiné avec **SIGMA / W** pour l'analyse de stabilité basée sur le stress ou avec **QUAKE / W** pour la déformation New mark.

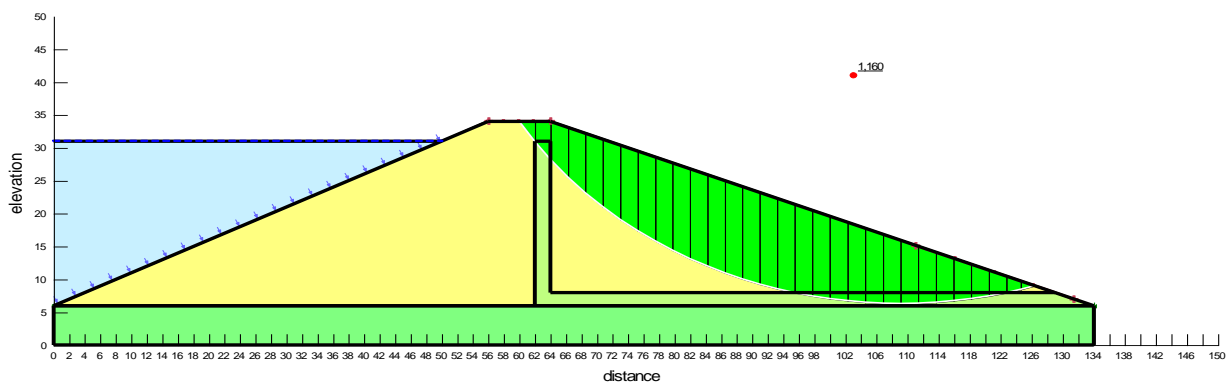


Fig.II.15 : Visualisation des résultats de calcul de la stabilité

L'intégration complète avec d'autres produits d'éléments finis **Géostudio** permet d'analyser la stabilité des pentes et des excavations dans le temps.

#### II.4.4.1. Modèle de Mohr-Coulomb :

Le modèle de Mohr-Coulomb utilisé dans GéoStudio est un modèle de comportement simple et robuste. Il peut être considéré comme une approximation au premier ordre du comportement réel d'un sol. Le modèle de Mohr-Coulomb constitue une approche acceptable pour analyser la rupture des sols dans les problèmes de fondation, stabilité de pentes, de tunnel et de soutènement.

Le modèle de Mohr-Coulomb nécessite cinq paramètres fondamentaux :

- ✓ Deux paramètres élastiques : le module d'Young  $E$  et le coefficient de Poisson  $\nu$  ;
- ✓ Deux paramètres relatifs aux conditions à la rupture : la cohésion  $c$  et l'angle de frottement  $\varphi$  ;
- ✓ Un paramètre relatif à la règle d'écoulement plastique, l'angle de dilatance  $\psi$ . [16]

#### II.5. Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté les différentes méthodes de calcul de la stabilité des talus, et présentation générale sur le progiciel Géo - Studio qui comprend le code **SLOPE/W** et **SEEP/W**. Le premier permet de calculer les infiltrations des eaux (par la méthode des éléments finis). Et le dernier permet de calculer le coefficient de sécurité d'un talus naturel ou artificiel par les méthodes d'analyses classiques.

# Chapitre **III**

---

## **Application Et Résultats**

## CHAPITRE III

### Application et résultats

#### III.1.INTRODUCTION

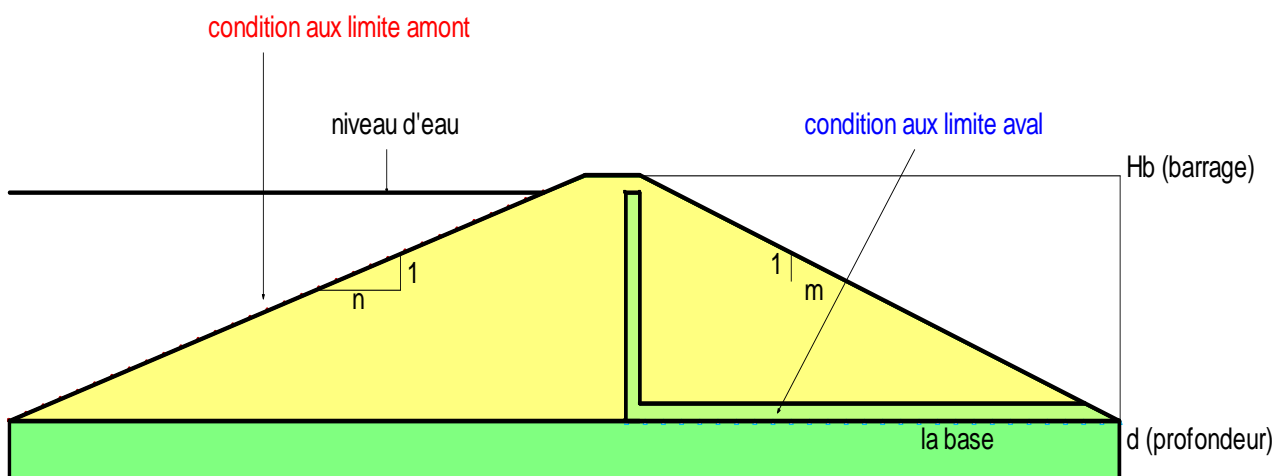
Ce chapitre présente les résultats des simulations numériques réalisées à l'aide du logiciel Géo-studio 2012 (**SEEP/W** et **SLOPE/W**) et leur discussion, et il est composé de deux parties principales. Dans la première partie, des tableaux et des graphes illustrant les résultats obtenus lors des simulations sur un barrage en terre avec drain cheminée sur une assise perméable, dans la deuxième partie je présente une comparaison entre les résultats obtenus numériquement et celle obtenus par d'autres auteurs.

#### III.2.RESULTATS DES CALCULS ET INTERPRETATIONS :

##### III.2.1-Modèle de Calcul :

L'expérimentation numérique est réalisée sur un barrage en terre homogène avec un Drain cheminée et tapis horizontal sur une base perméable, tels que

- $H_b$  (barrage) : 28 m
- $H_e$  : 25 m
- $B$  : largeur de la base du barrage (variable)
- $d$  : (6, 7, 9, 14, 28m) (la profondeur de la base)
- $1/n$  et  $1/m$  : variable
- $K_1$  :  $10^{-06}$  (perméabilités du barrage)
- $K_2$  : perméabilité de la base (variable)



**Fig.III.1** : les conditions aux limites hydrauliques.

### III.3.Effet de la profondeur de la base perméable sur le débit d'infiltration :

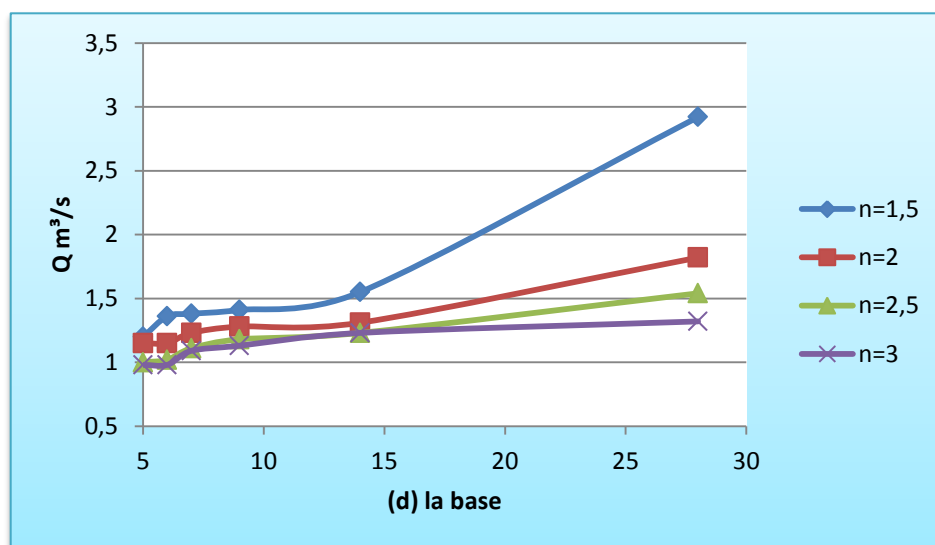
#### III.3.1.effet de la profondeur de la base perméable sur le débit d'infiltration de barrage et de la base :

Le premier modèle est un barrage en terre homogène sur une base perméable

$d=(6, 7, 9, 14,28)$ , la largeur de la crête  $bc = 8$  m, la largeur de la base  $B(m)$ , d'une hauteur  $Hb=28$  m, une pente amont  $n$  (variable), d'une pente aval  $m=2.5$ , les résultats montré ci-dessous est pris pour un barrage homogène c'est-à-dire que la perméabilité du corps et de la base sont égaux.

**Tableau 1** : Résultats de simulation de débit d'infiltration de barrage

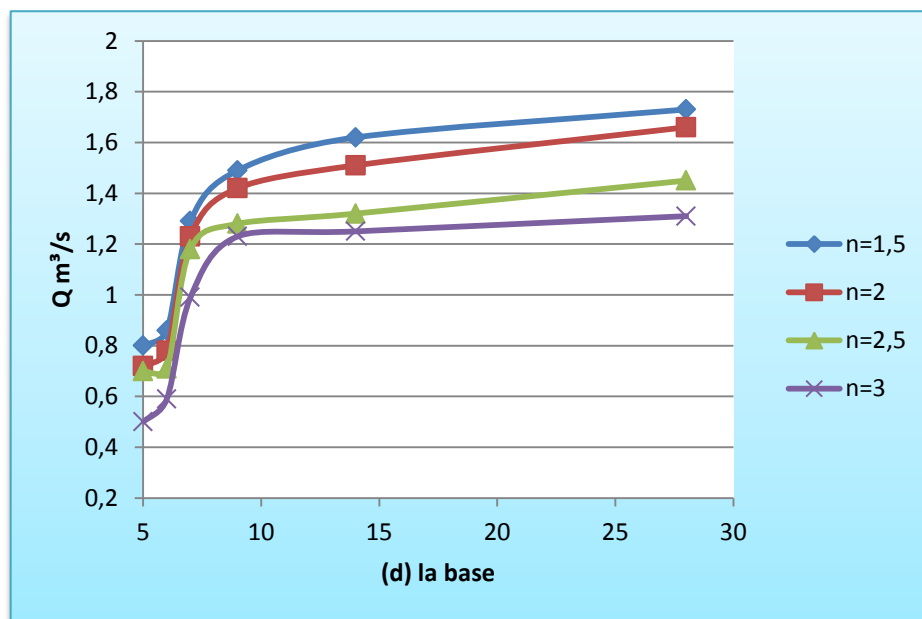
| pente<br>d (m) | n =1.5                              | n =2                                | n =2.5                              | n=3                                 |
|----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
|                | $Q*10^{-05}$<br>(m <sup>3</sup> /s) | $Q*10^{-05}$<br>(m <sup>3</sup> /s) | $Q*10^{-05}$<br>(m <sup>3</sup> /s) | $Q*10^{-05}$<br>(m <sup>3</sup> /s) |
| 5              | 1.2                                 | 1.15                                | 1.00                                | 0.98                                |
| 6              | 1.36                                | 1.15                                | 1.02                                | 0.98                                |
| 7              | 1.38                                | 1.23                                | 1.11                                | 1.09                                |
| 9              | 1.41                                | 1.28                                | 1.18                                | 1.13                                |
| 14             | 1.55                                | 1.31                                | 1.23                                | 1.23                                |
| 28             | 2.92                                | 1.82                                | 1.54                                | 1.32                                |

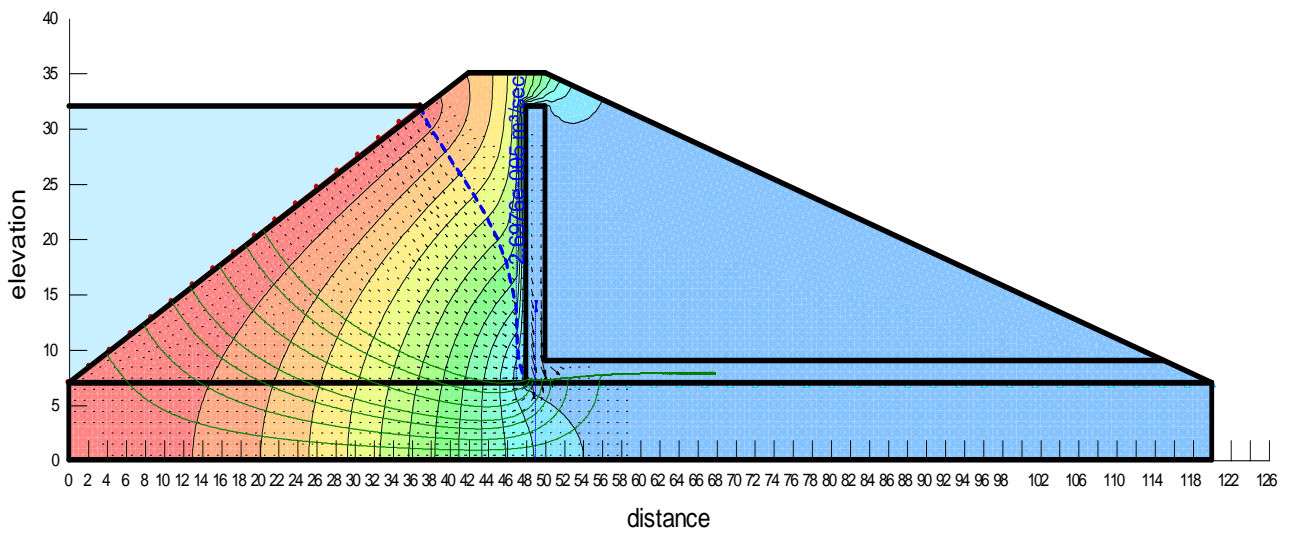


**Fig.III.2** : Variation de débit d'infiltration à travers le corps du barrage en fonction de la profondeur de la base de barrage  $K1=K2$

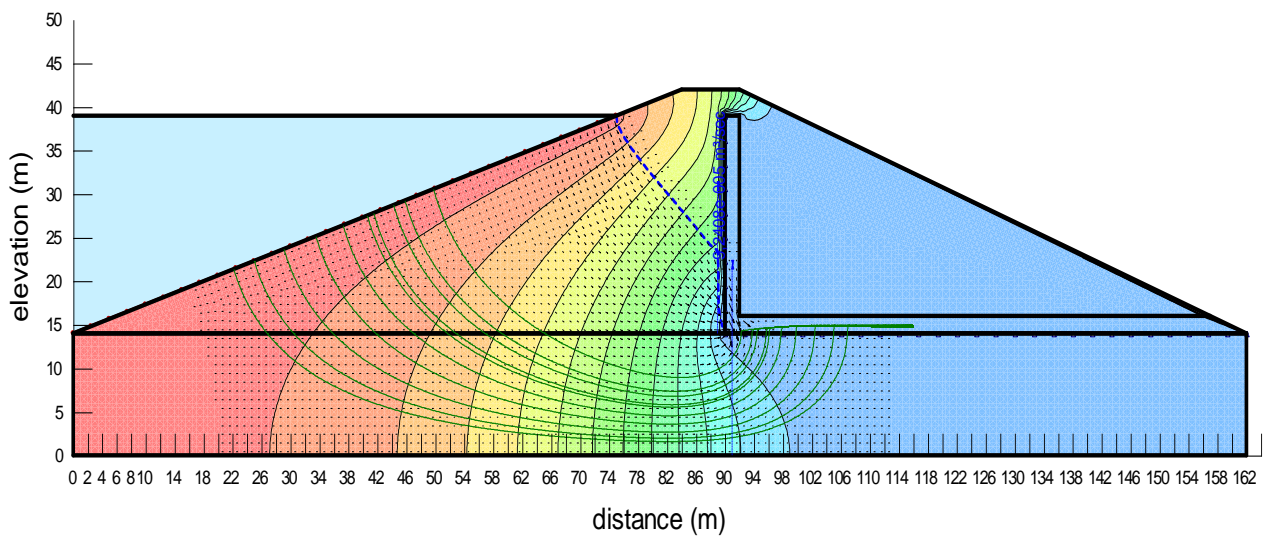
**Tableau 2** : Résultats de simulation de débit d'infiltration à travers la base du barrage

| penne<br>d (m) | n =1.5                                    | n =2                                      | n =2.5                                    | n=3                                       |
|----------------|---|---|---|---|
|                | $Q \cdot 10^{-05}$<br>(m <sup>3</sup> /s) | $Q \cdot 10^{-05}$<br>(m <sup>3</sup> /s) | $Q \cdot 10^{-05}$<br>(m <sup>3</sup> /s) | $Q \cdot 10^{-05}$<br>(m <sup>3</sup> /s) |
| 5              | 0.80                                      | 0.72                                      | 0.70                                      | 0.50                                      |
| 6              | 0.86                                      | 0.78                                      | 0.71                                      | 0.59                                      |
| 7              | 1.29                                      | 1.23                                      | 1.18                                      | 0.99                                      |
| 9              | 1.49                                      | 1.42                                      | 1.28                                      | 1.23                                      |
| 14             | 1.62                                      | 1.51                                      | 1.32                                      | 1.25                                      |
| 28             | 1.73                                      | 1.66                                      | 1.45                                      | 1.31                                      |

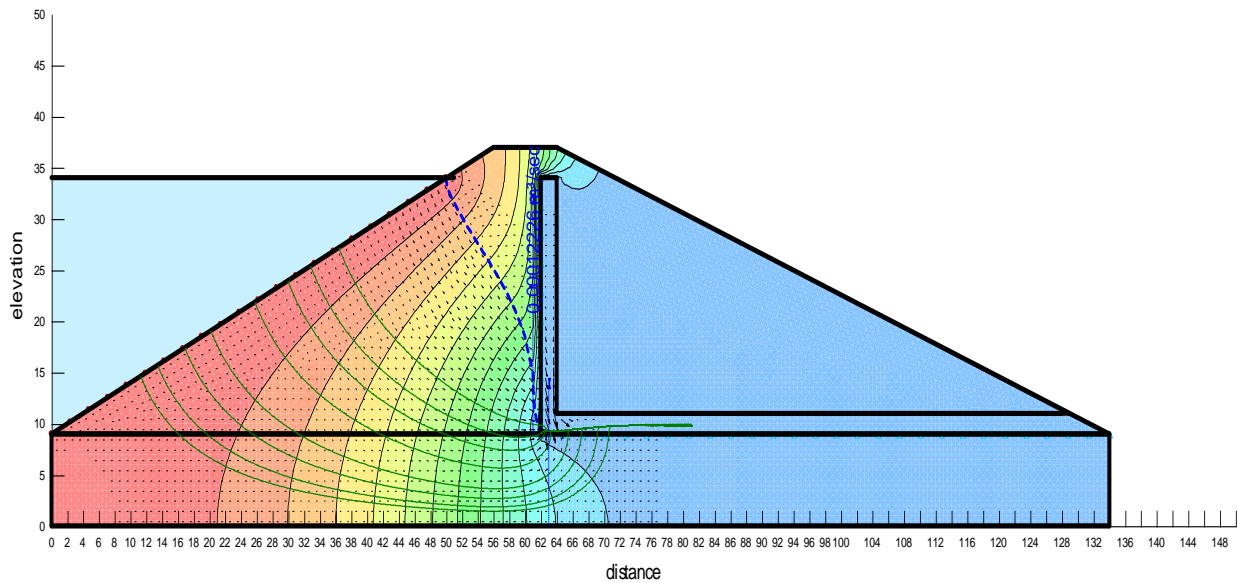
**Fig.III.3** : Variation de débit d'infiltration à travers la base du barrage en fonction de la profondeur K1=K2.



**Fig.III.4** : Résultats de simulation de l'infiltration,  $n=1.5K1=K2$



**Fig.III.5** : Résultats de simulation de l'infiltration,  $n=3k1=k2$



**Fig.III.6** : Résultats de simulation de l'infiltration,  $n=2$   $K1=K2$

### Commentaire :

- On note que le débit diminue avec l'augmentation de la pente (**Figure 2**), parce que la longueur d'écoulement augmente avec l'augmentation de la pente donc on a une diminution du gradient hydraulique, c'est-à-dire une diminution de la vitesse d'écoulement, donc selon la loi de Darcy implique diminution du débit d'infiltration.
- Le débit de fuite à travers la base augmente avec l'augmentation de la profondeur de la base perméable, ceci est dû à l'augmentation de la section d'écoulement.

### III.4. Effet de la profondeur de la base perméable sur la stabilité du barrage :

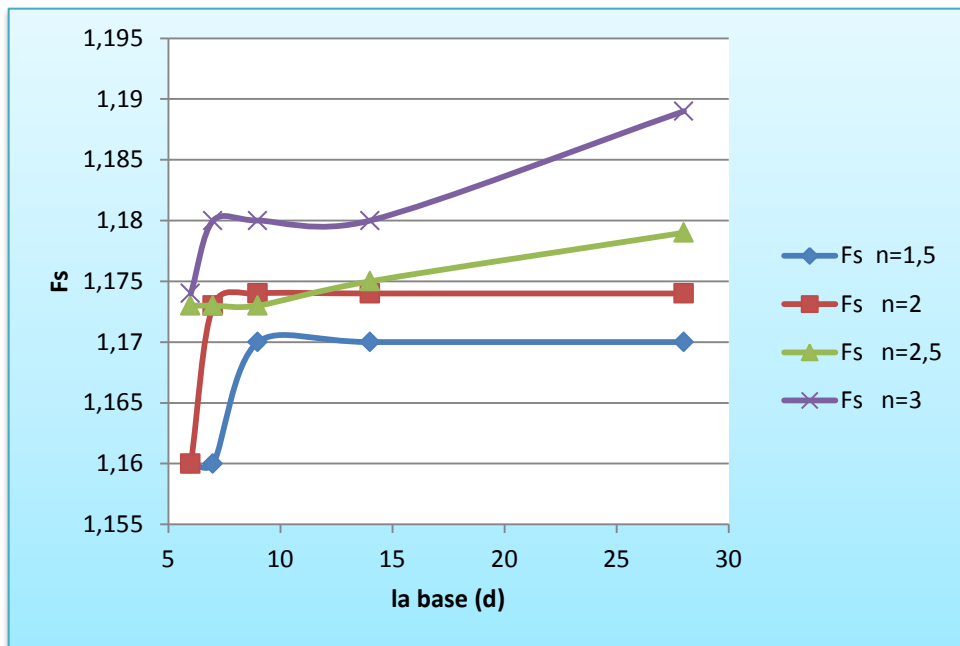
Le premier modèle est un barrage en terre homogène sur une base perméable

$d = (6, 7, 9, 14, 28)$ , la largeur de la crête  $bc = 8 \text{ m}$ , la largeur de la base  $B(m)$ , d'une hauteur  $H=28 \text{ m}$ , une pente amont  $n$  (variable), d'une pente aval  $m=2.5$ .

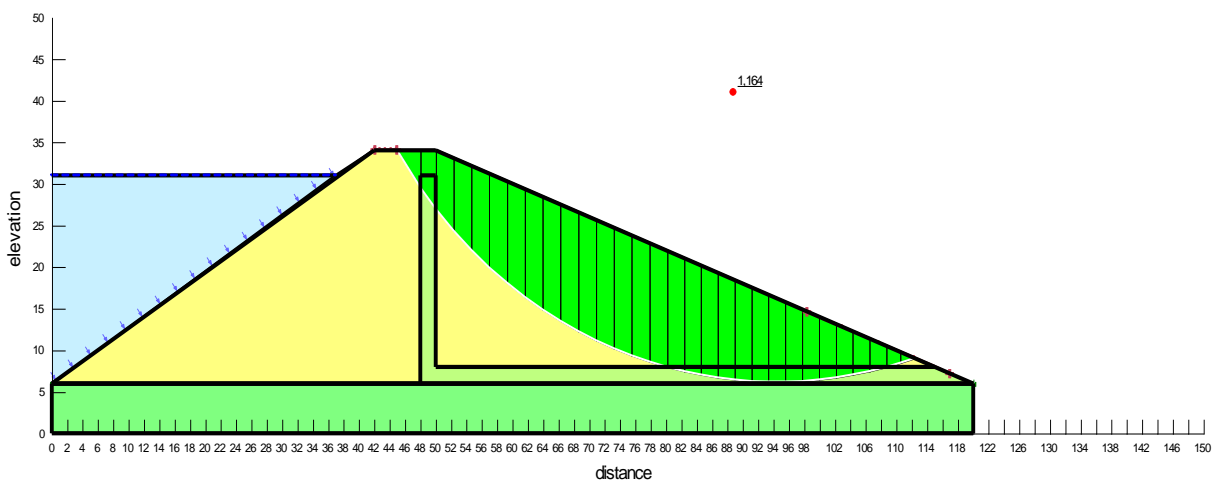
**Tableau 3 :** Résultats de simulation de coefficient de sécurité  $F_s$  :

| pente<br>d (m) | n =1.5 | n =2  | n =2.5 | n=3   |
|----------------|--------|-------|--------|-------|
|                | $F_s$  | $F_s$ | $F_s$  | $F_s$ |
| 6              | 1,16   | 1,16  | 1,173  | 1,174 |
| 7              | 1,16   | 1,173 | 1,173  | 1,18  |
| 9              | 1,17   | 1,174 | 1,173  | 1,18  |
| 14             | 1,17   | 1,174 | 1,175  | 1,18  |
| 28             | 1,17   | 1,174 | 1,179  | 1,189 |

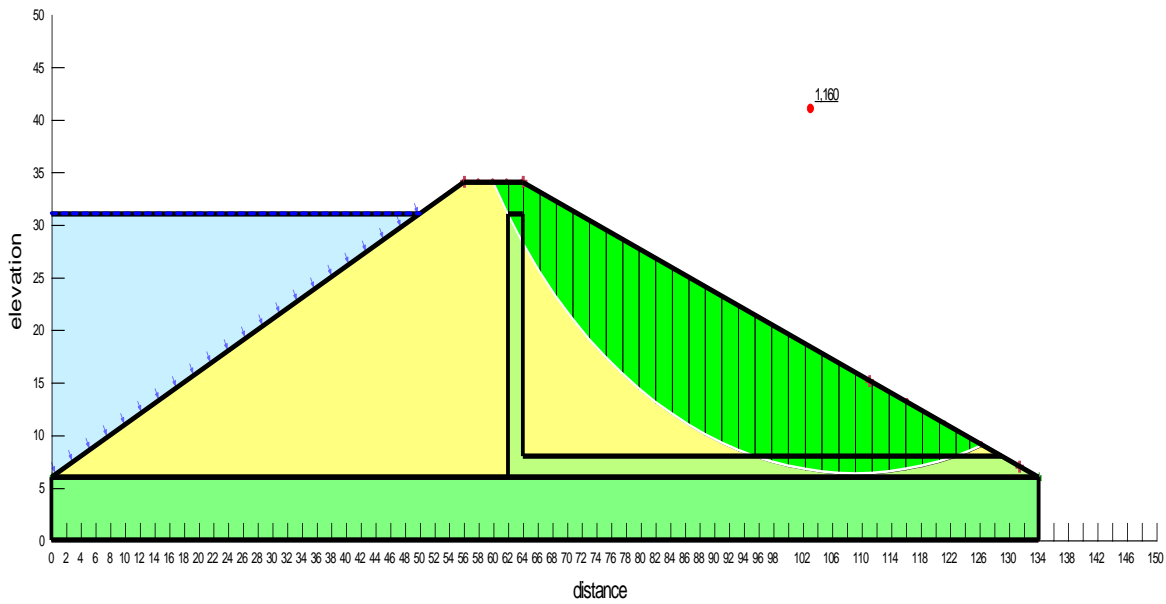
Les figures ci-dessous présentes les résultats de simulation de stabilité en fonction de la profondeur de la base du barrage.



**Fig.III.7 :** Variation du coefficient de sécurité à différent pente amont en fonction de la base du barrage.



**Fig.III.8 :** Résultats de simulation de la stabilité,  $n=1.5$   $K1=K2$



**Fig.III.9:** Résultats de simulation de la stabilité,  $n=2$   $K1=K2$

### Commentaire :

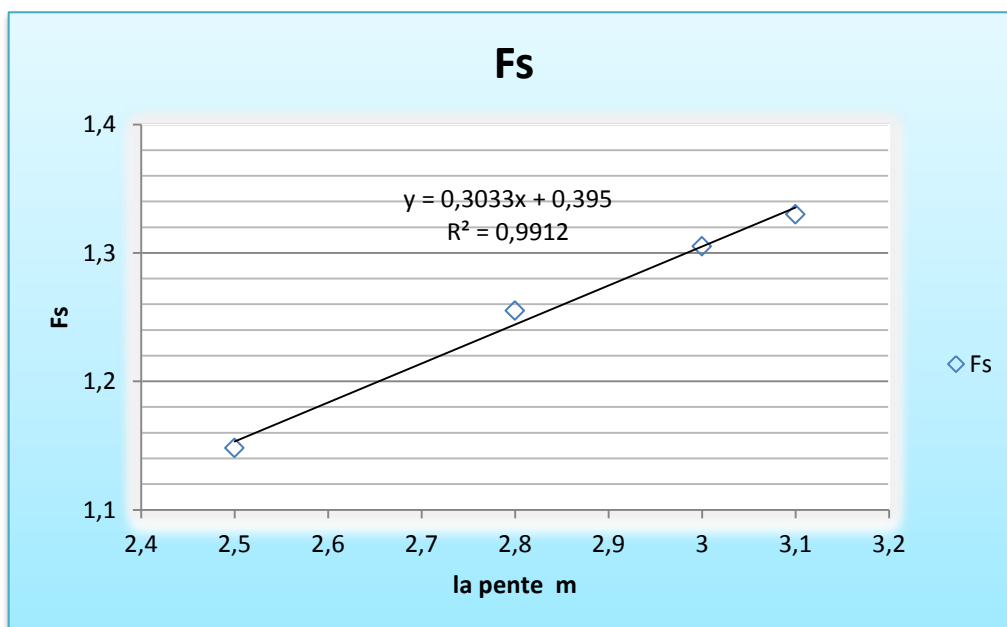
- Dans tous les cas, on remarque que les barrages sont stables,
- Selon la **Fig.7**, on note que le coefficient de sécurité est indépendant de la profondeur de la base perméable pour une profondeur supérieure ou égale à  $d=9m$  et  $n=1.5$  et  $n=2.0$ , et pour  $n=2.5$  et  $n=3.0$  une légère augmentation de coefficient de sécurité en fonction de l'augmentation de la profondeur.
- En concluons, les effets de la pente amont et la profondeur de la base perméable sur la stabilité du barrage (coefficient de sécurité) sont très faible.

### III.5. Effet de la pente aval sur la stabilité du barrage:

Le deuxième modèle est un barrage en terre homogène sur une base perméable, la largeur de la crête  $bc = 8 \text{ m}$ , la largeur de la base  $B(m)$ , d'une hauteur  $H=28 \text{ m}$ , une pente amont  $n=3$ , d'une pente aval  $m$  (variable).

**Tableau 4 :** Résultats de simulation de coefficient de sécurité en fonction de pente aval :

| La pente (m) | Fs    |
|--------------|-------|
| 2,5          | 1,148 |
| 2,8          | 1,255 |
| 3            | 1,305 |
| 3,1          | 1,330 |



**Fig.III.10 :** Variation du coefficient de sécurité en fonction de différente pente aval

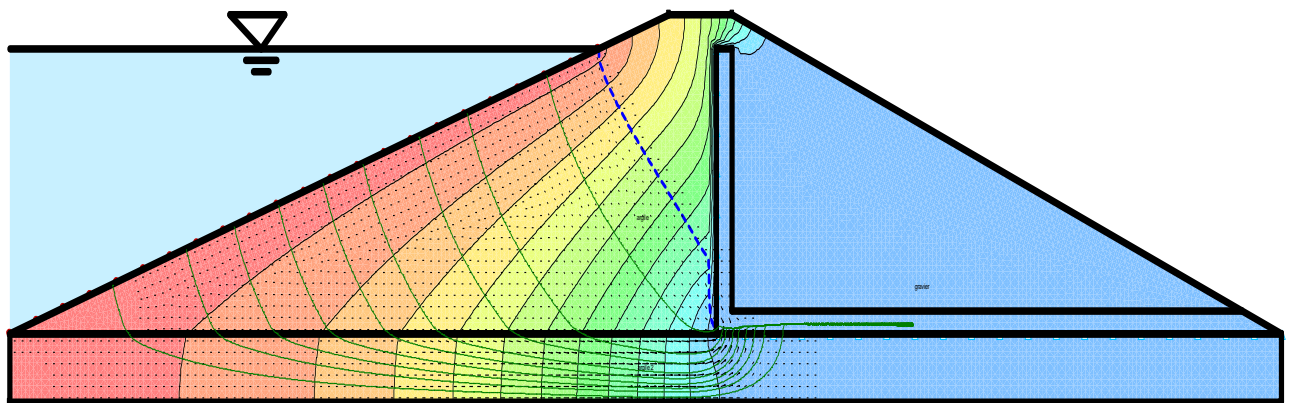
### Commentaire :

Les résultats de simulation de la variation le débit d'infiltration et du coefficient de sécurité en fonction de la pente aval sont respectivement illustrés par les **figures 10** et **11**, Ces résultats révèlent que le débit de fuite  $Q$  et le coefficient de sécurité du talus aval  $F_s$  augmente avec l'augmentation de la pente aval.

L'expérimentation numérique (**fig.10**) montre l'importance de la pente du talus aval sur la stabilité des barrages en terre.

### III.6.Effet de la perméabilité de la base perméable sur le débit d'infiltration :

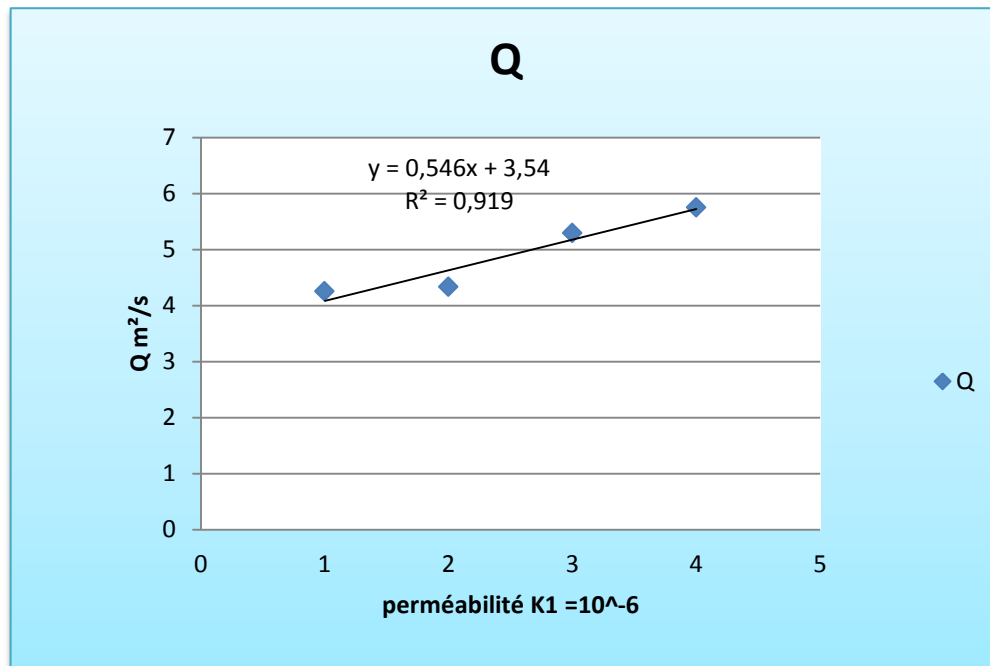
Le troisième modèle est un barrage en terre homogène sur une base perméable, la largeur de la crête  $bc = 8 \text{ m}$ , la largeur de la base  $B = 162\text{m}$ , d'une hauteur  $H=28 \text{ m}$ , une pente amont  $n=3$ , d'une pente aval  $m=2.5$  et la profondeur de la base  $d = 6\text{m}$ , on à varié la perméabilité de la base ( $k_2=k_1$  ;  $k_2=2 k_1$  ;  $k_2=5 k_1$ ;  $k_2=10 k_1$ ).



**Fig.III.11.**Résultats de simulation de l'infiltration,  $n=33$ ,  $K1=5K2$

**Tableau 5** : Résultats de simulation de débit d'infiltration en fonction de perméabilité de la base :

| K                                   | Q *10 <sup>-5</sup> (m <sup>3</sup> /s) |
|-------------------------------------|---|
| k <sub>1</sub> = 10 <sup>-6</sup>   | 4.25                                    |
| 2k <sub>1</sub> =2*10 <sup>-6</sup> | 4.33                                    |
| 5k <sub>1</sub> =5*10 <sup>-6</sup> | 5.29                                    |
| 10k <sub>1</sub> =10 <sup>-5</sup>  | 5.75                                    |



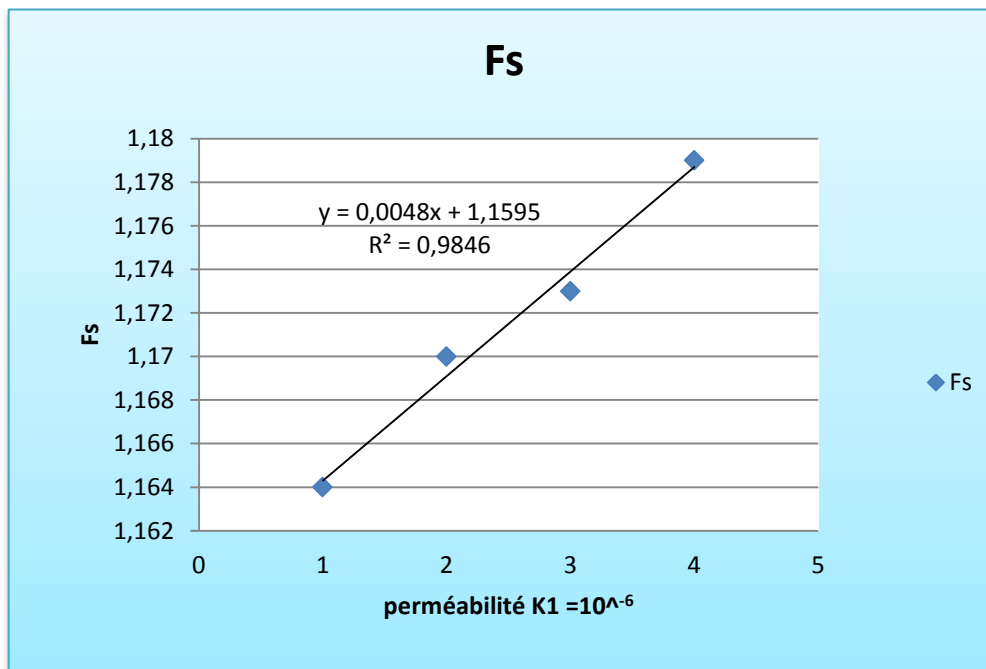
**Fig.III.12** : Variation du débit d'infiltration en fonction de différente perméabilité K ( $k_2=k_1$  ;  $k_2=2 k_1$  ;  $k_2=5 k_1$  ;  $k_2=10 k_1$ ).

### III.7. Effet de la perméabilité de la base perméable sur la stabilité du barrage :

Le quatrième modèle est un barrage en terre homogène sur une base perméable, la largeur de la crête  $bc = 8 \text{ m}$ , la largeur de la base  $B = 162\text{m}$ , d'une hauteur  $H=28 \text{ m}$ , une pente amont  $n=3$ , d'une pente aval  $m=2.5$  et la profondeur de la base  $d = 6\text{m}$ , on a varié la perméabilité de la base ( $k_2=k_1$  ;  $k_2=2 k_1$  ;  $k_2=5 k_1$  ;  $k_2=10 k_1$ ).

**Tableau 6** : Résultats de simulation de coefficient de sécurité en fonction de perméabilité de la base :

| <b>K</b>             | <b>Fs</b> |
|----------------------|-----------|
| $k_1 = 10^{-6}$      | 1,164     |
| $2k_1 = 2 * 10^{-6}$ | 1,17      |
| $5k_1 = 5 * 10^{-6}$ | 1,173     |
| $10k_1 = 10^{-5}$    | 1,179     |



**Fig.III.13 :** Variation du coefficient de sécurité en fonction de différente perméabilité  $K$  ( $k_2=k_1$  ;  $k_2=2 k_1$  ;  $k_2=5 k_1$  ;  $k_2=10 k_1$ ).

### Commentaire :

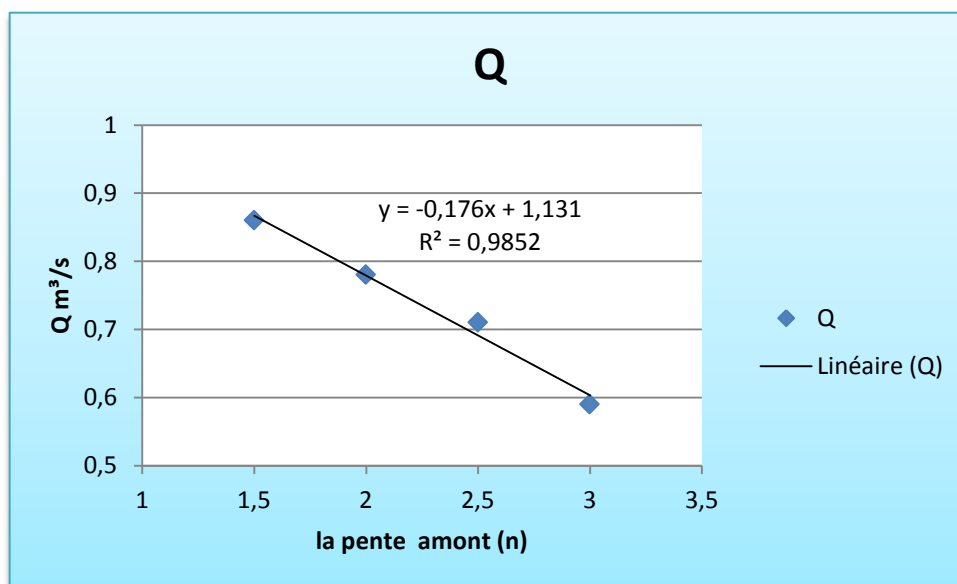
Les figures ci-dessus (**figures12 et 13**) montre que le débit d'infiltration et le coefficient de sécurité augmente avec l'augmentation de la perméabilité de la base, donc on peut conclure la perméabilité de la base joue le rôle d'un drain aval.

### III.8.Effet de différent pente amont sur le débit d'infiltration de la base du barrage :

Le cinquième modèle est un barrage en terre homogène sur une base perméable, la largeur de la crête  $bc = 8 \text{ m}$ , la largeur de la base  $B$ , d'une hauteur  $H=28 \text{ m}$ , une pente amont  $n$  (variable), d'une pente aval  $m=2.5$  et la profondeur de la base  $d = 6\text{m}$

**Tableau 7** : Résultats de simulation de débit d'infiltration en fonction de la pente amont :

| La pente n | $Q \cdot 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{s)}$ |
|------------|--|
| 1.5        | 0.86                                     |
| 2          | 0.78                                     |
| 2.5        | 0.71                                     |
| 3          | 0.59                                     |



**Fig.III.14** : Variation du débit d'infiltration en fonction de différente pente amont (n).

#### Commentaire :

On constate qu'on a une variation linéaire entre le débit drainé par le drain et la pente amont, Le débit de drain diminue avec l'augmentation de la pente amont.

### 0III.9.Exemple de calcul du coefficient de sécurité par la méthode de Fellenius manuelle :

Dans cet exemple, nous avons calculé le coefficient de sécurité (Fs) pour différents diamètres en coupant pour obtenir le résultat le plus proche du résultat numérique, en utilisant la méthode de Fellenius

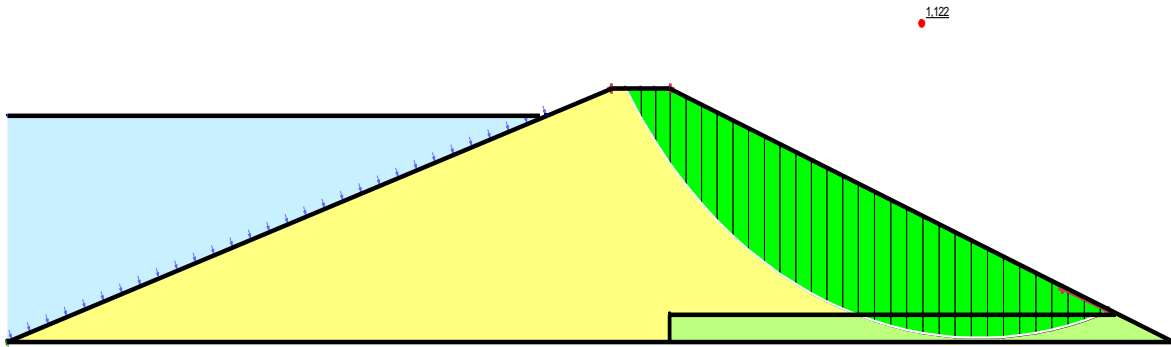


Fig. 15 : résultats de calcul de la stabilité (Fs)

#### III.9.1.Calcul du coefficient de sécurité par la méthode de Fellenius manuelle Pour (R) = 39.52 m :

Pour calculer le coefficient de sécurité, nous utiliserons les données suivantes :

b : Largeur de la tranche.

C' : Cohésion effective, C= 30 kn/m<sup>2</sup>

φ' : Angle de frottement interne effectif, φ= 30°

##### III.9.1.1.Calcul de la surface :

$$S_1 = \left( \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \theta}{360} \right) - \left( \frac{r \cdot r}{2} \right)$$

$$S_1 = \left( \frac{\pi \cdot (39.52)^2 \cdot (67)}{360} \right) - \left( \frac{20.6 \cdot 34.5}{2} \right)$$

$$S_1 = 557.63 \text{ m}^2$$

$$S_2 = \left( \frac{\pi \cdot (39.52)^2 \cdot (55)}{360} \right) - \left( \frac{20.6 \cdot 34.5}{2} \right) - \left( \frac{34.5 \cdot 12.5}{2} \right)$$

$$S_2 = 178.99 \text{ m}^2$$

**III.9.1.2. Calcul de poids :**

$$W_1 = \gamma * S_1$$

$$W_1 = 20 * 557.83$$

$$W_1 = 11156.5 \text{ kn}$$

$$W_2 = \gamma * S_2$$

$$W_2 = 18 * 178.99$$

$$W_2 = 14378.42 \text{ kn}$$

**III.9.1.3. Calcul de  $\alpha$  :**

$$\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{XG}{R}\right)$$

$$XG_1 = \left(\frac{-34.5 * 2}{33.01}\right)$$

$$XG_1 = -2.09 \text{ m}$$

$$\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{-2.09}{39.52}\right)$$

$$\alpha_1 = -3.03$$

$$\alpha_2 = \arcsin\left(\frac{XG}{R}\right)$$

$$XG_2 = \frac{(215.28 * 20 * \frac{2}{3} * 34.5) + (178.99 * 18 * \frac{3}{8} * 34.5)}{14378.42}$$

$$XG_2 = 9.78 \text{ m}$$

$$\alpha_2 = \arcsin\left(\frac{9.78}{39.52}\right)$$

$$\alpha_2 = 14.33^\circ$$

**III.9.1.4. Calcul de longueur :**

$$L_1 = \left(\frac{\alpha * r * \pi}{180}\right)$$

$$L_1 = \left(\frac{(-3.03) * 39.52 * \pi}{180}\right)$$

$$L_1 = -2.08 \text{ m}$$

$$L_2 = \left( \frac{(14.33) * 39.52 * \pi}{180} \right)$$

$$L_2 = 9.88 \text{ m}$$

$$C * L_1 = 62.4$$

$$C * L_2 = 0$$

$$W_1 * \sin \alpha_1 = 11156.6 * \sin (-3.03)$$

$$W_1 * \sin \alpha_1 = -642.22 \text{ kn}$$

$$W_2 * \sin \alpha_2 = 14378.42 * \sin (14.33)$$

$$W_2 * \sin \alpha_2 = 3558.75 \text{ kn}$$

$$W_1 * \cos \alpha_1 * \tan(\varphi) = 0$$

$$W_2 * \cos \alpha_2 * \tan(\varphi) = 8043.09$$

$$F_s = \frac{\sum c * l + w * \cos \alpha * \tan(\phi)}{\sum w * \sin \alpha}$$

$$F_s = \frac{8043.09 + 62.4}{(-642.22) + 3558.75}$$

$$F_s = 1.77$$

### III.9.2. Calcul du coefficient de sécurité par la méthode de Fellenius manuelle

Pour (R) = 36 m

III.9.2.1. Calcul de la surface :

$$S_1 = \left( \frac{\pi * R^2 * \theta}{360} \right) - \left( \frac{r * r}{2} \right)$$

$$S_1 = \left( \frac{\pi * (36)^2 * (67)}{360} \right) - \left( \frac{11.72 * 34.5}{2} \right)$$

$$S_1 = 555.83 \text{ m}^2$$

$$S_2 = \left( \frac{\pi * (36)^2 * (55)}{360} \right) - \left( \frac{11.72 * 34.5}{2} \right) - \left( \frac{34.5 * 12.5}{2} \right)$$

$$S_1 = 204.58 \text{ m}^2$$

### III.9.2.2. Calcul de poids :

$$W_1 = \gamma * S_1$$

$$W_1 = 20 * 555.83$$

$$W_1 = 11116.6 \text{ kn}$$

$$W_2 = \gamma * S_2$$

$$W_2 = 18 * 204.58$$

$$W_2 = 14799.04 \text{ kn}$$

### III.9.2.3. Calcul de $\alpha$ :

$$\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{XG}{R}\right)$$

$$XG_1 = \left(\frac{-34.5 * 2}{24.34}\right)$$

$$XG_1 = -2.83 \text{ m}$$

$$\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{-2.83}{36}\right)$$

$$\alpha_1 = -4.50^\circ$$

$$\alpha_2 = \arcsin\left(\frac{XG}{R}\right)$$

$$XG_2 = \frac{(215.28 * 20 * \frac{2}{3} * 34.5) + (204.58 * 18 * \frac{3}{8} * 34.5)}{14799.04}$$

$$XG_2 = 9.91 \text{ m}$$

$$\alpha_2 = \arcsin\left(\frac{9.91}{36}\right)$$

$$\alpha_2 = 15.97^\circ$$

### III.9.2.4. Calcul de longueur :

$$L_1 = \left(\frac{\alpha * r * \pi}{180}\right)$$

$$L_1 = \left(\frac{(-4.50) * 36 * \pi}{180}\right)$$

$$L_1 = -2.82 \text{ m}$$

$$L_2 = \left(\frac{(15.97) * 36 * \pi}{180}\right)$$

$$L_2 = 10.03 \text{ m}$$

$$C*L_1 = 84.6$$

$$C*L_2 = 0$$

$$W_1*\sin\alpha_1 = 11116.6*\sin(-4.50)$$

$$W_1*\sin\alpha_1 = -872.19 \text{ kn}$$

$$W_2*\sin\alpha_2 = 14799.04*\sin(15.97)$$

$$W_2*\sin\alpha_2 = 4071.72 \text{ kn}$$

$$W_1*\cos\alpha_1*\text{tag}(\varphi) = 0$$

$$W_2*\cos\alpha_2*\text{tag}(\varphi) = 8214.45$$

$$F_s = \frac{\Sigma c * l + w * \cos\alpha * \text{tag}(\phi)}{\Sigma w * \sin\alpha}$$

$$F_s = \frac{8214.45+84.6}{(-872.19)+4071.72}$$

$$F_s = 1.59$$

### III.10.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté et discuter les résultats des simulations numériques, et nous avons présenté des graphiques illustrant les résultats obtenus lors des tests d'écoulement et de stabilité du barrage en terre sur une base perméable.

Dans la Première partie du chapitre, nous avons présenté les résultats des expérimentations numériques pour un barrage en terre sur une base perméable avec une pente et une crête constante, On a conclu que le débit de la base diminue avec l'augmentation de la profondeur de la base.et aussi le coefficient de sécurité.

**CONCLUSION**

**GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

Les barrages sont parmi les constructions humaine les plus importantes, que ce soit sur le côté réalisation avec une conception très sensible pour assurer sa sécurité vis-à-vis la rupture, ou sur le côté économique vu leur coût colossal, ce qui implique des exigences particulières dans leur dimensionnement.

Face à un tel projet, un bon drainage bien contrôlé est l'une des meilleures lignes de défense pour assurer la sécurité d'un tel ouvrage. A cet effet l'influence du dimensionnement de ce dispositif essentiel sur les caractéristiques d'écoulement est très importante.

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à l'écoulement à travers un barrage en terre sur une base perméable avec cheminée de drainage. Notre objectif était en effet d'examiner l'influence de la dimension de la profondeur de la base du barrage, la pente aval et la pente amont et défèrent perméabilité sur la stabilité et le débit de fuite à travers les barrages en terre. A l'aide du logiciel Géo-Studio, on a effectué des calculs sur la base de point de vue hydraulique et mécanique, dont les résultats montrent que :

Dans un premier temps, nous avons constaté que la courbe de saturation est bien rabattue à l'intérieur du barrage et que le coefficient de sécurité  $F_s > 1$  . .

En second lieu, nous avons présenté les résultats des simulations numériques pour un barrage en terre sur une base perméable avec une pente et une crête constantes, la profondeur de la base et variable avec des déférentes perméabilités. On a conclu que la profondeur optimale pour la stabilité et le débit de fuite, il est commode de prendre la pente amont  $m=3$  et la profondeur  $d=28m$

À la fin nous concluons qu'il faut choisir la longueur, la profondeur et la pente amont et aval optimaux pour avoir un barrage économique, et au même temps augmenter leur stabilité et limité le débit de fuite.

**Références**

---

**Bibliographiques**

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] hadjira FEMMAM1 & naima BENMEBAREK; *effets des drains sur la stabilite des barrages en terre*; article Courrier du Savoir – N°11, Mars 2011, pp.09-15; Université de Biskra-Algérie
- [2] Anton J. Schleiss et Henri Pougatsch; *Les barrages du projet à la mise en service* . Vol. 17. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2011 EPFL. Rolex Learning Center. CP 119, CH-1015 Lausanne
- [3] agence nationale des barrages et transferts, soudoud dzair, barrage .algérié.org
- [4] Rodriguez. B. A et Rosa. S., (2004). Procédures méthodologiques pour l'exécution des Études. Manuel de conception et projets typiques. La Rosa, Santos, 28 pages.
- [5] Rolley. R et *als.*, (1977). Technique des barrages en aménagement rural. Edition Eyrolles. Paris : Ministère de l'agriculture, 325 pages.
- [6] MESSAID BELKACEM., 2009-Etude de la position efficace des drains dans les barrages en terre -, thèse doctorat en science, université Batna.
- [7] AMIEUR R., DEDOUICHE S., 2009 – Etude expérimentale d'un barrage en terre avec cheminée filtrante sous l'action de l'infiltration-, projet de fin d'étude d'ingénieur, université Laghouat.
- [8] GEORGES SCHNEEBLI., 1987- Hydraulique souterraine -, Edition Eyrolles, France.
- [9] MAURICE CASSAN., 1986-Aide-mémoire d'hydraulique souterraine l'école nationale des Ponts et Chaussées, (ENPC) - 2ème Édition, France.
- [10] METREVELIV.,- Hydrogéologie et phénomène de transport -, office des publications universitaires, Ben Aknoun, Alger.
- [11] **SCHLEISS, A. ET POUGATSCH, H.**, « Les barrages : du projet à la mise en service ». Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2011.

[12]. Réseaux d'écoulement [en ligne]. Disponible sur :

«<http://hydrogeologistswithoutborders.org/wordpress/1979-francais/chapitre-5/> ».

[Consulté le 1er avril 2021].

[13]. **KODJOVIMAWUMETO D.**, « Conception d'un logiciel pour simuler par la méthode des éléments finis les écoulements en milieu poreux saturé ».Projet de fin d'étude, Ecole polytechnique de Thies, République du Senegal.

[14] **MESSAID BELKACEM** ; *Etude de la position efficace des drains dans les barrages en terre* ; Mémoire doctorat université de batna -Algérie, 2009.

[15] Gérard **PHILIPPONNANT**; *fondation et ouvrages en terre* ; éditions eyrolles ,paris, 1987.

[16]. **GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD**,Géo-SlopeV7 (Slope/W et Seep/W),

Version 7.10: User'sManual", GEO-SLOPE International Ltd, Calgary, Alberta,

Canada. 2008.