

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبو بكر بلقايد - تلمسان

**Université Abou BekrBelkaid Tlemcen**

**Faculté de Technologie**

**Département d'Hydraulique**



## **MEMOIRE**

Pour l'obtention du Diplôme de **Master**

En : **Hydraulique**

Option: **Ouvrages Hydrauliques**

Présenté par :

**ARSLANE Rahima & BENHADJI SERRADJ Kawther**

Thème :

**Analyse des paramètres des écoulements  
dans un barrage en terre**

Soutenue publiquement, le : 29/ 09 / 2021 devant le jury composé de :

Mme. ROUISSAT Nadia

**Présidente**

Mr. ROUISSAT Bouchrit

**Examinateur**

Mr. DEBBAL Mohammed Zakaria

**Encadreur**

Mme. DEBBAL Faiza

**Co-Encadreur**

Année Universitaire : 2020/2021

# Remerciements

Louange et grâce à Dieu, qui nous a accordé la patience et le courage pour accomplir ce modeste travail.

Nous tenons, tout d'abord, à remercier nos encadreurs monsieur DEBBAL Mohammed Zakaria et madame DEBBAL Faiza pour avoir rempli parfaitement ce rôle et pour les orientations précieuses dont ils nous ont fait part. Nous ne saurons les remercier assez pour leur soutien et leur suivi scientifique. Nous leur devons beaucoup pour la confiance qu'ils nous ont témoigné et pour les encouragements et conseils qu'ils nous ont prodigué.

Nous tenons à remercier madame ROUISSAT Nadia et monsieur ROUISSAT Bouchrit pour leurs labeurs, orientations et conseils qu'ils nous ont attribué pendant notre parcours universitaire et d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous adressons nos vifs remerciements à tous les ingénieurs et le personnel du barrage Sikkak en particulier monsieur ZERROUKIB., ainsi qu'aux responsables de l'ANBT, pour leur aide inestimable, leurs encouragements et pour la mise à notre disposition des données du barrage.

Nous tenons également à exprimer nos remerciements à tous les enseignants du département Hydraulique qui n'ont ménagé aucun effort pour notre formation.

Notre gratitude s'adresse également à nos chers parents pour leur soutien et leur encouragement.

# *Dédicaces*

## **Je dédie ce modeste travail**

### **A mes très chers parents**

Qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un  
Magnifique modèle de labeur et de persévérance. J'espère  
qu'ils

Trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout  
mon

Amour.

A mon très cher frère « Abderrahmene »

A ma très chère sœur « Shssene »

A ma grand-mère

A toute ma famille

A ma très chère amie et binôme « Rahima »



BENKADJ SERRADJ Karthez

# DEDICACES

---

À mes très chers parents, avant tous et pour tous, que j'adore  
et je souhaite toujours les voir à mes côtés :

À ma très chère mère *FAYROUZ NOURAOUS*  
symbole de tendresse et de patience,

Je te remercie infiniment de tes sacrifices. À mon cher père  
*MOUHAMED,*

Je te remercie infiniment de tes sacrifices.

À mes très chers frères : Moussa et Abderrahmane.

À ma très chère sœur :

*Kaouter.*

À ma très chère amie et binôme « Kawther »

À tous mes camarades de la promotion 2018/2019.

Rahima ARSLANE



# RESUME

La stabilité des barrages en terre dépend de leur géométrie, des propriétés mécaniques des matériaux utilisés mais aussi des forces dues aux pressions interstitielles développées surtout lors des variations importantes pendant le remplissage ou la vidange. Quelle que soit la perméabilité d'un barrage en remblai, il y a toujours des infiltrations à travers son massif. Au cours du temps ce phénomène peut dégrader progressivement la stabilité de l'ouvrage par l'érosion régressive et les débits de fuite excessifs.

Le contrôle des écoulements dans un barrage en terre doit être recherché de telle manière que les paramètres liés aux infiltrations restent inférieurs aux paramètres critiques (gradient hydraulique, débit, pression interstitielle).

Le phénomène d'infiltration dans un barrage en terre est complexe et dépend de plusieurs paramètres. Pour mieux comprendre ce phénomène, nous avons procédé à une analyse des principaux paramètres liés à ces écoulements. Pour atteindre cet objectif, nous avons effectué des études numériques à l'aide du logiciel GéoStudio module Seep. L'objectif est de voir l'influence de certains paramètres sur les écoulements dans un barrage en terre homogène.

Une étude comparative est faite entre la méthode numérique et la méthode graphique de kozeny. Les études paramétriques ont concerné les critères liés à la position de la ligne de saturation, la variation du champ de la pression interstitielle et de la charge hydraulique ainsi qu'une étude de l'influence des dimensions du drain horizontal sur l'infiltration dans la digue d'un barrage en terre.

Pour l'étude de cas, nous avons utilisé l'exemple du barrage de SIKKAK situé à Ain Youcef Wilaya de Tlemcen. Les valeurs obtenues par les différentes modélisations numériques ont été comparées à celles des mesures effectuées sur site.

**Mot clés :** Barrage en remblai, infiltration, GéoStudio, Seep, pression interstitielle.

# ABSTRACT

The stability of embankment dam depends on their geometry, the mechanical properties of the materials used but also the forces due to the pore pressures developed especially during significant variations during filling or emptying. Whatever the permeability of an embankment dam, there is always infiltration through its mass. Over time, this phenomenon can progressively degrade the stability of the structure through regressive erosion and excessive leakage rates.

The control of flows in an embankment dam must be sought in such a way that the parameters related to infiltration remain lower than the critical parameters (hydraulic gradient, flow, pore pressure).

The phenomenon of infiltration in an earth dam is complex and depends on several parameters. To understand this phenomenon, we carried out an analysis of the main parameters linked to these flows. To achieve this goal, we carried out digital studies using the GeoStudio module Seep software. The objective is to see the influence of some parameters on the flows in a homogeneous embankment dam.

A comparative study is made between the numerical method and the graphic method of kozeny. The parametric studies concerned the criteria related to the position of the saturation line, the variation of the pore pressure field and the hydraulic head as well as a study of the influence of the dimensions of the horizontal drain on the infiltration in the dike of an embankment dam.

For the study's case, we used the example of the SIKKAK dam located in AinYoucef, Wilaya of Tlemcen. The obtained values by various numerical models were compared with those of the measurements carried out on the site.

Key words: Embankment dam, infiltration, GeoStudio, Seep, pore pressure.

## ملخص

يعتمد استقرار السدود الترابية على هندستها، والخصائص الميكانيكية للمواد المستخدمة، وكذلك القوى الناتجة عن ضغوط المسامات التي تتطور خاصة أثناء الاختلافات الكبيرة أثناء الملء أو التفريغ. بغض النظر عن نفاذية السد، هنا كدائم اتسل عبر السد. بمرور الوقت، يمكن أن تؤدي هذه الظاهرة إلى تدهور استقرار الهيكل تدريجيًا من خلال التآكل الارتدادي ومعدلات التسرب المفرط. يجب السعي إلى التحكم في التدفقات في السد الترابي بطريقة تجعل الكميات المتعلقة بالتسلل أقل من الكميات القصوى (التدرج الهيدروليكي، التدفق، ضغط المسامات).

ظاهرة التسلل إلى السد الترابي معقدة و تعتمد على عدة معايير. لفهم هذه الظاهرة بشكل أفضل، أجرينا تحليلًا للمعايير الرئيسية المرتبطة بهذه التدفقات.

لتحقيق هذا الهدف، أجرينا دراسات رقمية باستخدام برنامج Seep module GeoStudio

الهدف هو معرفة تأثير بعض المعايير على التدفقات في سد ترابي متجانس. تم إجراء دراسة مقارنة بين الطريقة العددية وطريقة كوزني الرسومية. تتعلق الدراسات البارامترية بالمعايير المتعلقة بتموقع خط التشبع، وتغير مجال ضغط المسامات والضغط الهيدروليكي بالإضافة إلى دراسة تأثير أبعاد الصرف الأفقي على لتسلل المياه في السد الترابي. بالنسبة لدراسة الحالة، استخدمنا مثال سد سيكاك الواقع في عين يوسف في ولاية تلمسان. تمت مقارنة القيم التي تم الحصول عليها من خلال النماذج العددية المختلفة مع تلك الخاصة بالقياسات التي أجريت في موقع السد.

**الكلمات المفتاحية:** السدود الترابية، التسلل المائي، Seep، GeoStudio، ضغط المسامات.

# Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Liste des symboles

INTRODUCTION GENERALE

## **Chapitre 1 : Etude de la filtration à travers la section d'un barrage en terre**

1.1	Introduction.....	5
1.2	Généralités sur les milieux poreux.....	5
1.2.1	Définition du milieu poreux.....	5
1.2.2	Les paramètres physiques .....	5
a.	Le volume.....	5
b.	Les poids .....	6
c.	Les poids volumiques du milieu poreux .....	6
i.	Le poids volumique apparent : .....	6
ii.	Le poids volumique absolu des grains solides : .....	6
d.	La teneur en eau .....	6
e.	La porosité.....	7
f.	L'indice de vide .....	7
g.	Le degré de saturation .....	7
1.2.3	La définition d'un sol .....	7
1.2.4	Les phases du sol.....	7
a.	La Phase solide .....	7
b.	La phase liquide .....	8
c.	La phase gazeuse .....	9

1.2.5 Les écoulements dans les milieux saturés .....	10
1.2.6 Lois générales .....	10
a. La charge hydraulique.....	10
b. La vitesse de l'écoulement .....	10
c. Le gradient hydraulique .....	10
d. La perméabilité .....	10
e. Milieu homogène .....	11
f. Milieu isotrope et anisotrope.....	11
g. Les lignes de courant.....	11
h. La ligne équipotentielle.....	11
i. La ligne équipression .....	11
1.2.7 La loi de DARCY .....	11
1.3 Infiltration à travers le corps du barrage en terre .....	13
1.3.1 La ligne de saturation .....	13
1.3.2 Ligne de courant et ligne équipotentielle .....	14
1.4 Les méthodes de résolution des problèmes d'écoulement.....	18
1.4.1 La méthode analytique.....	18
1.4.2 La méthode graphique .....	18
1.4.3 La méthode analogique.....	19
1.4.4 La méthode probabiliste .....	20
1.4.5 Les méthodes numériques.....	20
a. La méthode des éléments finis.....	21
b. La méthode des différences finies .....	22
1.5 Conclusion .....	22

## **Chapitre 2:Pathologie des barrages en terre**

2.1	Introduction.....	24
2.2	Les types des barrages en remblai .....	24
2.2.1	Les barrages en terre homogènes .....	24
2.2.2	Les barrages zonés.....	25
2.2.3	Les barrages en terre à masque amont.....	26
2.3	Les types des risques dans les barrages en terre.....	27
2.3.1	Les risques de défaillances .....	28
a.	L'érosion .....	28
i.	L'érosion interne.....	29
ii.	L'érosion externe .....	31
b.	Le glissement.....	34
i.	Le mécanisme de glissement du parement avale.....	35
ii.	Le mécanisme de glissement du parement amont .....	36
c.	Les Tassements.....	37
2.3.2	Les risques liés à l'exploitation .....	37
2.4	Dispositions à prendre .....	38
2.4.1	La prévision du risque .....	38
2.4.2	Les moyennes de prévention.....	38
2.5	Conclusion .....	39

## **Chapitre 3 : Analyse des paramètres des écoulements dans un barrage en terre.**

3.1	Introduction.....	42
3.2	Présentation du logiciel .....	42
3.2.1	Etapes de la modélisation avec GeoStudio .....	45
a.	Définir les analyses .....	45
b.	Set ou Afficher.....	46

c. Sketch ou Esquisser .....	46
d. Draw ou Dessiner.....	46
e. KeyIn ou Définir les matériaux .....	47
f. Boundary conditions ou les conditions aux limites .....	48
g. Le maillage .....	48
h. La simulation .....	49
i. Visualisation des résultats .....	49
3.3 Etude paramétrique .....	50
3.3.1 Etude de l'influence des dimensions du drain horizontal sur l'infiltration .....	50
3.3.2 Influence des dimensions du drain dans un barrage homogène (version 2018) .....	56
a. La relation entre la longueur de la base du barrage et la longueur du drain (cas extrêmes) 56	
b. La relation entre la longueur du drain et la surface saturé (cas extrême) .....	61
c. La relation entre la longueur du drain et la surface saturé (un coefficient de ¼) .....	63
3.4 Comparaison entre la méthode graphique et la méthode numérique .....	64
3.4.1 La méthode graphique .....	67
a. Le cas d'un barrage homogène sans drain .....	67
b. Le cas d'un barrage homogène avec drain .....	70
3.4.2 La méthode numérique .....	71
3.5 Conclusion : .....	75

#### **Chapitre4 :Etude de cas (Barrage SIKKAK)**

4.1 Situation du barrage SIKKAK.....	78
4.2 Les caractéristiques du barrage.....	78
4.3 Aspect d'ensemble de l'aménagent .....	79
4.3.1 Barrage.....	79
4.3.2 Les ouvrages de dérivations.....	79
4.3.3 La tour de prise.....	79
4.3.4 L'adduction .....	79

4.3.5 L'évacuateur de crue .....	79
4.4 La géologie et la géotechnique .....	80
4.4.1 Le choix du site .....	80
4.4.2 La géologie du site .....	80
4.4.3 La stratigraphie du site .....	80
4.4.4 Les matériaux de construction .....	80
a. Matériaux argileux (zone 1) .....	80
b. Matériaux pour le filtre et la transition (Zones 2A et 2B).....	81
c. Recharge amont et aval (Zone 3A) .....	81
d. Matériaux de protections (Zones 3C et 4).....	81
e. Matériaux de remblai .....	81
4.5 Etude de cas .....	83
4.5.1 Les résultats .....	85
4.5.2 Discussion.....	88
4.6 Conclusion .....	89

## CONCLUSION GENERALE

# LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Une portion du sol. ....	5
Figure 1.2 : L'eau dans une coupe verticale du sol. ....	8
Figure 1.3 : L'eau dans le sol. ....	9
Figure 1.4 : Un schéma représentatif de la loi de DARCY. ....	12
Figure 1.5: l'écoulement dans un sol. ....	13
Figure 1.6 : Tracé des lignes de courant et des lignes équipotentielles dans le cas de barrage homogène sur sol imperméable sans drains. ....	14
Figure 1.7 : Tracé du réseau d'écoulement pour un barrage en terre homogène avec un drain horizontale sur sol imperméable. ....	15
Figure 1.8 : tracé du réseau d'écoulement dans le cas de barrage homogène avec drain horizontale sur sol perméable de même perméabilité que le massif. ....	15
Figure 1.9 : Tracé du réseau d'écoulement dans le cas de terrain d'assise moins perméable que le massif ( $K_1 > K_2$ ). ....	16
Figure 1.10 : Tracé du réseau d'écoulement dans le cas d'une vidange rapide. ....	16
Figure 1.11 : Détermination de la pression interstitielle. ....	17
Figure 1.12 : Ligne de saturation selon Kozeny. ....	19
Figure 2.1 : Barrage en terre homogène. ....	25
Figure 2.2 : Barrage en terre avec noyau centrale. ....	26
Figure 2.3 : Barrage à masque amont. ....	27
Figure 2.4 : Les différents types de barrage en remblai (EPFL 2002). ....	27
Figure 2.5 : Divers phénomènes initiateurs de l'érosion interne dans un barrage (Adapté de Schuler et Brauns 1996, cité par Blais, 2005). ....	29
Figure 2.6 : le mécanisme de l'affouillement ( Mériaux et al, 2001). ....	32
Figure 2.7 : Mécanisme de rupture par surverse (Mériaux et al, 2004). ....	34
Figure 2.8 : Le mécanisme de glissement circulaire coté Aval en situation de crue. [ain zada]. .....	35
Figure 2.9 : Le mécanisme de glissement coté fleuve lors de la décrue (Mériaux et Al, 2001). .....	36
Figure 2.10 : Principes fondamentaux de la surveillance des barrages. [22].....	39
Figure 3.1 : Interface de Géo Studio 2007. ....	43
Figure 3.2 : Les modules du logiciel Geostudeo 2012. ....	45

Figure 3.3 : La fenêtre d'analyse de la fonction SEEP/W (version 2007).	45
Figure 3.4 : La fenêtre d'analyse de la fonction SEEP/W (version 2018).	46
Figure 3.5 : les outils de sketch (version 2007).	46
Figure 3.6: les outils de dessin (version 2018).	47
Figure 3.7 : la fenêtre de la définition des matériaux (version 2018).	47
Figure 3.8 : la fenêtre de la définition des conditions aux limites (version 2018).	48
Figure 3.9 : Exemple d'étude d'un barrage homogène, l'étape du maillage (version 2018).	49
Figure 3.10 : Visualisation de la ligne de saturation dans un exemple d'étude (version 2018).	50
Figure 3.11 : Profil de référence.	50
Figure 3.12 : Résultat de la simulation $L_d = 0$ $L_b$ (sans drain).	51
Figure 3.13 : Résultat de la simulation $L_d = 1/10$ $L_b$ .	52
Figure 3.14 : Résultat de la simulation $L_d = 1/5$ $L_b$ .	52
Figure 3.15 : Résultat de la simulation $L_d = 1/4$ $L_b$ .	52
Figure 3.16 : Résultat de la simulation $L_d = 1/3$ $L_b$ .	53
Figure 3.17 : Résultat de la simulation $L_d = 1/2$ $L_b$ .	53
Figure 3.18 : Variation du débit de fuite en fonction de la longueur du drain.	55
Figure 3.19 : Variation de la surface du sol saturé en fonction de la longueur du drain.	55
Figure 3.20 : Résultat de simulation sur un barrage homogène ( $L_b= 92$ m , $L_d=7$ m).	57
Figure 3.21 : Résultat de simulation sur un barrage homogène ( $L_b=108$ m, $L_d =9$ m).	58
Figure 3.22 : Résultat de simulation sur un barrage homogène ( $L_b=122$ m, $L_d=8$ m).	58
Figure 3.23 : Résultat de simulation sur un barrage homogène ( $L_b=183$ m, $L_d=13$ m).	59
Figure 3.24 : Résultat de simulation sur un barrage homogène ( $L_b=232$ m, $L_d=22$ m).	59
Figure 3.25 : Résultat de simulation sur un barrage homogène ( $L_b=316$ m, $L_d=32$ m).	60
Figure 3.26 : Résultat de simulation sur un barrage homogène ( $L_b=432$ m, $L_d=47$ m).	60
Figure 3.27: La relation entre la longueur du drain et la longueur de la base.	61
Figure 3.28 : dessin AUTOCAD.	62
Figure 3.29 : la relation entre la longueur du drain et la surface saturée.	63
Figure 3.30 : la relation entre la longueur du drain et la surface saturée avec un coefficient de $1/4$ .	64
Figure 3.31 : Ligne de Saturation dans un barrage en terre.	65
Figure 3.32: Ligne de saturation d'un barrage à drain horizontale.	66
Figure 3.33 : Barrage en terre homogène reposant sur un substratum imperméable.	68
Figure 3.34 : Tracé de la courbe de saturation par la méthode de Kozeny (AutoCAD 2008).	70

Figure 3.35 : Tracé de la courbe de saturation méthode de Kozeny (barrage homogène muni d'un drain) (AutoCAD 2008).....	71
Figure3.36 : profile d'un Barrage en terre homogène (sans drain) (GéoStudio 2007).....	72
Figure 3.37 : Profil d'un barrage en terre homogène avec un drain.....	72
Figure 3.38 : Résultats de la simulationCas n°1 (Visualisation de l'évolution de la ligne de saturation) (GéoStudio 2007 et Auto-CAD (2008)).....	73
Figure 3.39 : Résultats de la simulation cas n°2 ((Visualisation de l'évolution de la ligne de saturation) (GéoStudio 2007 et Auto-CAD (2008)).....	74
Figure4.1 : dessin Autocad des différentes couches du barrage SIKKAK.....	82
Figure4.2 : dessin Autocadd des différentes couches du barrage SIKKAK.....	83
Figure4.3 : Profil de référence.....	84
Figure4.4 : Maillage du profil.....	84
Figure4.5 : Résultat de la simulation H = 218m, (profile 310).....	85
Figure4.6 : Résultat de la simulation H = 209m, (Profile 310).....	85
Figure4.7 : Résultat de la simulation H = 209m, (Profile 310).....	86
Figure4.8 : La variation de la pression interstitielle pour chaque hauteur.....	88

# LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 2.1</b> : Valeurs du gradient dépendant de la nature de sol (Lautrin, 2002). .....	31
<b>Tableau 2.2</b> : Les types de mesure et leurs instruments : .....	39
<b>Tableau3.1</b> : Caractéristiques du barrage. ....	51
<b>Tableau 3.2</b> : Valeurs de la pression interstitielle, et le gradient hydraulique en fonction de la longueur du drain pour les trois points. ....	54
<b>Tableau 3.3.</b> : Valeurs de la surface du sol saturé, et la variation de débit de fuite en fonction de la longueur du drain. ....	54
<b>Tableau 3.4</b> : les Longueurs des bases avec les longueurs des drains pour le cas extrême. ....	57
<b>Tableau 3.5</b> : les valeurs des surfaces calculées. ....	62
<b>Tableau 3.6</b> : les valeurs des surfaces calculées. ....	63
<b>Tableau3.7</b> : Les coordonnées de la parabole de saturation. ....	69
<b>Tableau 3.8</b> : Les coordonnées de la parabole théorique (barrage homogène avec drain). ....	71
<b>Tableau 3.9</b> : les coordonnées de la ligne de saturation (sans drain). ....	75
<b>Tableau 3.10</b> : les coordonnées de la ligne de saturation (la présence du drain). ....	75
<b>Tableau4.1.</b> : Propriétés physiques des matériaux argileux des bancs d’empreintes. ....	81
<b>Tableau4.2</b> : Paramètres mécanique et hydraulique dans l’analyse. ....	82
<b>Tableau4.3</b> : Nature des matériaux avec valeur des perméabilités. ....	84
<b>Tableau4.4</b> : Valeurs des pressions interstitielles mesurées sur site et simulées (H =218m). .	86
<b>Tableau4.5</b> : Valeurs des niveaux d’eau mesurées sur site et simulées (H =218m). ....	86
<b>Tableau4.6</b> : Valeurs des pressions interstitielles mesurées sur site et simulées (H =209 m). .	87
<b>Tableau4.7</b> : Valeurs des niveaux d’eau mesurées sur site et simulées (H =209 m). ....	87
<b>Tableau4.8</b> : Valeurs des pressions interstitielles mesurées sur site et simulées (H =205m). .	87
<b>Tableau4.9</b> : Valeurs des niveaux d’eau mesurées sur site et simulées (H =205 m). ....	88

# **LISTE DES ABREVIATIONS**

CTPB : Le Comité Technique Permanent des Barrages.

PPI : Plan Particulier d'Intervention.

NNR : Niveau Normale de la Retenu.

NMR : Niveau Max de la Retenu.

# LISTE DES SYMBOLES

$V_a$  : 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.

$W_w$  : Le poids de l'eau.

$W_s$  : Le poids de la colonne du sol.

$W$  : Le poids total.

$\gamma_w$  : Le poids volumique de l'eau.

$\gamma_s$  : Le poids volumique des grains solides.

$\omega$  : La teneur en eau.

$n$  : La porosité.

$e$  : L'indice de vide.

$S_r$  : Le degré de saturation.

$H$  : La charge hydraulique.

$P$  : La pression de l'eau.

$V$  : La vitesse de l'écoulement.

$\rho$  : La masse volumique de l'eau.

$z$  : La cote du point considéré.

$g$  : L'accélération de la gravité.

$Q$  : Le débit d'écoulement.

$S$  : La section d'écoulement.

$i$  : Le gradient hydraulique.

$\Delta H$  : La perte de charge.

$\Delta L$  : La longueur de l'écoulement.

$\Delta S$  : La section moyenne.

$q$  : Le débit de fuite.

$K$  : La conductivité hydraulique.

$k$  : La perméabilité.

$h$  : Hauteur d'eau.

$d$  : Largeur en base du barrage diminué de  $0.7b$ .

$b$  : La distance qui correspond à la projection horizontale de la partie mouillée du même parement.

$\Delta$  : La distance entre A et B.

A : Section mouillée sur le parement aval du barrage.

$N_f$  : Nombre totale de canaux d'écoulement.

$N_d$  : Le nombre de carreaux entre les équipotentielles extrêmes.

H : La hauteur du barrage.

bc : Largeur en crête du barrage.

$m_1$  et  $m_2$  : La pente du talus amont et aval du barrage.

C : coefficient dépendant de la nature de sol.

$\Sigma L$  : Somme des distances verticales le long du chemin d'écoulement.

L : Distance horizontale parcourue par l'eau sous l'ouvrage.

$L_d$  : Longueur du drain.

$L_b$  : Longueur de la base du barrage.

$i_c$  : Le gradient hydraulique critique.

$S_s$  : Surface du sol saturé (%).

$S_{ns}$  : Surface du sol non saturé (%).

$W_n$  : Teneur en eau naturel.

$W_L$  (%) Limite liquide.

$W_p$  : Limite de plasticité.

$L_p$  : L'indice de plasticité.

$L_l$  : L'indice de liquidité.

# **INTRODUCTION GENERALE**

# Introduction générale

Les besoins en eau en Algérie comme dans la plupart des pays du monde ne cessent d'augmenter avec l'accroissement de la population et l'urbanisation. Constituer des réserves d'eau à l'aide de barrages est donc indispensable. Les ouvrages hydrauliques tels que les barrages en terre sont très utilisés pour la rétention des eaux, pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation et/ou pour la production hydroélectrique.

Représentant 70% des barrages dans le monde, les barrages en terre sont construits en matériaux locaux et ont la grande qualité de convenir aux fondations meubles qui ne peuvent supporter un ouvrage en béton [7]. C'est le cas, en Algérie, des barrages Hammam Boughrara, Sidi Abdelli, Cheffia, Guenitra, Beni Zid, Mexa, Zit El Emba, Fontaine des Gazelles, Deurdeur, Oued Cherrf, Foug El Gueiss, Ghrib, Bakhadda, Beni Amrane, El Agrem....

Cependant, ces ouvrages sont exposés à des désordres et des dommages qui peuvent aller des petites fissurations jusqu'aux fracturations pouvant engendrer la rupture de la structure.

La plupart de ces dommages sont liés à l'écoulement de l'eau à travers le massif du barrage et sa fondation qui va menacer la stabilité de l'ouvrage par l'influence de l'érosion interne ou externe. La maîtrise de ces écoulements est la principale préoccupation du concepteur en raison des dégâts induits par ce phénomène d'infiltration.

Ces infiltrations se produisent sous l'effet de la charge hydraulique créée par le réservoir lui-même. Elles doivent être étudiées sous deux aspects différents : d'une part, elles peuvent dégrader la stabilité de l'ouvrage s'il y a un manque de contrôle et aucune précaution n'est prise contre les risques provoqués par ce phénomène, d'autre part elles réduisent le volume d'eau emmagasiné et ne permettent plus de satisfaire les besoins.

Les statistiques montrent que l'infiltration est la cause principale de plus de 50% des dégâts graves sur les barrages en terre, par conséquent, l'étude et le contrôle des infiltrations sont nécessaires pour assurer la sécurité de l'ouvrage.

L'objectif général de notre travail est d'utiliser la méthode numérique des éléments finis pour analyser les paramètres des écoulements à travers un barrage en terre, le logiciel utilisé est GéoStudio version 2007.

## Introduction générale

---

Pour bien mener cette étude, ce mémoire est subdivisé en quatre chapitres :

Dans **le premier chapitre**, nous présentons une synthèse bibliographique portant sur les écoulements en milieu poreux. Après présentation des principales généralités sur les infiltrations à travers un barrage en terre, on définit les différentes méthodes qui permettent de déterminer le réseau d'écoulement dans un ouvrage en remblai notamment la méthode numérique des éléments finis.

Dans **le deuxième chapitre**, nous faisons un tour d'horizon sur les types des barrages en terre. Nous exposons, ensuite les différents types de risques que peuvent confronter les ouvrages en remblai. Nous présentons deux types de risques : Les risques de défaillance pouvant engendrer la rupture partielle ou totale de l'ouvrage et les risques liés à l'exploitation. La dernière partie de ce chapitre s'intéresse aux dispositions à prendre et les moyens de prévention des risques employés pour assurer la sécurité de notre barrage.

Dans **le troisième chapitre**, nous donnons une présentation du logiciel que nous avons utilisé en l'occurrence GéoStudio ainsi que les modèles de comportement employés dans les simulations numériques. Nous procédons, ensuite à une étude paramétrique par le module de calcul SEEP/W de GéoStudio afin de déterminer l'influence de certains paramètres comme la variation de la longueur du drain sur les écoulements dans les barrages en remblai notamment, le développement des charges hydrauliques, des pressions interstitielles, de la configuration de la ligne de saturation, et les variations des gradients hydraulique. Ce chapitre se termine par une étude comparative entre la méthode graphique et la méthode numérique sur le tracé de la ligne de saturation dans le massif d'un barrage homogène.

Le **quatrième et dernier chapitre** est consacré à une étude de cas. Nous commençons par donner une description générale sur le barrage SIKKAK suivi par des études paramétriques pour lesquelles nous déterminons la position de la ligne de saturation, la variation de la charge hydraulique et les pressions interstitielles pour trois niveaux d'eau en amont. Les résultats trouvés sont utilisés pour faire une étude comparative entre les valeurs déterminées par mesure sur site et celles obtenues par simulation numérique.

Le mémoire est clôturé par une conclusion générale et une synthèse des résultats obtenus.

# **CHAPITRE 1**

---

## **Etude de la filtration à travers la section d'un barrage en terre**

## 1.1 Introduction

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.

Ce problème peut être étudié par différentes méthodes telles que la méthode analytique et les méthodes numériques.

Dans ce premier chapitre nous allons présenter des généralités sur les écoulements dans les milieux poreux en exposant les différentes méthodes utilisées pour l'analyse et la détermination des réseaux d'infiltrations.

## 1.2 Généralités sur les milieux poreux

### 1.2.1 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 l'huile

### 1.2.2 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, huile [1]

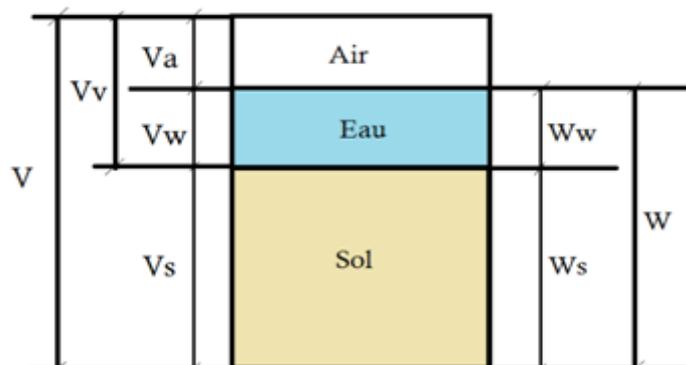


Figure 1.1 : Une portion du sol.

$V_a$  : 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

### b. Les poids

Ce sont les poids de chaque phase comme montré dans la figure [1]

$W_w$  : 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 : [1]

- *Le poids volumique humide* : C'est le poids de l'eau dans une portion d'un sol. [1]

$$\gamma = \frac{W_w + W_s}{V_a + V_w + V_s} \quad (1.1)$$

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

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_a + V_w + V_s} \quad (1.2)$$

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

C'est le poids réel des grains solide. [1]

$$\gamma_s = \frac{\text{Le poids des grains solide}}{\text{Le volume des grains solide}} = \frac{W_s}{V_s} \quad (1.3)$$

### d. La teneur en eau

Elle représente le rapport du poids de l'eau sur le poids des grains solide. [1]

$$\omega = \frac{\text{Le poids de l'eau}}{\text{Le poids des grains solides}} = \frac{W_w}{W_s} \quad (1.4)$$

### e. La porosité

C'est le rapport du volume de vide sur le volume total.[1]

$$n = \frac{\text{Le volume de vide}}{\text{Le volume totale}} = \frac{V_v}{V} \quad (1.5)$$

### f. L'indice de vide

Il représente le rapport du volume de vide sur le volume des grains solides. [1]

$$e = \frac{\text{Le volume de vide}}{\text{le volume des grains solide}} = \frac{V_v}{V_s} \quad (1.6)$$

### g. Le degré de saturation

C'est un gradient qui représente le rapport du volume de l'eau sur le volume de vide.  
[1]

$$Sr = \frac{\text{Le volume de l'eau}}{\text{Le volume de vide}} = \frac{V_w}{V_v} \quad (1.7)$$

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

### 1.2.3 Définition d'un sol

Un sol représente la couche superficielle, meuble de la couche terrestre, d'une épaisseur variable qui résulte de l'alternation de la roche mère et de la dégradation de la matière organique sous influence des phénomènes biologique (La faune du sol), physique et chimique. [2]

Le sol comporte trois phases : La phase solide, la phase liquide et la phase gazeuse.

### 1.2.4 Les phases du sol

#### a. La Phase solide

Qui se visualise sous forme de grains résultants de l'alternation de différents types de roches et formés de particules solides non cimentées de composition minéralogique variable (qui dépend de la roche mère) ; ces particules sont généralement classées en 4 catégories : Matériaux primaires, Matériaux secondaire, sel, Matière organique..[4]

## Chapitre 1 : Etude de la filtration à travers la section d'un barrage en terre

- *Les Matériaux primaires* : Ce sont des matériaux résiduels qui sont échappés lors de l'alternation, et leurs composition minéralogique na subit aucun effet de changement d'origine avec un trie granulométrique au coure du transporte (par l'eau, air...ect) au cours du phénomène de la sédimentation comme le quartz. [4]
- *Les Matériaux secondaires* : Ils résultent de la dégradation géochimique cela implique le changement dans la statue minéralogique qui peut être accompagné par une réduction de taille. Elle comportant divers matériaux argileux. [4]
- *Les Sels solubles* : Le résultant de l'alternation par hydrolyse transports des éléments chimiques tels que le magnésium (Mg), Le potassium (K), Le calcium (Ca)...ect ; qui peut demeurer ont constituant des nouveaux minéraux comme le carbonate ou elle quitte carrément le milieu.[4]
- *La matière organique* [4]

### b. La phase liquide

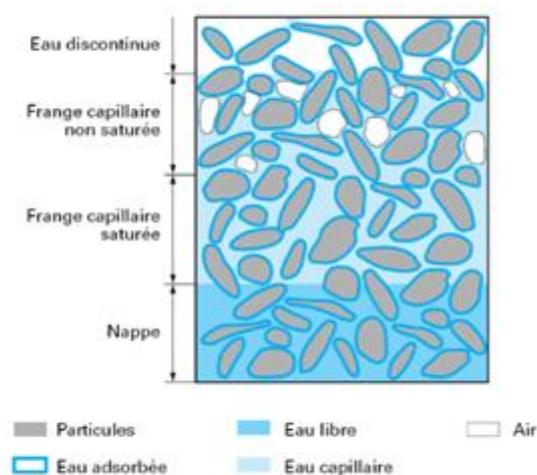


Figure 1.2 : L'eau dans une coupe verticale du sol.

Constitué par l'eau qui occupe les vides du squelette du sol, si elle remplit la totalité des interstices le sol sera donc saturé, si non partiellement saturé, cette eau dans la plupart des cas n'est pas pure : elle contient des électrolytes divisés on cations et aniants, des matières organiques en suspension, des gaz dissous.[4]

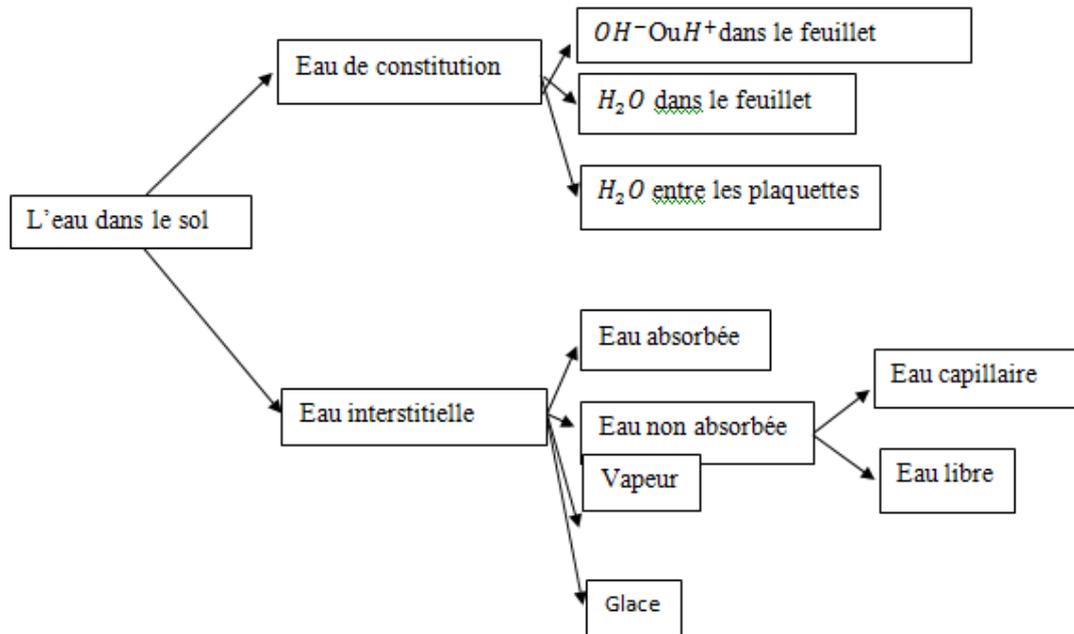


Figure 1.3 : L'eau dans le sol.

- *L'eau de constitution* : Elle existe dans la structure du minérale, sans oublier qu'elle est fixe sous la forme d'ions ( $\text{OH}^-$  et  $\text{H}^+$ ), cette eau n'a aucune influence sur le comportement du sol sauf si elle est soumise sous une température élevée de  $400^\circ\text{C}$ .
- *L'eau adsorbé* : Une eau a viscosité élevée qui est orientée par les forces d'attractions moléculaires.[4]
- *L'eau capillaire* : C'est une eau qui ne circule pas librement, rencontré dans les sols non saturés et reste en contact avec les particules dans les canaux fines du sol.[4]
- *L'eau libre* : L'eau gravitaire qui circule librement et qui obéit à la loi de DARCY dont sont effet sur le comportement du sol ce manifeste par une pression hydraulique, donc le cas dynamique (un écoulement) le charriage de matériaux fine est possible. Dans le cas des sels l'eau libre peut les faire dissoudre ou modifie leur compositions chimique.[4]

### c. La phase gazeuse

Dans les sols non saturés le reste des vides est remplis par du gaz, généralement un mélange de l'air de la vapeur, du gaz carbonique ou carrément un gaz sous forme de bulles.[4]

### 1.2.5 Les écoulements dans les milieux saturés [2]

La compréhension d'un phénomène en générale ne peut être effectuée que si l'on considère toutes les conditions de son milieu naturel. C'est le cas de l'écoulement dans les milieux poreux qui est complexe à cause de l'hétérogénéité, de la géométrie et la variation de la vitesse de l'écoulement.[2]

### 1.2.6 Lois générales

#### a. La charge hydraulique

Considérons un point situé dans un volume ou massif de sol avec un écoulement permanent qui traverse.[1]

$$H = \frac{p}{\gamma_w} + \frac{V^2}{2g} + z \quad (1.8)$$

P : la pression de l'eau

V : la vitesse de l'écoulement

$\gamma_w$  : Le poids volumique de l'eau

z : la cote du point considéré

g : L'accélération de la gravité

#### b. La vitesse de l'écoulement

Elle représente le rapport du débit sur la section de l'écoulement [1]

$$V = \frac{Q}{S} \quad (1.9)$$

#### c. Le gradient hydraulique

Par définition il représente le rapport de la différence de charge sur le trajet de l'eau dans le sol.[1]

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad (1.10)$$

#### d. La perméabilité

Elle désigne la capacité du sol de laisser passer un fluide, elle peut se déterminer au laboratoire ou in situ. [1]

### **i. Au laboratoire**

Nous avons 2 types d'essais qui s'appliquent sur un échantillon de sol saturé en mesurant le débit qui traverse le sol à une charge définie.[1]

- Essai à charge constante
- Essai à charge variable

### **ii. In situ**

- Essai de pompage [1]
- Essai de Lugeon[1]
- Essai de Lefranc [1]
- Essai de Nasperg[1]

### **e. Milieu homogène**

Un milieu homogène est un milieu qui garde les mêmes caractéristiques physiques et chimiques dans n'importe quel point donné.[1]

### **f. Milieu isotrope et anisotrope**

Un milieu isotrope est un milieu qui garde ses propriétés physiques et chimiques dans toutes les directions.[1]

### **g. Les lignes de courant**

C'est la trajectoire d'une gouttelette d'eau, elle est tangentielle au vecteur de la vitesse.[1]

### **h. La ligne équipotentielle**

C'est la ligne qui relie les points qui ont la même valeur de la charge hydraulique. [1]

### **i. La ligne équipression**

C'est la ligne qui relie les points qui ont les mêmes valeurs de pression. [1]

## **1.2.7 La loi de DARCY**

La Figure 1.4 montre une colonne de sol horizontale au travers de laquelle l'eau s'écoule sous un régime permanent de gauche à droite, entre deux réservoirs dont l'un est surélevé par rapport à l'autre.

## Chapitre 1 : Etude de la filtration à travers la section d'un barrage en terre

Les niveaux dans ces deux réservoirs étant maintenues constants, les hauteurs piézométriques s'alignent à des niveaux décroissants dans le sens de l'écoulement suivant une droite qui implique qu'il y a une perte de charge pendant l'écoulement. [3]

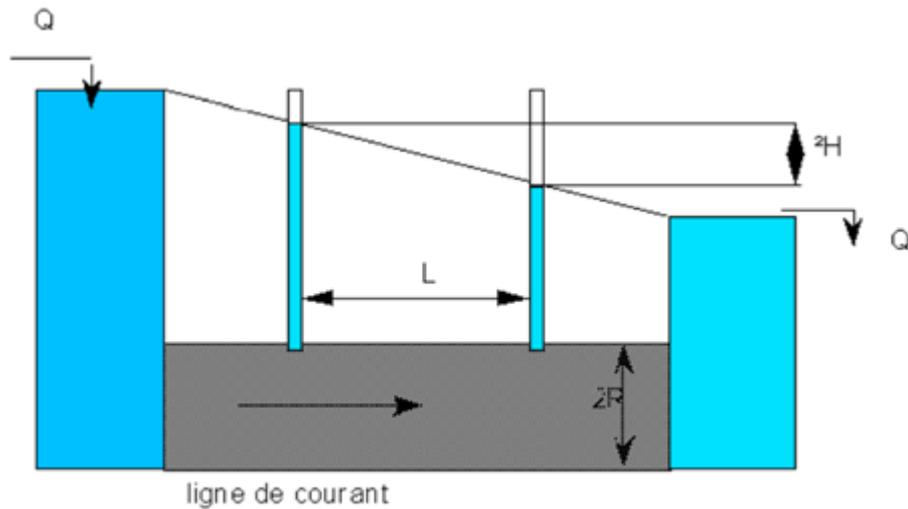


Figure 1.4 : Un schéma représentatif de la loi de DARCY.

L'infiltration à travers le corps d'un barrage en terre cause une perte d'eau dans la retenue et un risque d'instabilité dans la digue. L'étude de ce phénomène a pour buts de : [4]

- déterminer la ligne de saturation,
- le gradient hydraulique maximal
- et le débit de fuite.

Le calcul du débit de fuite est basé sur la loi de Darcy, sur la figure 1.5 la ligne phréatique passe de  $h_1$  à  $h_2$  d'où les expressions suivantes :

-La perte de charge :

$$\Delta H = h_1 - h_2 \quad (1.11)$$

-La longueur de l'écoulement

$$\Delta L = L \quad (1.12)$$

-La section moyenne

$$\Delta S = \frac{h_1 + h_2}{2} \quad (1.13)$$

-Le débit de fuite

$$q = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L} \quad (1.14)$$

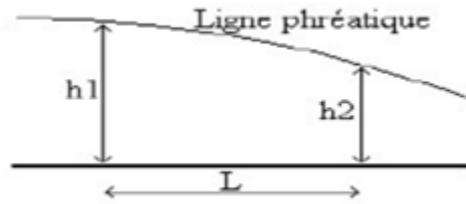


Figure 1.5: l'écoulement dans un sol.

-La loi de DARCY [3]

$$Q = i * A * k \quad (1.15)$$

i : le gradient hydraulique

A : La section de l'écoulement

K : la conductivité hydraulique

### 1.3 Infiltration à travers le corps du barrage en terre

Toute digue de barrage en terre représente un milieu poreux. Pendant l'exploitation, l'eau s'infiltré à travers le remblai, ce qui va créer un courant de filtration se dirigeant de l'amont vers l'aval. Ces infiltrations peuvent induire au cours du temps des phénomènes pouvant dégrader la stabilité du barrage tels que l'érosion régressive et les débits de fuite excessifs.

Il est nécessaire de réduire et contrôler les débits d'infiltrations pour assurer la protection de l'ouvrage contre les dangers d'instabilité. Donc il est impératif de connaître la position de la ligne de saturation et les valeurs des pertes par infiltration.

#### 1.3.1 La ligne de saturation

La ligne de saturation ou ligne phréatique est en pratique confondue avec la ligne le long de laquelle la pression hydrostatique est nulle. Elle représente le niveau de la surface libre dans le corps de l'ouvrage ou plus exactement elle sépare la zone humide de la zone sèche. On peut déterminer cette ligne par des méthodes graphiques telles que la méthode de Kozeny, par analogie électrique, ou par utilisation des méthodes numériques qui se sont largement développées. [5]

### 1.3.2 Ligne de courant et ligne équipotentielle

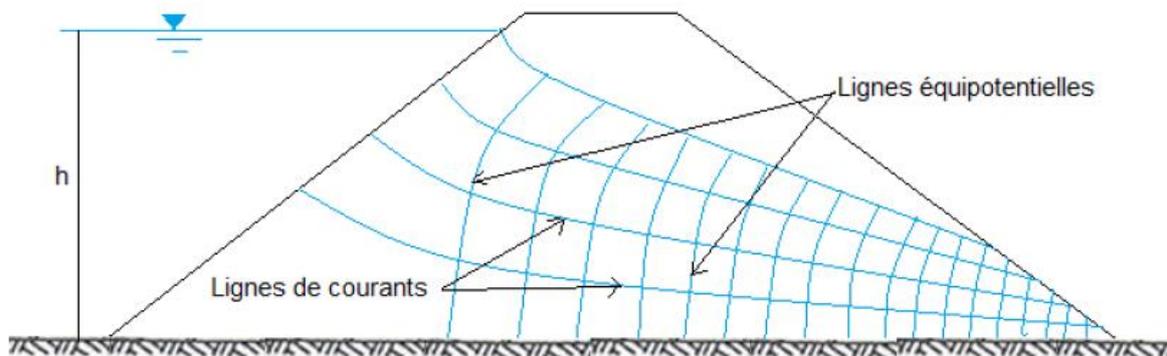
L'écoulement se caractérise par un réseau composé de lignes de courant et de courbes équipotentielles. Ce réseau nous permet de connaître en tout point du massif, la charge hydraulique, la vitesse et de déduire les valeurs des pressions interstitielles ou des débits de fuite dans une section donnée.

On appelle ligne équipotentielle l'ensemble de points d'égal potentiel hydraulique au sein du barrage et de fondation, elle forme avec les lignes de courant un réseau orthogonal. Les lignes de courant représentent les trajectoires d'écoulement, deux lignes voisines forment un tube de courant dans lequel le débit reste constant.

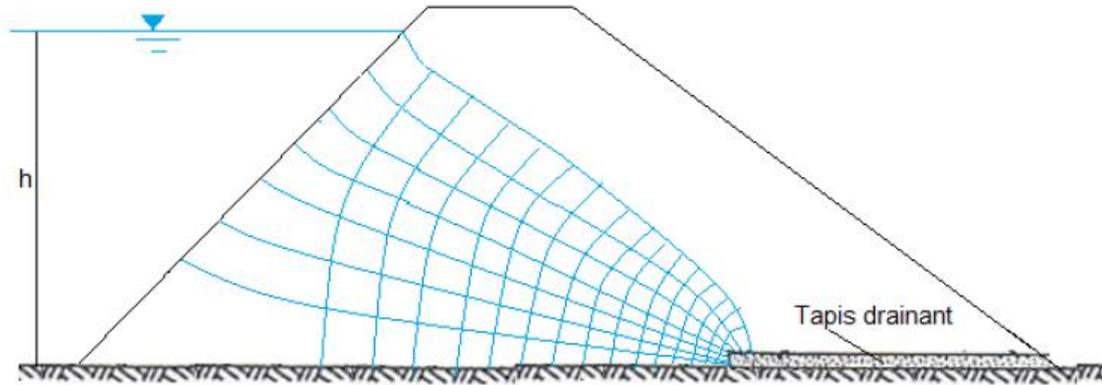
Pour tracer ce réseau on peut utiliser la méthode graphique en faisant appel aux propriétés géométriques du réseau quadratique et aux conditions aux limites qui sont :

- La ligne de saturation et la ligne au contact avec la fondation imperméable sont deux lignes de courant,
- Le parement amont est une équipotentielle,

On construit un certain nombre de côtes décroissant le long de la ligne phréatique. À partir de ces points, on trace les lignes équipotentielles perpendiculaires à la ligne de saturation et à la fondation imperméable. [6]

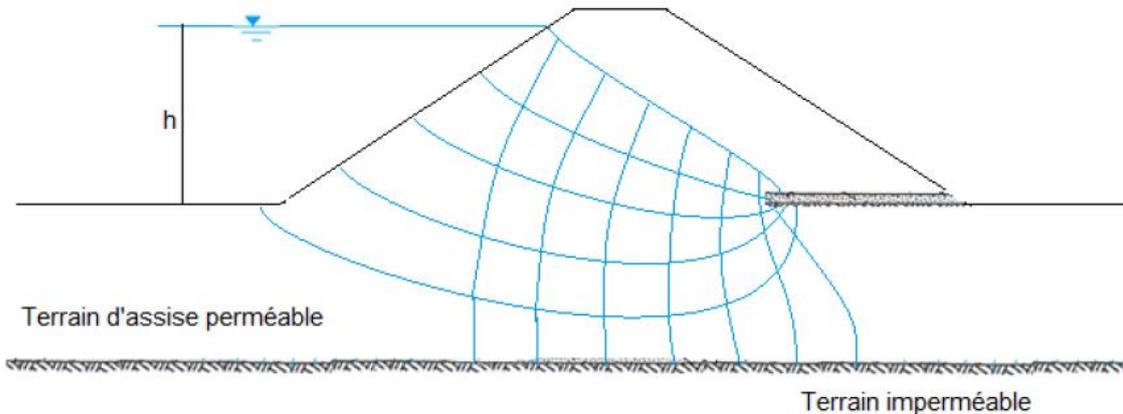


**Figure 1.6 : Tracé des lignes de courant et des lignes équipotentielles dans le cas de barrage homogène sur sol imperméable sans drains.**



**Figure 1.7 : Tracé du réseau d'écoulement pour un barrage en terre homogène avec un drain horizontal sur sol imperméable.**

Si la fondation est perméable sur une hauteur finie et que sa perméabilité est similaire à celle du corps du barrage, alors la ligne de saturation et la ligne limitant la partie inférieure de la couche perméable sont les lignes de limitation de courant qui constituent les frontières du système considéré (Figure 1.8). [7]



**Figure1.8 : tracé du réseau d'écoulement dans le cas de barrage homogène avec drain horizontal sur sol perméable de même perméabilité que le massif.**

Si l'écoulement traverse des couches de perméabilité différente, les lignes de courants réfracteront lorsqu'elles entreront en contact avec les surfaces de séparation des deux couches. Ils se resserrent lorsqu'ils pénètrent dans un matériau plus perméable ou se séparent dans un matériau moins perméable (Figure1.9). [7]

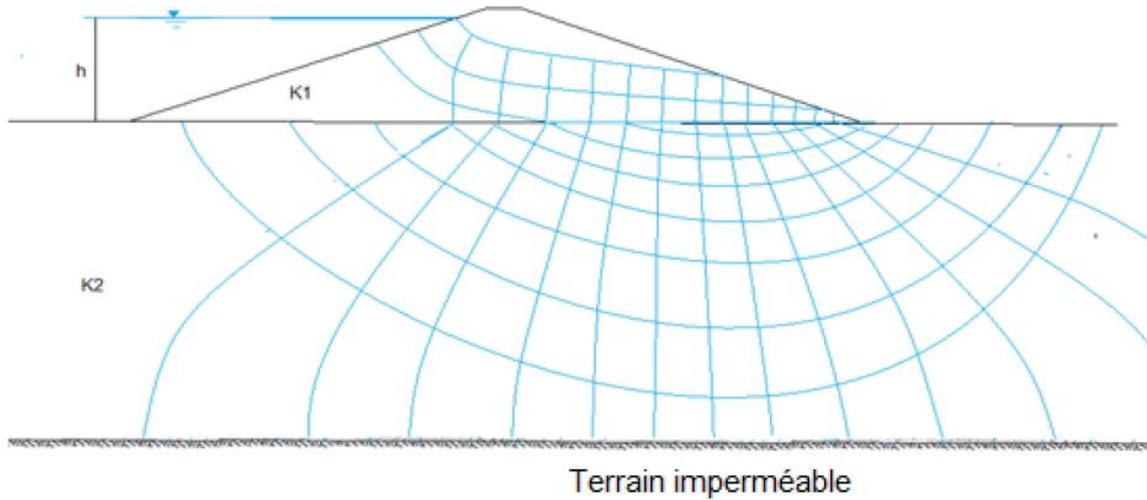


Figure 1.9 : Tracé du réseau d'écoulement dans le cas de terrain d'assise moins perméable que le massif ( $K1 > K2$ ).

Dans le cas d'une vidange rapide, le talus amont n'étant plus une ligne équipotentielle, son potentiel évolue selon le point considéré, la répartition des lignes est donc différente. [7]

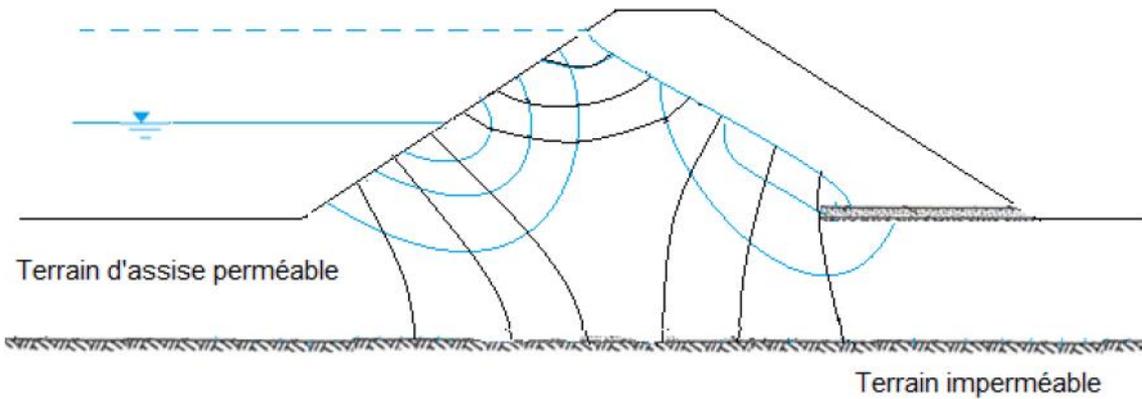


Figure 1.10 : Tracé du réseau d'écoulement dans le cas d'une vidange rapide.

### a. La pression interstitielle

La pression interstitielle  $P$  dans un barrage en terre représente la pression existante entre deux points de même potentielle, elle peut être déterminée à partir d'un réseau de lignes équipotentielles, sa forme générale s'écrit de la manière suivante :

$$P_m = (z_1 - z_2)\gamma_w \quad (1.16)$$

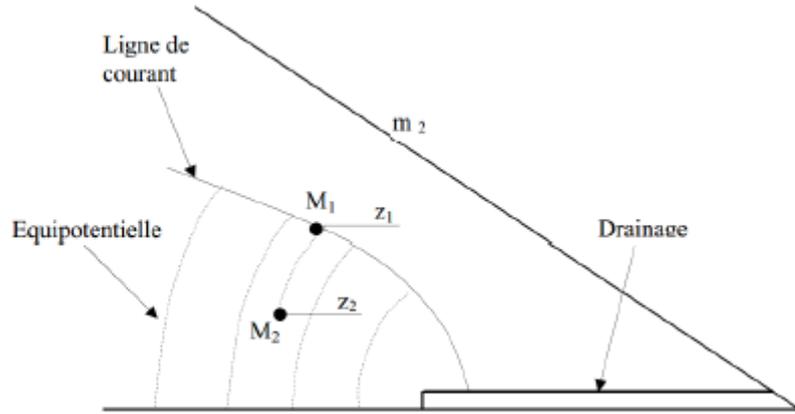


Figure 1.11 : Détermination de la pression interstitielle.

Une augmentation importante de cette pression signifie qu'il y a beaucoup d'eau dans le massif, il y a alors une grande possibilité d'apparition du phénomène de renards.

### b. Le débit de fuite

Le débit de fuite dû aux infiltrations peut s'obtenir à partir du réseau de lignes de courant orthogonales aux équipotentiels. Si ce débit est trop élevé, le volume d'eau de la retenue sera réduit et ne permettra plus de satisfaire les besoins. De plus, cela engendrera un risque d'instabilité du barrage.

Il peut être calculé par la formule suivante :

$$Q = K \cdot H \cdot \frac{N_f}{N_d} \text{ (Pour un milieu isotrope)} \quad (1.17)$$

Où :

$N_f$  : Nombre totale de canaux d'écoulement,

$N_d$  : Le nombre de carreaux entre les équipotentiels extrêmes,

K : Coefficient de perméabilité,

H : La charge Hydraulique (Amadou et al,1988).

La connaissance de ce débit nous permet de dimensionner les systèmes drainant du barrage.

### 1.4 Les méthodes de résolution des problèmes d'écoulement

#### 1.4.1 La méthode analytique

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. [8]

Elles sont utilisées en hydrogéologie dans les études de gestion et d'exploitation des nappes souterraines ainsi dans les problèmes liés aux eaux souterraines.

D'autre part on peut appliquer les méthodes analytiques pour l'analyse de la stabilité des barrages en remblai (barrages en remblai zonés), la plupart de ces méthodes sont basées sur le même principe, elles cherchent à déterminer des endroits dans le massif où les forces qui provoquent le glissement risquent de dépasser les forces stabilisatrices qui résistent, c'est-à-dire on cherche la surface de rupture qui donne la plus petite sécurité. [9]

Les méthodes analytiques suivantes sont le plus souvent utilisées :

- Surface de glissement circulaire :
  - Fellenius (1948)
  - Bishop (1955)
- Surface de glissement quelconque :
  - Janbu (1954)
  - Morgenstern-Price (1965)

#### 1.4.2 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 équipotentielles 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 avale. [7]

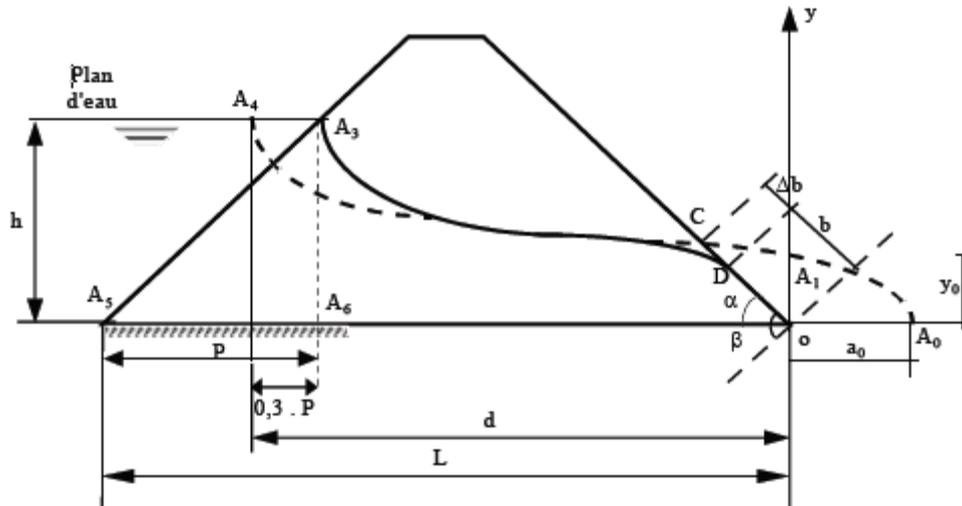


Figure 1.12 : Ligne de saturation selon Kozeny.

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.

### 1.4.3 La méthode analogique

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. [10]

### 1.4.4 La 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.

### 1.4.5 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.

### 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. [11]
- 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. [11]

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 [11].

- **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. [13]

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. [13]

## **1.5 Conclusion**

L'étude des écoulements d'eau dans le milieu poreux est un problème très complexe pour le géotechnicien et l'hydraulicien, mais avec des méthodes appropriées, ces écoulements peuvent être exprimés par des lois de la physique comme celle de Darcy qui représente la base de l'hydrodynamique souterraine. Diverses méthodes s'appliquent pour la résolution de ces problèmes, on peut citer: les méthodes analytiques, l'analogie électrique, méthodes numériques.

Aujourd'hui, les méthodes numériques, associées aux ordinateurs, ont connu un développement considérable, elles permettent la résolution de la quasi-totalité des problèmes physiques avec toute la précision souhaitée dans un temps raisonnable.

# **CHAPITRE 2**

---

## **Pathologie des barrages en terre**

### 2.1 Introduction

Les barrages sont parmi les grands ouvrages réalisés par l'homme pour assurer ses besoins vitaux et économiques et pour se protéger contre les catastrophes naturelles telles que les crues et les inondations.

Les barrages peuvent être classés en deux types :

- Les barrages rigides (barrages poids),
- les barrages souples : comme les ouvrages en remblai.

Les barrages en remblai sont des ouvrages très anciens. Ils sont réalisés par des matériaux meubles avec des caractéristiques très diverses. Ils peuvent reposer sur des fondations de qualité médiocre. La possibilité de choisir ce type de barrages par rapport aux autres dépend de la qualité et de la quantité de matériaux disponibles à proximité du site.

Le comportement d'un barrage durant son cycle de vie est très complexe puisqu'il est influencé par plusieurs événements et phénomènes pouvant affecter sa performance.

Le manque de rigueur dans l'inspection et le contrôle de ces phénomènes durant les différentes étapes de construction et dans la phase d'exploitation peut également engendrer des risques qui peuvent provoquer la rupture de l'ouvrage. Les possibilités d'avoir ces risques dans les barrages en remblai par rapport aux autres types sont très élevées. La principale cause de cette détérioration est l'érosion interne.

Dans ce chapitre nous allons donner un aperçu sur les différents risques que peuvent confronter un barrage en terre et les méthodes employées pour la protection de ces ouvrages contre ces risques.

### 2.2 Les types des barrages en remblai

Il existe plusieurs types, regroupés selon la nature des matériaux utilisés pour la construction et le système d'étanchéité employés :

#### 2.2.1 Les barrages en terre homogènes

Ils sont totalement construits avec un seul matériau suffisamment imperméable dont le rôle est d'assurer l'étanchéité et la stabilité de l'ouvrage. Sa structure est souvent complétée par un système de drainage pour la protection contre les infiltrations. Les pentes des talus sont douces, varient en fonction des caractéristiques du matériau utilisées, et par conséquent la hauteur de cette structure est relativement modeste.

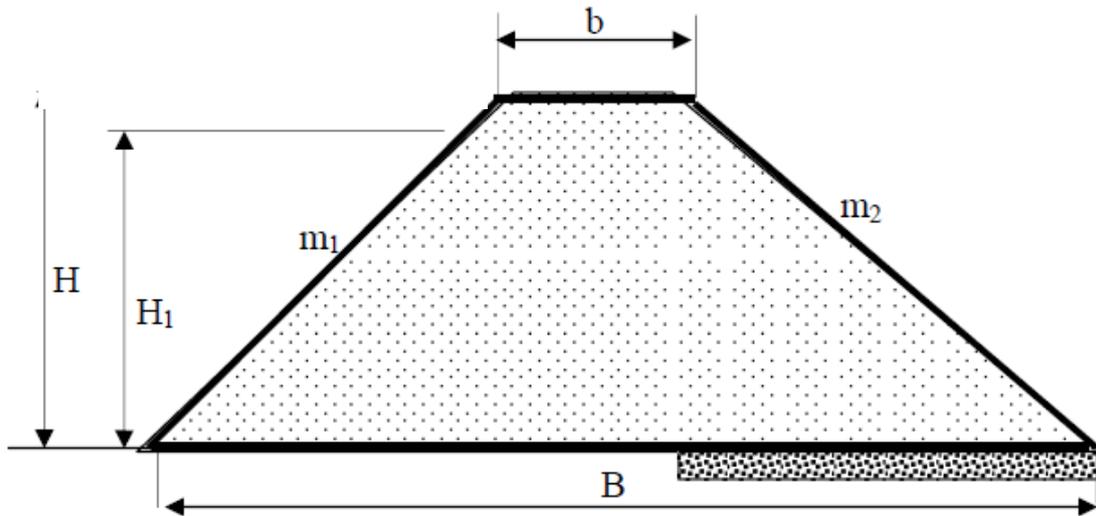


Figure 2.1 : Barrage en terre homogène.

### 2.2.2 Les barrages zonés

Dans le cas où la quantité des matériaux imperméables disponibles sur site est insuffisante, ou leurs caractéristiques géotechniques ne permettent pas d'envisager une digue homogène étanche, il est possible de concevoir un massif en plusieurs zones en utilisant divers matériaux disponibles, chaque zone est constituée d'un sol différent en fonction du rôle qu'elle doit assurer.

L'étanchéité de l'ouvrage est apportée par le noyau (vertical ou incliné) réalisé en matériau imperméable contenant une forte proportion de particules fines. Sa fonction principale est de contrôler l'écoulement à l'intérieur du barrage.

La fonction de stabilité est assurée par des recharges perméables réalisées en enrochements, ou en terre plus grossière.

À cause de la discontinuité entre la granulométrie du noyau et le corps du barrage, ils doivent être séparés par couches filtrantes relativement plus perméables que le noyau avec une granulométrie précisément étudiée. Ces dispositifs sont nécessaires pour la protection de l'ouvrage, ils permettent de retenir les particules du noyau et de la fondation pouvant être emportées par des forces de percolation.

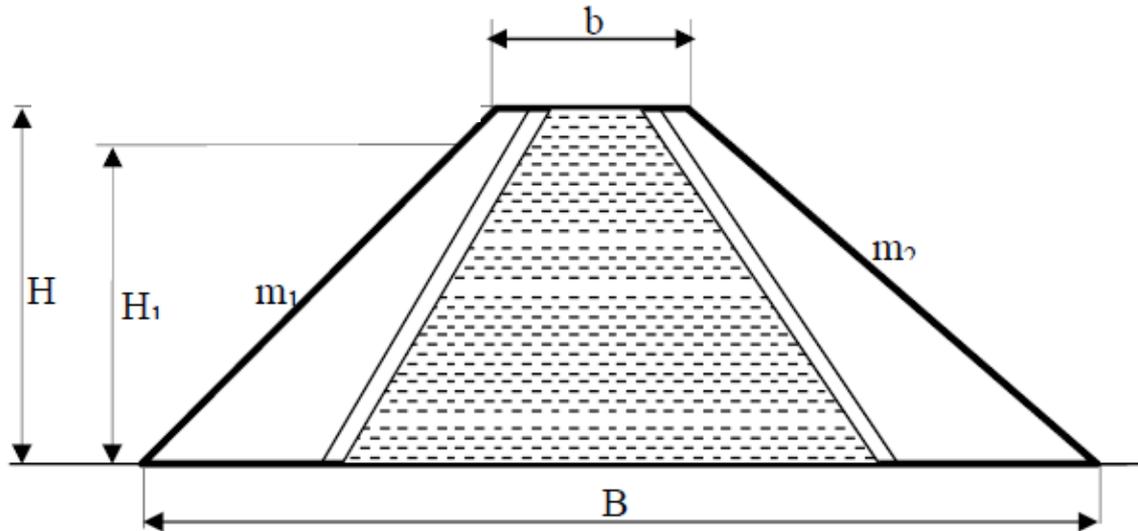


Figure 2.2 : Barrage en terre avec noyau centrale.

$H$  : La hauteur du barrage

$H_1$  : La hauteur d'eau

$m_1$  et  $m_2$  : La pente du talus amont et aval du barrage

$b$  : La largeur en crête du barrage

$B$  : La largeur de la base du barrage

### 2.2.3 Les barrages en terre à masque amont

Les barrages à masque sont réalisés en remblai perméable peu déformable assurant la stabilité d'ensemble, dans la majorité des cas en utilisent des enrochements.

L'étanchéité est obtenue par un écran imperméable, appelé masque, appliqué sur le parement amont de l'ouvrage, il est réalisé en biton, avec des produits bitumineux ou l'installation d'une géo-membrane. Ce masque doit être étanche sur toute la surface du massif.

NNR : Niveau normale de la retenu

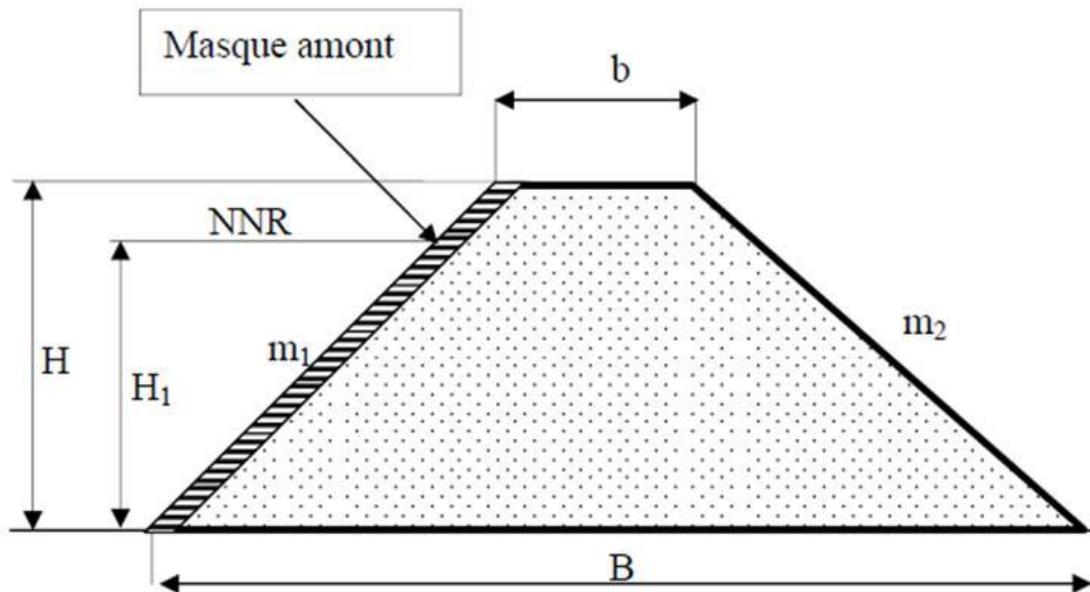


Figure 2.3 : Barrage à masque amont.

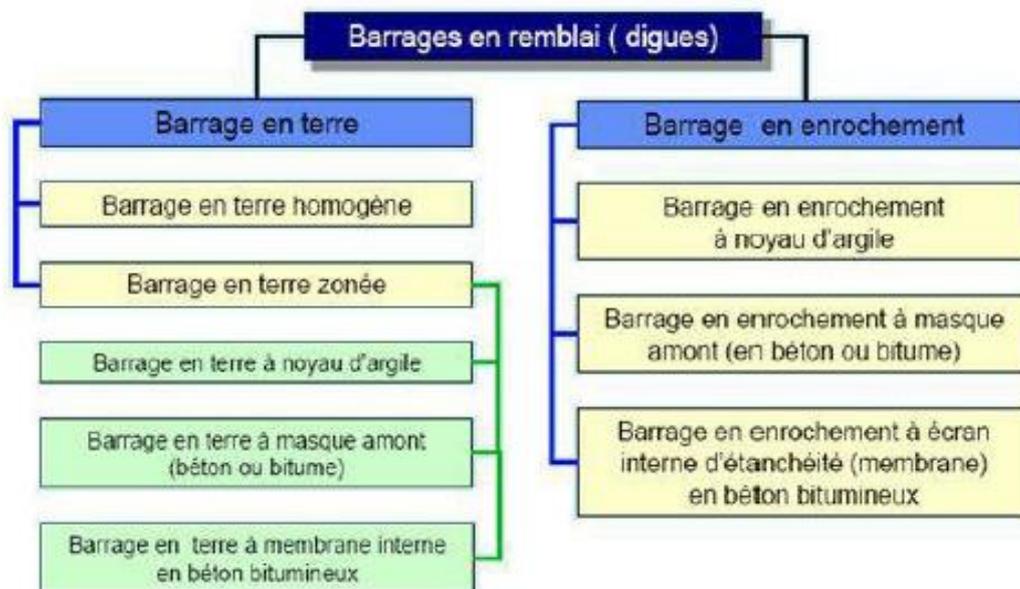


Figure 2.4 : Les différents types de barrage en remblai (EPFL 2002).

### 2.3 Les types des risques dans les barrages en terre

Il est possible de définir deux types de risques principaux :

- Les risques de défaillance partielle ou totale de l'ouvrage ;
- Les risques liés directement ou indirectement à l'exploitation courante de l'ouvrage.

### 2.3.1 Les risques de défaillances

La défaillance d'un barrage, peut engendrer sa destruction partielle ou totale. Les causes peuvent être diverses :

- **Techniques** : elles peuvent être :
  - Des vices de conception, de construction ou de matériaux ;
  - Un défaut de fonctionnement des vannes permettant l'évacuation des crues ;
  - Vieillessement du barrage.
  
- **Naturelles** : elles peuvent être :
  - Des crues exceptionnelles
  - Les glissements de terrain, soit de l'ouvrage lui-même soit des terrains entourant la retenue ;
  - Les séismes.
  
- **Humaines**
  - Insuffisance des études préalables et du contrôle d'exécution ;
  - Des erreurs dans la conception ou dans l'exploitation ;
  - L'insuffisance de la surveillance et de l'entretien

Les différents risques que peut affronter un barrage en terre sont:

#### a. L'érosion

Selon une analyse statistique réalisée sur des cas d'accidents et de rupture des barrages, l'érosion représente la principale cause de rupture, ce phénomène est défavorable pour ce type d'ouvrages, car il est très complexe et difficile à étudier puisqu'il dépend de nombreux paramètres.

Un barrage en terre doit répondre à deux fonctions principales l'étanchéité et la stabilité de la structure. L'érosion peut provoquer des changements importants dans les caractéristiques mécaniques et hydrauliques du sol. Ces modifications peuvent dégrader l'étanchéité, par l'augmentation de la perméabilité locale ou globale de l'ouvrage sans oublier l'affaiblissement de la résistance mécanique de la structure.

On distingue deux types d'érosion ; l'érosion interne et externe.

### i. L'érosion interne

L'érosion interne résulte du détachement et de la migration des particules des matériaux composant le remblai ou la fondation d'un barrage sous l'effet d'un écoulement d'eau. Ce processus ne se produit que si les particules du sol sont fines et qu'elles peuvent migrer à travers les vides du massif dont la granulométrie n'est pas uniforme et il ne se développe que si le filtre ne fonctionne pas convenablement. [14]

Ce procédé peut être la conséquence de la présence d'un chemin d'infiltration ou une erreur de conception (défaut de compactage, des conditions de filtres non respectées, réalisation inadéquate du dispositif d'étanchéité). Leurs mécanismes sont multiples et complexes et dépendent de la nature des matériaux et des conditions d'écoulement.

Selon (FOSTER, et al., 1999) on peut distinguer quatre phases :

- Initiation,
- Filtration,
- Développement des désordres,
- Brèche.

Selon la typologie IREX, huit phénomènes peuvent être initiateurs de l'érosion interne, on distingue : la boullance, la dissolution, le débouillage, l'érosion régressive, entraînement, exsolution, renard, la suffusion.

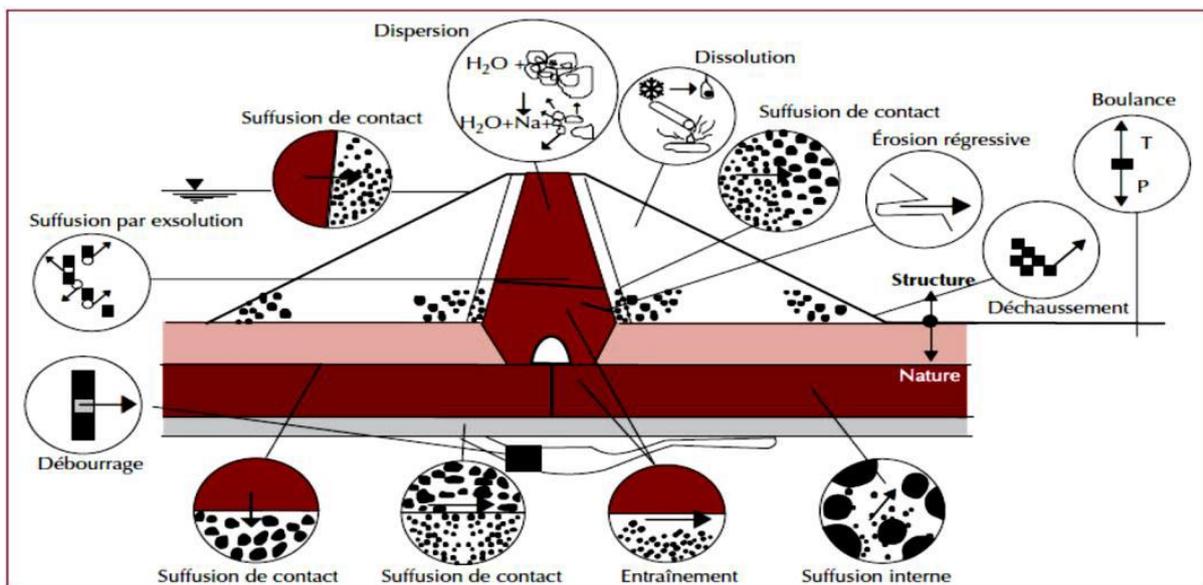


Figure 2.5 : Divers phénomènes initiateurs de l'érosion interne dans un barrage (Adapté de Schuler et Brauns 1996, cité par Blais, 2005).

### - Gradient hydraulique et vitesse critique de percolation

Les deux concepts fondamentaux du processus d'érosion interne sont le gradient hydraulique et la vitesse critique de percolation. Elles interviennent à toutes les étapes du détachement ou de la migration des grains. [15]

La vitesse de percolation est représentée par l'équation suivante:

$$v = k.i \quad (2.1)$$

Avec :

k : le coefficient de perméabilité de sol.

i : gradient hydraulique.

Lorsqu'il y a un arrachement de grains dans le sol, la vitesse de percolation est une vitesse critique pour le milieu traversé par l'écoulement. Ceci peut être atteint par une augmentation de perméabilité k ou une augmentation de gradient hydraulique i. Il est difficile de comprendre en détail les variations de la perméabilité et les pertes de charges au sein de massif d'un barrage en terre ou sa fondation. [15]

Donc le gradient hydraulique est le seul paramètre facile à quantifier. Si on peut définir que H une valeur déterminer à partir du projet (hauteur d'eau), la valeur de i dépend de la longueur de percolation L sur laquelle on peut agir.

Lane a démontré, qu'il existait une longueur critique de percolation en fonction de la nature des sols, donnée par formule ci-dessous :

$$C = \frac{(\sum L_v + \frac{1}{3}\sum L_h)}{H} \quad (2.2)$$

Avec :

C : coefficient dépendant de la nature de sol.

$\Sigma L$ : Somme des distances verticales le long du chemin d'écoulement.

L : Distance horizontale parcourue par l'eau sous l'ouvrage (le coefficient 1/3 tient compte du fait que la perméabilité horizontale est supérieure à la perméabilité verticale dans les sols alluvionnaires).

H : charge hydrostatique totale.

**Tableau 2.1** : Valeurs du gradient dépendant de la nature de sol (Lautrin, 2002).

Nature de sol	C (valeur max)
Sable très fin ou silt	8,5
Sable fin	7
Sable moyen	6
Sable grossier	5
Gravier fin	4
Gravier moyen	3,5
Gravier grossier et pierres	3
Galets, pierres et gravier	2,5
Argiles	2
Argiles raides	1,8

L'application de cette relation, bien qu'elle ne soit pas totalement extractible à la fondation d'un barrage en terre déformable, elle donne l'ordre de grandeur de la longueur de percolation susceptible de protéger la fondation du barrage du phénomène d'érosion interne, cette relation est largement utilisée. [15]

Ceci revient à définir un gradient hydraulique critique :

$$i_c = 1 / C \quad (2.3)$$

### ii. L'érosion externe

En cas d'évènements hydrologiques exceptionnels tels que les fortes précipitations, il peut arriver que le niveau d'eau du barrage s'élève au-dessus du niveau maximal de conception, le débit va dépasser la capacité d'évacuateur de crue et par conséquent une surverse sera produite sur la crête, ce qui va provoquer le développement de l'érosion externe du parement aval de l'ouvrage.

L'érosion externe est un phénomène créé par l'écoulement superficiel d'eau sur la crête du barrage, l'eau coule jusqu'au talus aval où elle va acquérir une forte vitesse et l'érode par arrachement des grains qui sont transportés vers le bas, et par conséquent la surface des talus sera endommagée. Ce mécanisme peut également conduire à l'établissement d'une brèche. [14]

Ce phénomène peut être dû à :

- Une erreur dans le dimensionnement ou un dysfonctionnement de l'évacuateur de crues,
- Une évaluation inadéquate des crues maximales possibles,
- Des tassements de la crête du remblai provoqués par des déformations du remblai ou de la fondation.

On distingue trois mécanismes d'érosion externe :

- Le mécanisme d'affouillement ;
- Le mécanisme d'érosion externe liée au courant et aux chocs d'embâcles
- Le mécanisme de surverse (du cours d'eau vers le val protégé) ;

### - L'affouillement

L'affouillement correspond à l'érosion externe du pied de la berge, puis à l'érosion du corps de digue si celle-ci est proche de la berge. Il se produit lorsque la vitesse de l'eau est importante. Avec le temps, le pied du talus commence à s'éroder progressivement, il en résulte un raidissement de la pente locale associé à l'affaiblissement des caractéristiques mécaniques. Ce mécanisme peut également conduire à la destruction partielle ou totale du remblai. [16]

Certains facteurs peuvent favoriser le mécanisme d'affouillement :

- La vitesse moyenne de l'eau le long du talus de digue
- Les perturbations hydrauliques locales. Ainsi des arbres, des piles ou toute construction sont la source de telles discontinuités hydrauliques.
- La nature et état de la protection du talus de la digue côté fleuve.

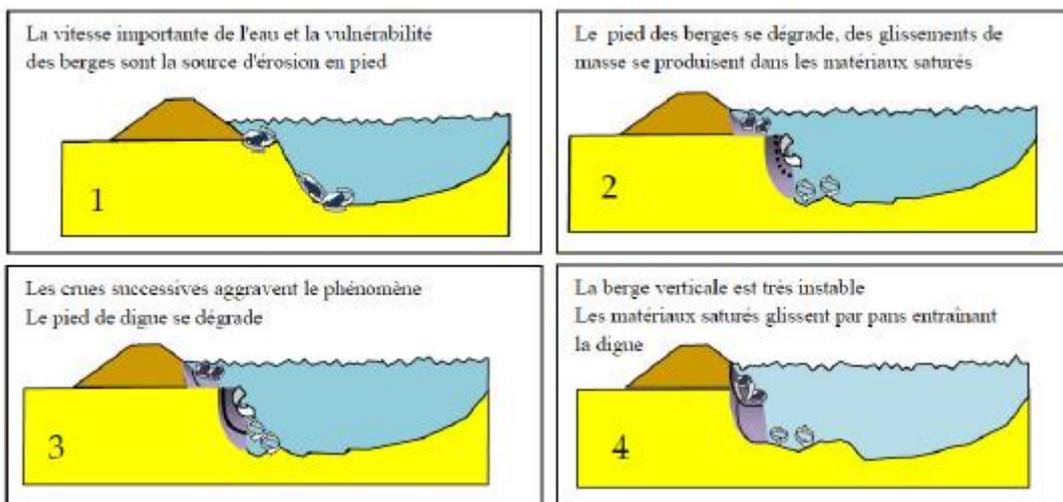


Figure 2.6 : le mécanisme de L'affouillement ( Mériaux et al, 2001).

### - Courant et chocs de corps flottants

Ce mécanisme est lié au courant et aux chocs de corps flottants. En période de crues, de nombreux corps flottants se font charrier comme les troncs d'arbres, ces corps peuvent heurter le talus amont de la digue, ce qui permettra le développement de l'érosion externe en créant des désordres significatifs pouvant même entraîner la rupture de la digue. [16]

### - La surverse

On parle de surverse lorsque l'eau déborde par-dessus la crête de la digue. Ce débordement peut éroder la surface externe du remblai jusqu'à la formation d'une brèche. Ce mécanisme s'amorce à partir du pied de talus aval et se propage vers la crête, il se déroule en deux phases : [16]

- Une phase d'érosion progressive : l'eau s'écoulant par-dessus des digues, érode la digue,
- Une phase d'érosion du basculent : le profil en travers de la digue ne résiste plus à la poussée de l'eau.

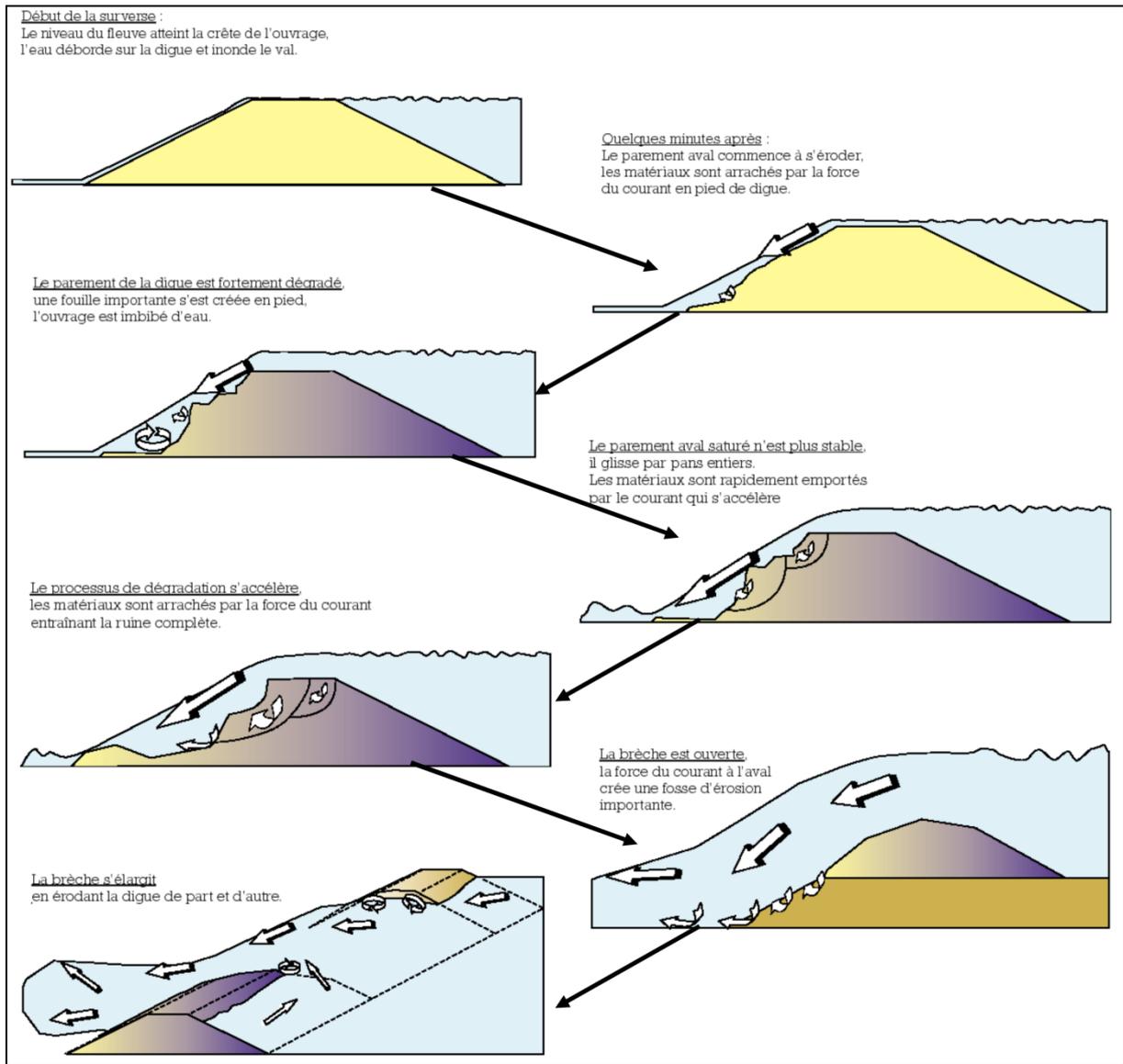


Figure 2.7 : Mécanisme de rupture par surverse (Mériaux et al, 2004).

### b. Le glissement

Le glissement désigne le détachement et le déplacement d'un volume de sol ou de matériau rocheux du corps du barrage et/ ou sa fondation, le long d'une pente sous l'effet des forces de gravité.

Les glissements surviennent généralement lorsqu'il y a une défaillance du système d'étanchéité, ou une augmentation des pressions interstitielles dans le remblai à la suite d'un défaut dans le système de drainage (colmatage, rupture). Il peut également intervenir lorsque la résistance est faible, à cause du développement du phénomène de l'érosion dans la structure. [17]

Il existe deux mécanismes de glissement :

- Le mécanisme de glissement du parement aval, se produisant le plus souvent durant la crue.
- Le mécanisme de glissement du parement amont, se produisant lors de la décrue.

### i. Le mécanisme de glissement du parement aval

Ce mécanisme est très dangereux puisqu'il se produit lorsque la retenue est pleine, ou dans le cas où le niveau d'eau est maximal ce qui conduit à l'occurrence d'une surverse sur la zone de glissement.

Le risque de glissement du talus aval apparaît lorsqu'il y a un développement excessif des pressions interstitielles qui peuvent engendrer une diminution des contraintes effectives, dans un cas extrême un cisaillement du remblai et/ou des fondations.

Les forces motrices dues au poids des terres au-dessus de la surface potentielle de glissement peuvent l'emporter sur les forces résistantes dues au frottement le long de la surface de rupture. La stabilité au glissement du parement aval peut alors en être affectée. [17]

D'après Fauchard et Mériaux (2004) quatre facteurs peuvent favoriser l'apparition du phénomène : les pentes du talus qui sont fortes (pentes supérieures à 2/3), une piézométrie élevée dans la digue due notamment à l'absence du drainage, la présence de couches hétérogènes et la faible compacité des matériaux de remblai.

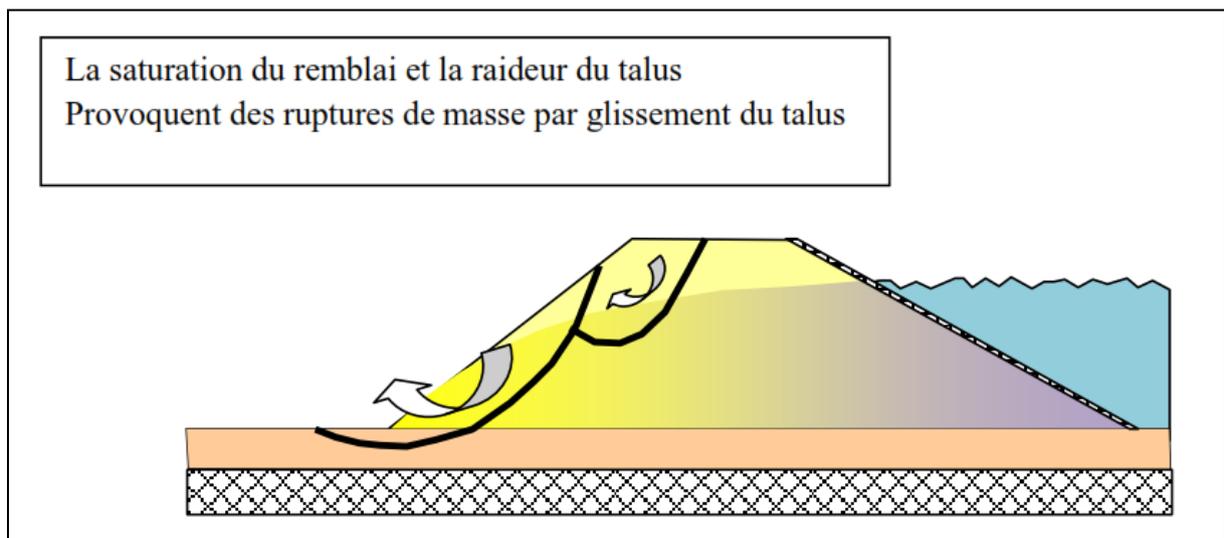


Figure 2.8 : Le mécanisme de glissement circulaire coté Aval en situation de crue. [ain zada].

### ii. Le mécanisme de glissement du parement amont

Le glissement du parement amont se produit lors d'un abaissement brutal du niveau d'eau. Ce mécanisme dépend des sous-pressions qui se produisent pendant la période de crue, concernant surtout des talus de digues constitués par des matériaux argileux, présentant des pentes raides. [18]

Lorsque le niveau d'eau est élevé le barrage est saturé en eau, d'importantes sous-pressions peuvent se développer lors de la baisse rapide du plan d'eau. Le parement n'est plus stabilisé par la pression de l'eau, et par conséquent les terrains saturés, se met à glisser, la figure illustre ce mécanisme :

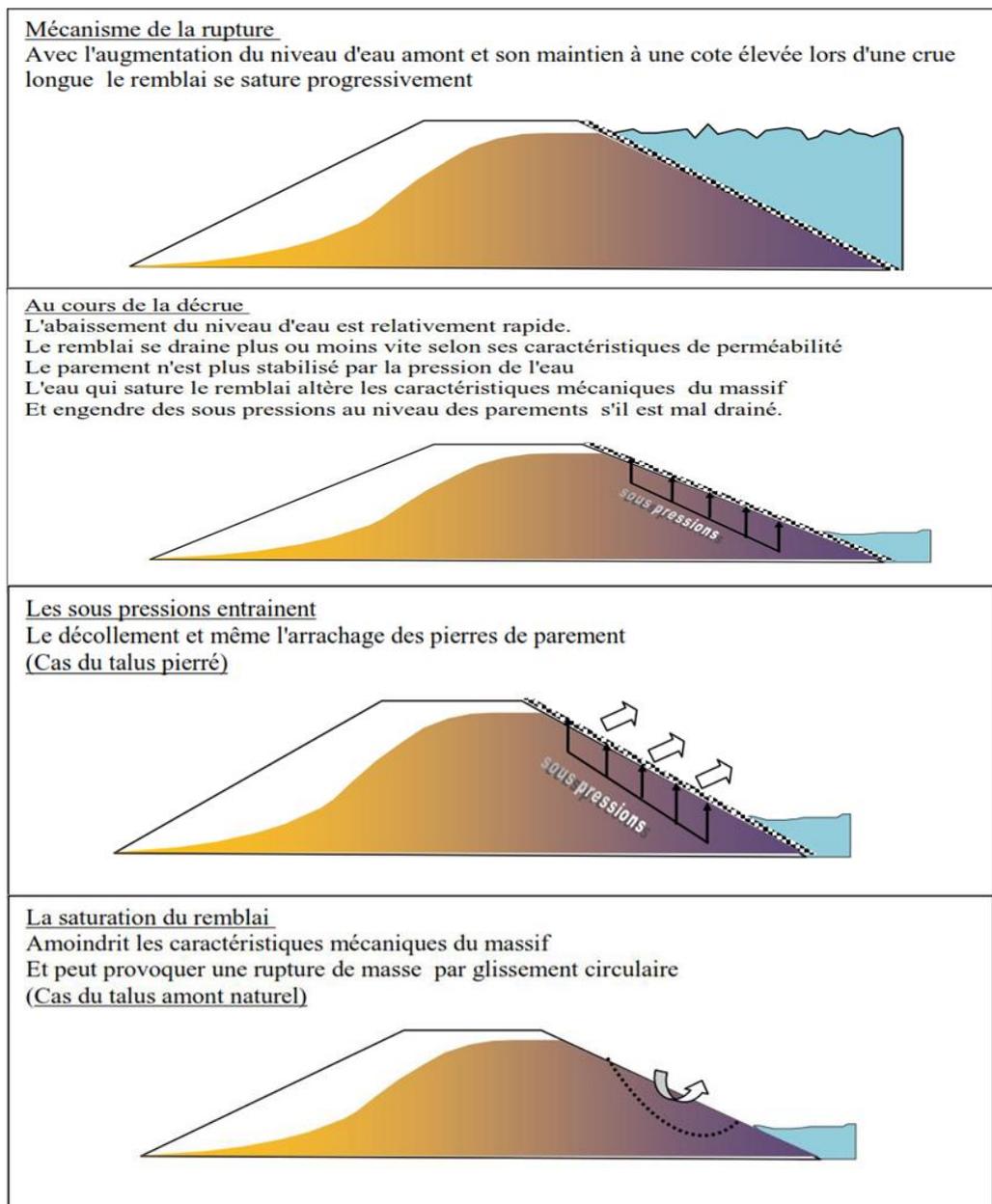


Figure 2.9 : Le mécanisme de glissement coté fleuve lors de la décrue (Mériaux et Al, 2001).

### c. Les Tassements

Les tassements dans les barrages en terre peuvent être des tassements du corps de la digue ou de la fondation, ils sont provoqués par les changements de contraintes totales ou effectives durant le cycle de vie de l'ouvrage.

Les tassements différentiels dans les barrages en remblai sont très dangereux puisqu'ils affectent la stabilité de l'ouvrage. Ils peuvent créer des fissures plus ou moins ouvertes ou prêtes à s'ouvrir sous l'effet de l'eau de la retenue, qui finissent par produire des infiltrations dans le corps de la digue. Ces tassements sont généralement dus à la fondation irrégulière et la compressibilité des différentes zones du remblai, ou aux compactages insuffisants à cause d'une construction très rapide.

Même après compactage le remblai, reste un matériau compressible, s'il s'agit d'un matériau argileux, les couches de base sont, soumises au poids des couches si la hauteur de de l'ouvrage est importante l'effet du tassement est élevé.

Un tassement significatif de la fondation, local ou généralisé peut réduire la revanche en crête d'ouvrage, et détruire ou endommager des conduites et des dispositifs de drainage situés à la base du remblai.

On peut considérer trois types de tassements :

- **Les tassements pendant la construction** : durant la période de réalisation, le corps du barrage peut subir des déformations provoquées par l'augmentation et le transfert des contraintes effectives lors de la construction par couches et aussi par l'effet de fluage. Ces déformations peuvent varier d'un ouvrage à un autre : selon la compressibilité des matériaux employés, la hauteur de l'ouvrage, etc. [19]
- **Les tassements lors du remplissage de la retenue** : la phase de la mise en eau est très importante dans la vie de l'ouvrage : c'est le moment où l'ouvrage est mis en charge et va donc être soumis à la pression exercée par l'eau. Durant cette période, on observe une accélération du tassement de la crête du barrage. [19]
- **Les tassements post-construction observés sur le long terme.**

#### 2.3.2 Les risques liés à l'exploitation

Ils sont liés directement ou indirectement à l'exploitation courante de l'ouvrage, il existe dans le monde un nombre impressionnant d'aménagements hydrauliques dont la performance est fortement diminuée par un élément qui a été mal estimé lors de la phase d'étude tel que la crue du projet, les apports solides. Le manque de rigueur dans la

surveillance et l'entretien augmente la possibilité du développement des risques (l'érosion interne et externe, tassement...) qui peuvent provoquer la rupture de l'ouvrage.

### 2.4 Dispositions à prendre

#### 2.4.1 La prévision du risque

L'estimation de la date de la rupture d'un barrage est impossible mais la prévision de son intensité et sa localisation est possible en réalisant une carte risque. [20]

- *Une carte risque* : Elle représente les zones menacées par les ondes de submersion qui résulteraient de la rupture totale ou partielle d'un barrage, elle est réalisée par simulation sur ordinateur. [20]

#### 2.4.2 Les moyens de prévention

Le Comité technique permanent des barrages (CTPB) doit obligatoirement donner son avis sur le dossier d'autorisation, le dossier préliminaire puis le dossier définitif réalisés par Le maître d'ouvrage, qui porte notamment sur les points suivants : [20]

- Choix du site et du type d'ouvrage
- Étude hydrologique déterminant la « crue de projet » ;
- Étude et traitement des fondations
- Conception des structures
- Condition d'exécution, choix du directeur de travaux et de son intérimaire
- Programme de mise en eau de l'ouvrage

Généralement pour les barrages de plus de 20 m de hauteur et 15 hm<sup>3</sup> sont soumis à un plan particulier d'intervention (PPI). [21]

- *Le plan PPI* : qui précise les mesures destinées à donner l'alerte aux autorités, aux populations, l'organisation des secours et la mise en place de plans d'évacuation. [22]

Depuis la mise en eau la surveillance de l'ouvrage est obligatoire, car la rupture d'un barrage est généralement précédée par des signes avertisseurs qui peuvent être détectés par :

- *L'inspection visuelle* : Pour déclarer une anomalie perceptible comme de nouvelles fuites, une turbidité élevée dans le drain, des fissures...etc., et pour quantifier les observations et prendre des notes et des photos. [23]
- *L'auscultation* : C'est de rendre l'anomalie visible par des calculs et de l'analyse car elle regroupe tous les dispositifs de mesure pour mettre en évidence le comportement de l'ouvrage à long terme.

## Chapitre 2 : Pathologie des barrages en terre

Tableau 2.2 : Les types de mesure et leurs instruments :

Les types de mesures	Les instruments
<b>La turbidité</b>	Le turbidimètre
<b>Pression interstitielle</b>	Manomètre des cellules interstitielle
<b>Le tassement</b>	Les Tasso-mètre
<b>Le débit des fuites</b>	Une venturi, Mesure volumétrique
<b>La température</b>	Thermomètre
<b>Nappe phréatique</b>	Piézomètre
<b>Chimie des eaux de percolation</b>	Analyse au laboratoire

Remarque : L'inspection visuelle et l'auscultation sont complémentaires

- *Les essais périodiques* : nécessaires on cas où l'un des ouvrages annexes rencontre un problème dans son fonctionnement comme la vidange de fond.

La réalisation du plan (ORSEC) est nécessaire, il dépend de l'ampleur de l'événement et qui a pour but la protection et la sécurité civile. [24]

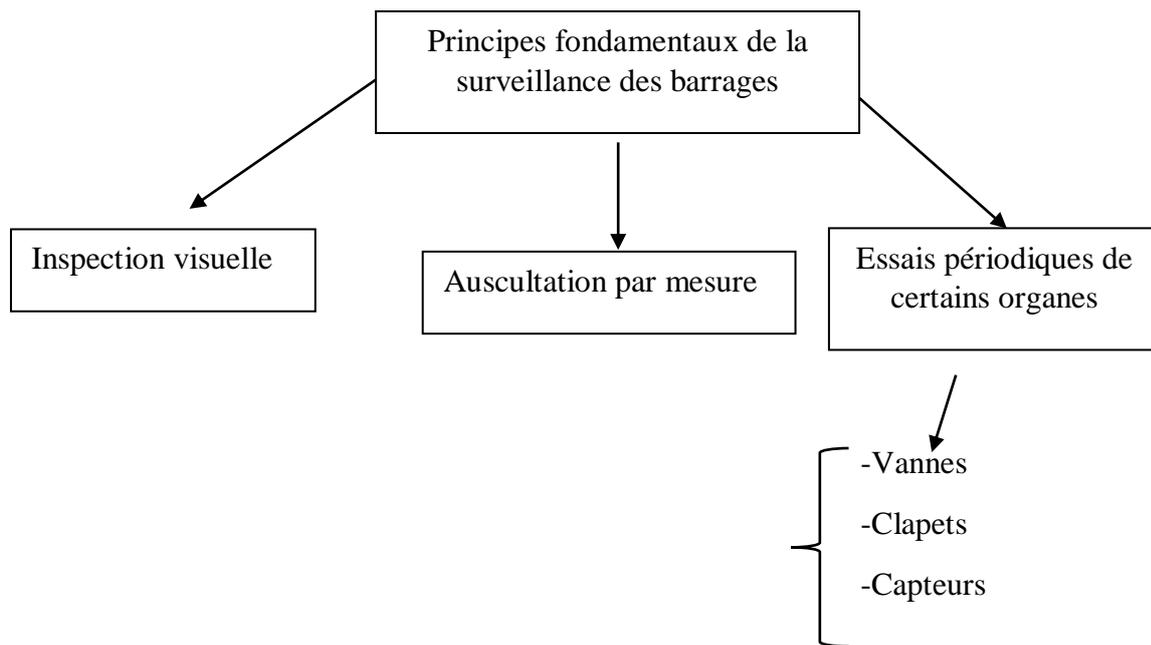


Figure 2.10 : Principes fondamentaux de la surveillance des barrages. [22]

### 2.5 Conclusion

La sécurité des barrages repose en premier lieu sur leur bonne conception, sur la compétence de leurs exploitants, et sur les moyens qu'ils mettent en œuvre pour s'assurer de leur bon fonctionnement et leur protection contre les différents risques.

## **Chapitre 2 : Pathologie des barrages en terre**

---

Ces risques peuvent engendrer la destruction partielle ou totale du barrage, les mécanismes de ces désordres sont complexes, puisqu'ils mettent en jeu de nombreux phénomènes indépendants dont l'étude est interdisciplinaire.

La surveillance et l'auscultation d'un barrage est un point très important de la vie de ce dernier, car ils permettent de déceler toutes sortes d'anomalies pouvant affectés la sécurité de l'ouvrage.

# **CHAPITRE 3**

---

## **Analyse des paramètres des écoulements dans un barrage en terre.**

### 3.1 Introduction

La modélisation numérique par différentes techniques et en particulier par la méthode des éléments finis connaissent depuis une vingtaine d'années un développement considérable dans différents domaines. Ce développement a permis de chercher des solutions beaucoup plus réalistes et plus générales pour des problèmes complexes dans des temps raisonnables.

Aujourd'hui, les méthodes numériques, associées aux ordinateurs puissants permettent de résoudre la quasi-totalité des problèmes physiques convenablement formulés et ceci avec toute la précision souhaitée.

La méthode des éléments finis, par son caractère très flexible, permet la résolution de problèmes très variés dans différents domaines de la science et de la technologie notamment en hydraulique.

Dans ce chapitre, nous donnons une présentation de l'outil de simulation que nous avons utilisé « GeoStudio » avec une étude paramétrique sur l'influence des dimensions du drain sur les écoulements dans un barrage en terre, suivi par une comparaison entre la méthode graphique et numérique avec une analyse de quelques paramètres d'écoulements à savoir : les pressions interstitielle, le gradient hydraulique et le débit de fuite.

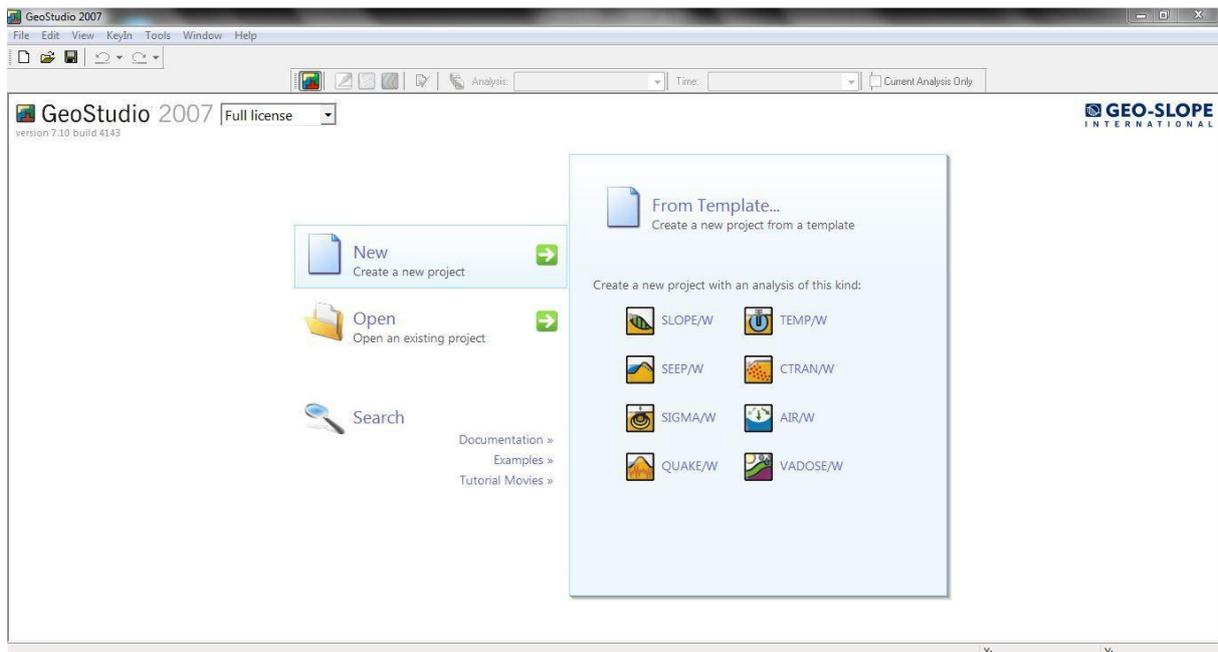
### 3.2 Présentation du logiciel

**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.



**Figure 3.1 : Interface de Géo Studio 2007.**

GeoStudio est un outil intégré de modélisation constitué par huit modules (logiciels) SLOPE/W, SEEP/W, SIGMA/W, QUAKE/W, TEMP/W, CTRAN/W, AIR/W et VADOSE/W). Chaque module est spécifique à un certain type d'analyse mais peuvent interférer entre eux. Ces modules sont:[25]

✓ ***SLOPE/W. Analyse de la stabilité des pentes :***

Permet l'analyse de la stabilité des pentes et le calcul des coefficients de sécurité au glissement d'un talus naturel ou artificiel par les méthodes de calcul de stabilité classiques.

✓ ***SEEP/W. Modélisation de l'infiltration des eaux :***

Est utilisé dans les domaines de modélisation par éléments finis des écoulements des fluides et les pressions interstitielles dans les milieux poreux, par exemple, la modélisation des écoulements à travers les barrages, dans les routes, à travers les sites d'enfouissement, autour des rivières, etc.

✓ ***SIGMA/W. Analyse de contrainte - Déformation***

Permet l'analyse des contraintes et des déformations linéaires élastiques ou non linéaire élasto-plastique des structures en terre.

✓ ***QUAKE/W: Analyse dynamique -Tremblement de terre***

Analyse dynamique des structures en terre soumises à des secousses sismiques, forces dynamiques et ou charge d'impact soudain.

✓ ***TEMP/W: Analyse de géothermie***

Analyse des changements thermiques dans le sol en raison de facteurs environnementaux ou de constructions tels que les bâtiments ou les pipelines.

✓ ***CTRAN/W: Modélisation du transport de contaminant***

Modélisation du mouvement des contaminants à travers des matériaux poreux et analyse du suivi des particules simples en réponse au mouvement de l'eau.

✓ ***AIR/W: Modélisation de l'interaction Eau-Air***

Modélisation par éléments finis de l'interaction des eaux souterraines à l'air dans les matériaux poreux.

✓ ***VADOSE/W: Analyse d'impact des conditions environnementales***

Analyse de l'impact des conditions environnementales, à travers la surface du sol, modélisation de l'infiltration du sol en raison des pluies et analyse des problèmes complexes par la modélisation de modèle sophistiqué considérant la fonte des neiges, la transpiration des racines ,l'évaporation de surface, les eaux de ruissellement et la formation de flaques d'eau et de diffusion de gaz.

	<b>SLOPE/W™</b>	Slope stability analysis.
	<b>SEEP/W™</b>	Groundwater seepage analysis.
	<b>SIGMA/W™</b>	Stress-deformation analysis.
	<b>QUAKE/W™</b>	Dynamic earthquake analysis.
	<b>TEMP/W™</b>	Thermal analysis.
	<b>CTRAN/W™</b>	Contaminant transport analysis.
	<b>AIR/W™</b>	Air flow analysis.
	<b>VADOSE/W™</b>	Vadose zone and soil cover analysis.

Figure 3.2 : Les modules du logiciel Geostudeo 2012.

### 3.2.1 Etapes de la modélisation avec GeoStudio

La modélisation par le logiciel GeoStudeo se fait selon les menus et les étapes suivantes :

#### a. Définir les analyses

Cette fonction est nécessaire pour définir le problème et pour créer l'espace de travail de notre problème.

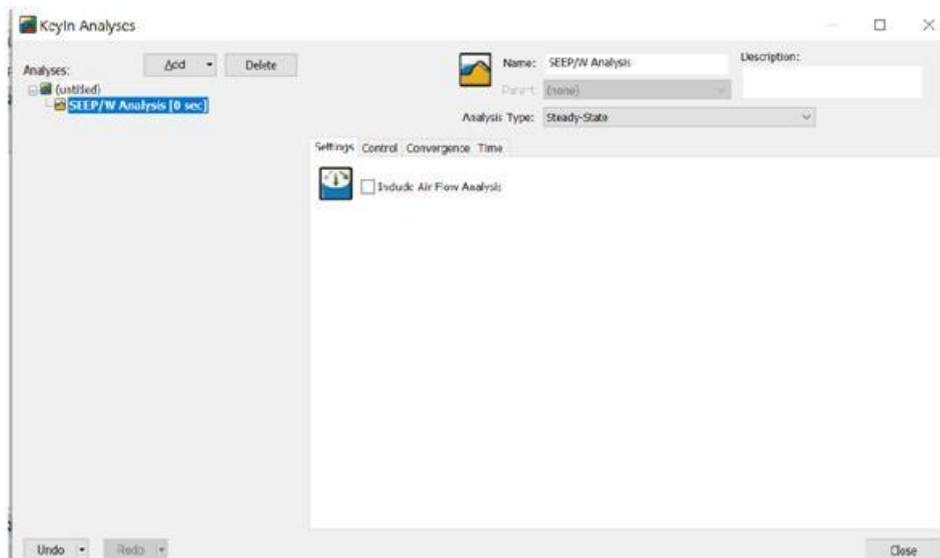


Figure 3.3 : La fenêtre d'analyse de la fonction SEEP/W (version 2007).

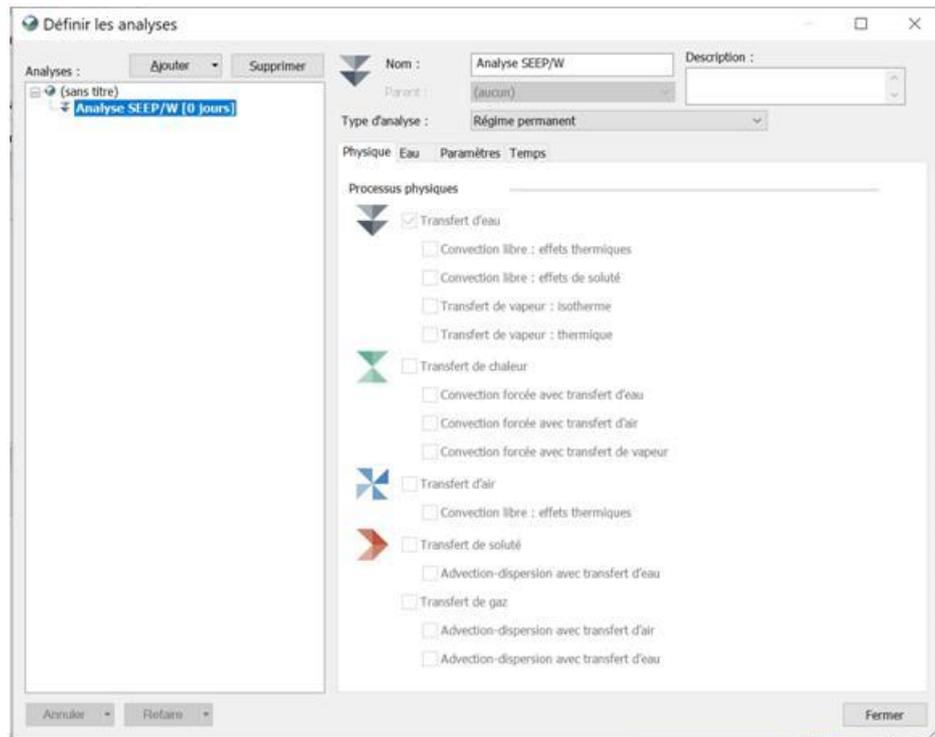


Figure 3.4 : La fenêtre d'analyse de la fonction SEEP/W (version 2018).

### b. Set ou Afficher

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

### c. Sketch ou Esquisser

Elle regroupe tous les outils d'esquisse : ligne, polylines, arc...etc.

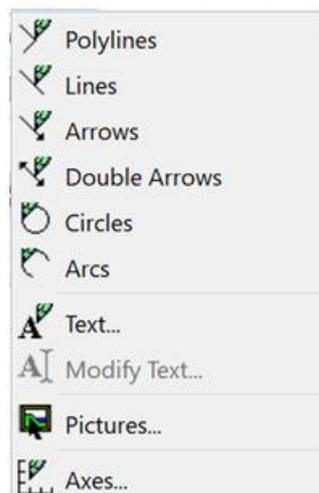


Figure 3.5 : les outils de sketch (version 2007).

### d. Draw ou Dessiner

Elle représente les outils de dessin : région, génération des éléments finis, conditions aux limites, matériaux...etc.

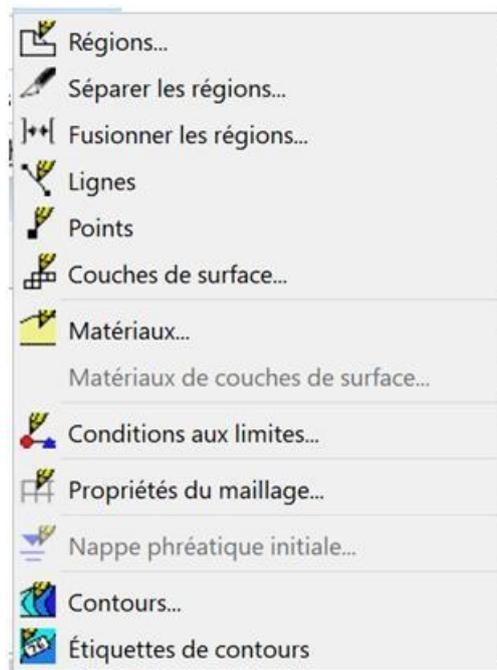


Figure 3.6: les outils de dessin (version 2018).

### e. KeyIn ou Définir les matériaux

Avec ce menu on peut définir les matériaux avec des paramètres spécifiques comme la perméabilité, le poids volumique... et affecter ces matériaux aux différentes régions.

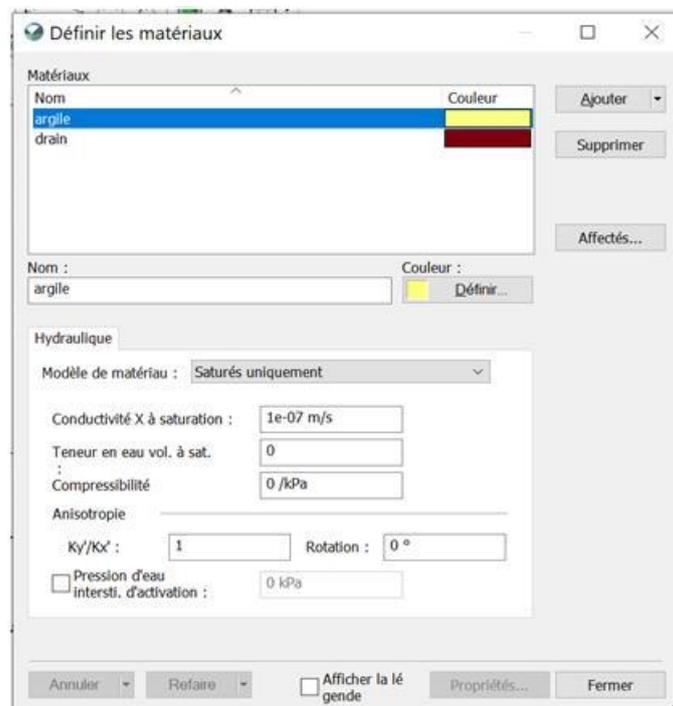


Figure 3.7 : la fenêtre de la définition des matériaux (version 2018).

### f. Boundary conditions ou les conditions aux limites

Dans cette étape, nous pouvons définir les différentes conditions aux limites et les affecter aux nœuds, aux lignes ou aux éléments concernés.

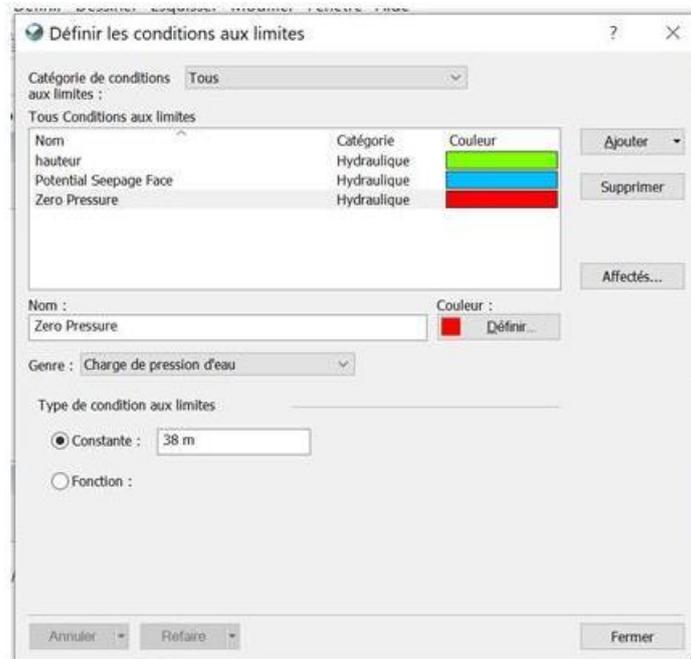


Figure 3.8 : la fenêtre de la définition des conditions aux limites (version 2018).

### g. Le maillage

La définition du maillage est nécessaire dans toute modélisation par éléments finis. Pour la version que nous avons utilisé (student\_lisence) le nombre maximum de mailles doit être inférieure à 500.

La figure (3.9) représente un exemple d'étude sur un barrage homogène doté d'un drain, avec un maillage.

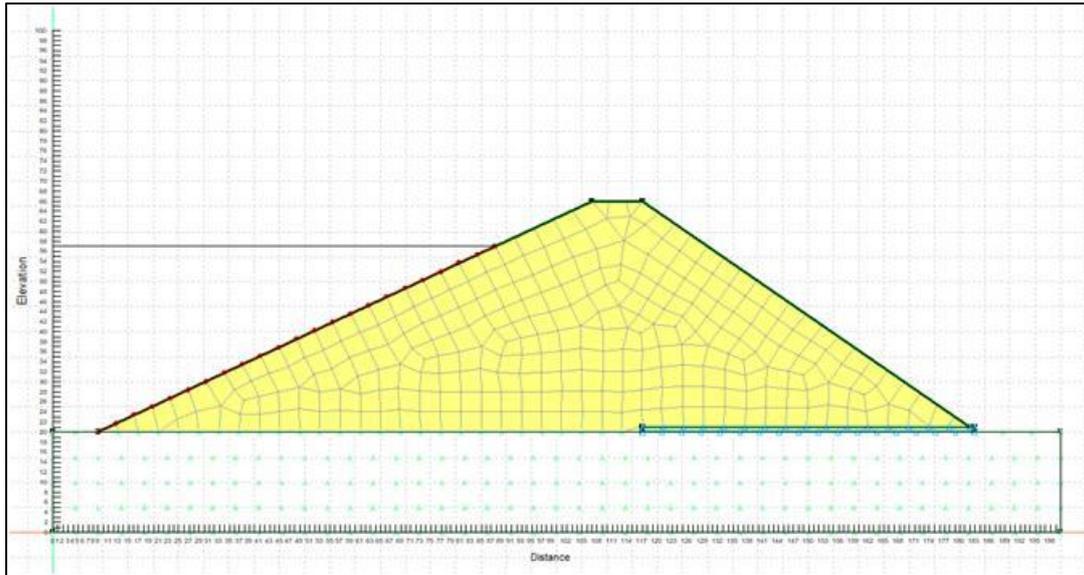


Figure 3.9 : Exemple d'étude d'un barrage homogène, l'étape du maillage (version 2018).

### h. La simulation

Après introduction de toutes les données nécessaires, le logiciel procède à une vérification de la cohérence de ces paramètres et conditions et affiche, le cas échéant, les erreurs ou anomalies des données introduites. Si le nombre de ces erreurs est égal à zéro le calcul pourra alors commencer.

### i. Visualisation des résultats

Après l'exécution, une nouvelle fenêtre est créée. Le logiciel est doté d'une interface graphique performante permettant de visualiser les résultats sous différentes formes et avec plusieurs options d'affichage. Il est possible aussi d'exporter les résultats vers d'autres fichiers pouvant être exploités par d'autres logiciels.

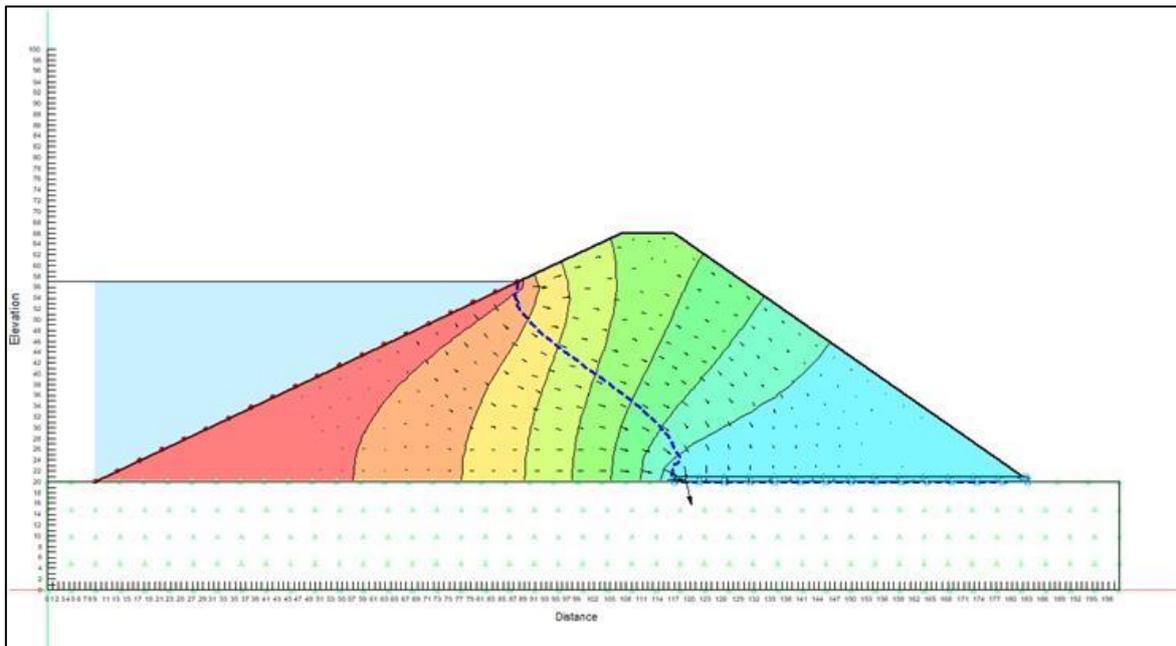


Figure 3.10 : Visualisation de la ligne de saturation dans un exemple d'étude (version 2018).

### 3.3 Etude paramétrique

#### 3.3.1 Etude de l'influence des dimensions du drain horizontal sur l'infiltration

Le but principal de cette partie est d'essayer de déterminer et de comprendre le degré d'influence du drain horizontal sur l'infiltration dans un barrage homogène en milieu isotrope.

La figure (3.11) représente le profil géométrique typique du barrage avec matérialisation de trois points sur lesquels l'analyse sera engagée.

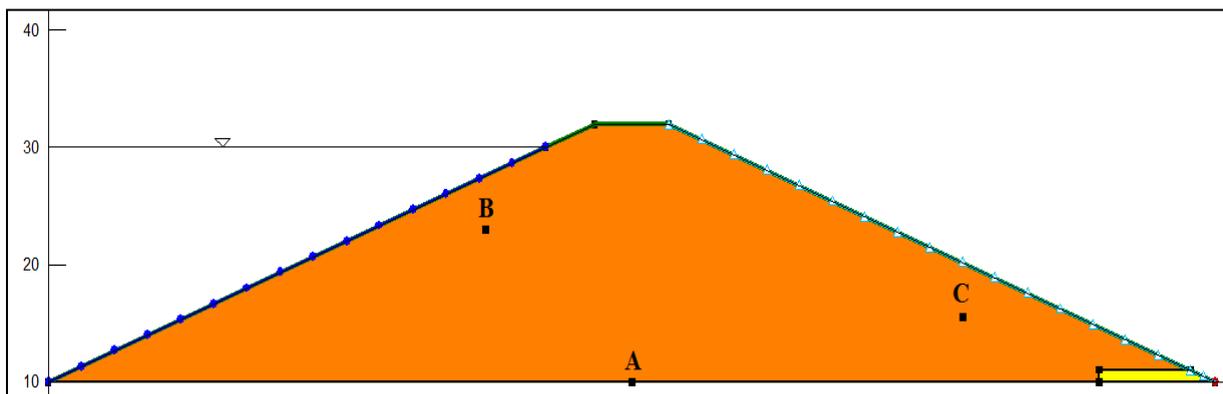


Figure 3.11 : Profil de référence.

Tableau3.1 : Caractéristiques du barrage.

La hauteur du barrage H(m)	22
Largeur en crête du barrage bc(m)	7,5
La pente du talus amont m1	1/2,5
La pente du talus avale m2	1/2,5
Le niveau d'eau dans la retenue h(m)	20
Perméabilité (recharge) K (m/s)	$10^{-8}$
Perméabilité (drain) K (m/s)	$10^{-4}$

L'analyse est faite pour des variations des longueurs des drains allant de 11 m à 58 m.

Les résultats graphiques de la modélisation sont présentés pour chaque cas sous forme de champs des charges hydrauliques, trajectoire de la ligne de saturation, ainsi que la variation de la pression interstitielles selon l'axe verticale.

Ld : Longueur du drain.

Lb : Longueur de la base.

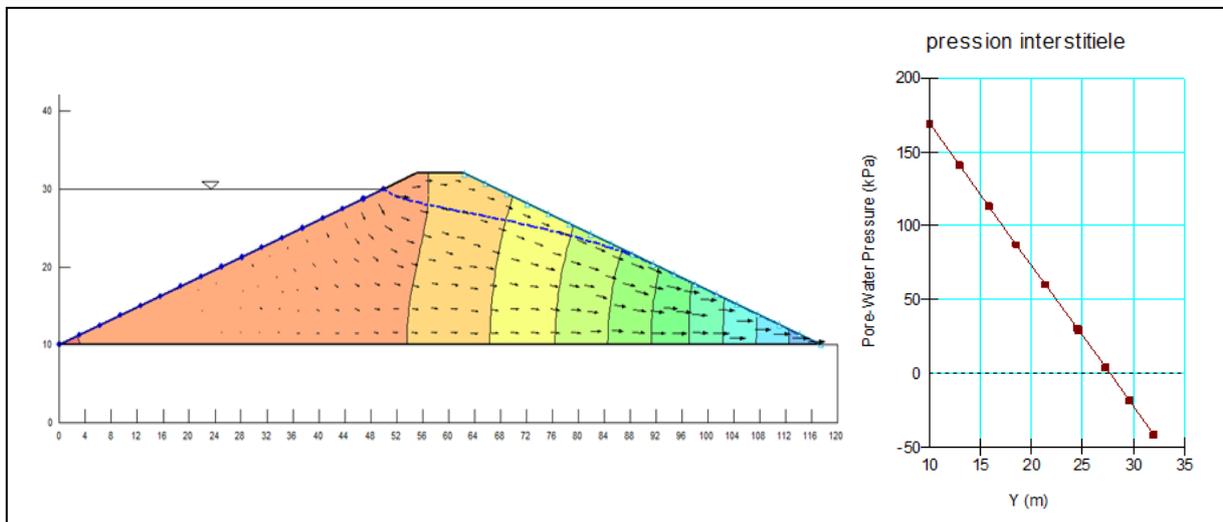


Figure 3.12 :Résultat de la simulation Ld = 0 Lb (sans drain).

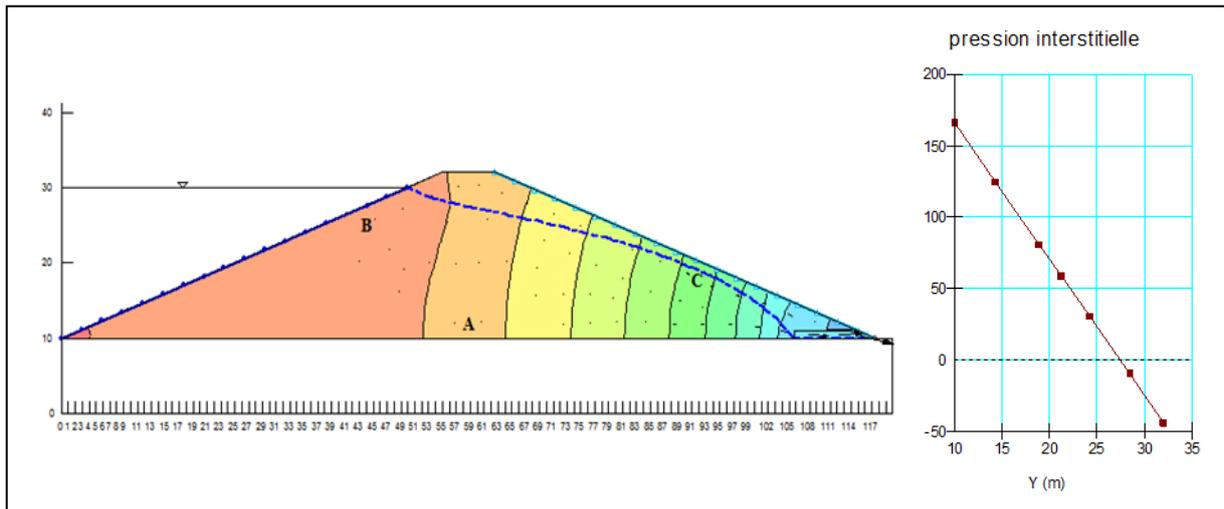


Figure 3.13 : Résultat de la simulation  $L_d = 1/10 L_b$ .

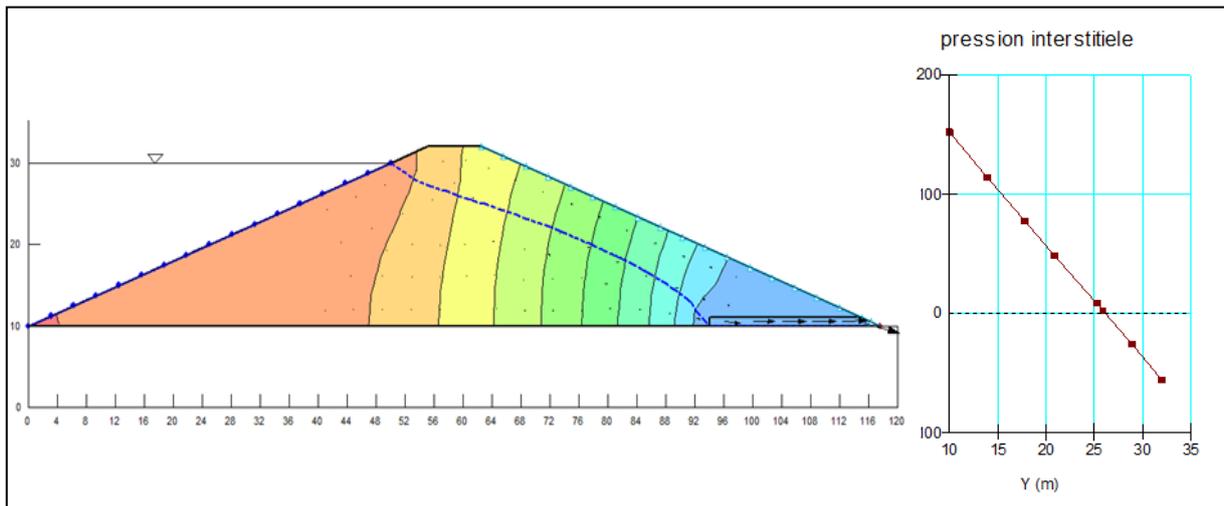


Figure 3.14 : Résultat de la simulation  $L_d = 1/5 L_b$ .

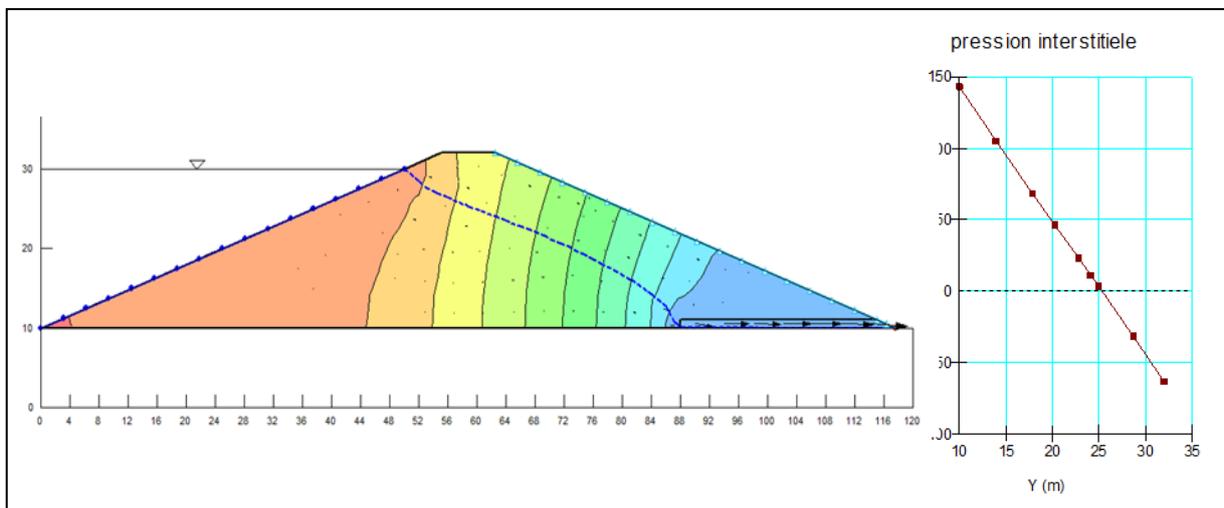


Figure 3.15 : Résultat de la simulation  $L_d = 1/4 L_b$ .

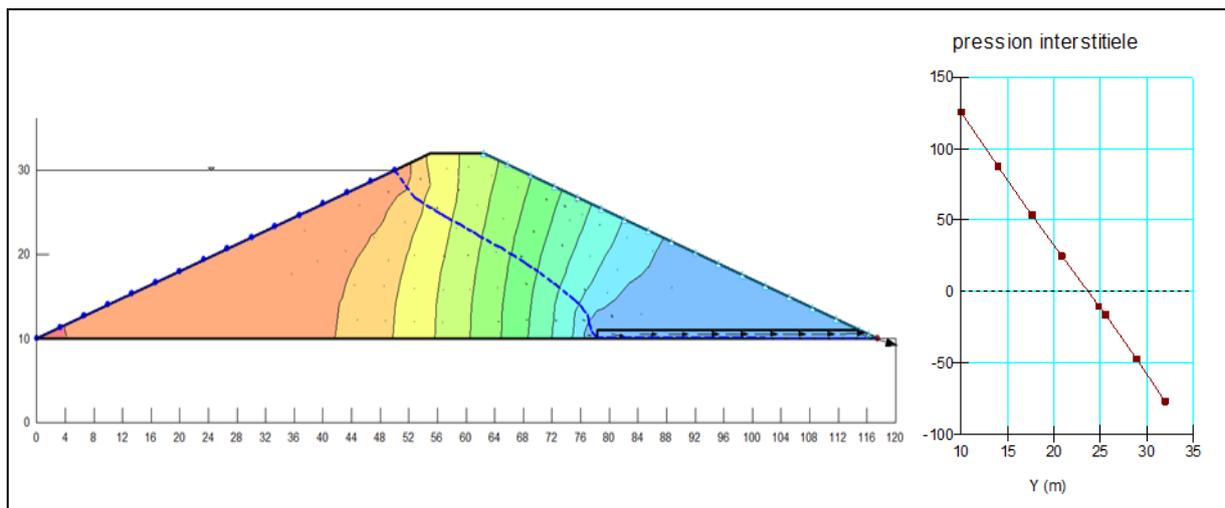


Figure 3.16 : Résultat de la simulation  $L_d = 1/3 L_b$ .

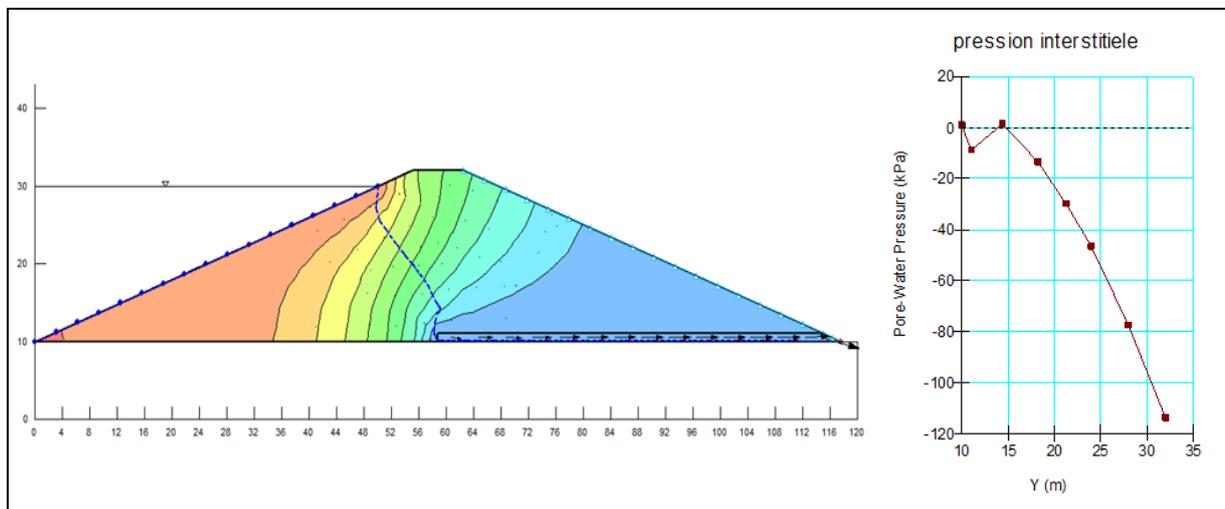


Figure 3.17 : Résultat de la simulation  $L_d = 1/2 L_b$ .

Le tableau suivant donne pour chaque longueur du drain les pressions interstitielles et le gradient hydraulique.

### Chapitre 3 : Analyse des paramètres des écoulements dans un barrage en terre

**Tableau 3.2 :** Valeurs de la pression interstitielle, et le gradient hydraulique en fonction de la longueur du drain pour les trois points.

	<b>Ld/Lb</b>	<b>0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,25</b>	<b>0,33</b>	<b>0,5</b>
	Longueur du drain Ld (m)	0	11,75	23,5	29,5	39,2	58,75
<b>A</b>	Pression interstitielle(Kpa)	169,252	166,362	151,814	143,143	125,55	93,8
	Gradient hydraulique $i$	0.153	0,170	0.255	0.305	0.413	0.841
<b>B</b>	Pression interstitielle(Kpa)	64,083	63,722	61,284	59,838	56,921	44,872
	Gradient hydraulique $i$	0.110	0,119	0,178	0,209	0,28	0.577
<b>C</b>	Pression interstitielle(Kpa)	42,846	30,730	-22,987	-40,211	-48,622	-51,679
	Gradient hydraulique $i$	0,339	0,389	0,473	0.372	0.154	0.1

Le tableau (3.3) donne pour chaque longueur du drain respectivement les surfaces du sol saturé, et les débits de fuites évacués.

**Tableau 3.3. :** Valeurs de la surface du sol saturé, et la variation de débit de fuite en fonction de la longueur du drain.

<b>Ld/Lb</b>	<b>0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,25</b>	<b>0,33</b>	<b>0,5</b>
<b>Longueur du drain Ld (m)</b>	0	11,75	23,5	29,5	39,2	58,75
<b>Surface du sol saturé (%)</b>	92,82	87,49	74,13	68,5	60,23	44,9
<b>Débit de fuite (m<sup>3</sup>/s)</b>	2,20E-08	3,9133E-07	5,8375E-07	6,9634E-07	9,2833E-07	1,7665E-06

Les figures 3.18 et 3.19 donnent la variation du débit de fuite et de la surface saturée en fonction de la longueur du drain horizontal.

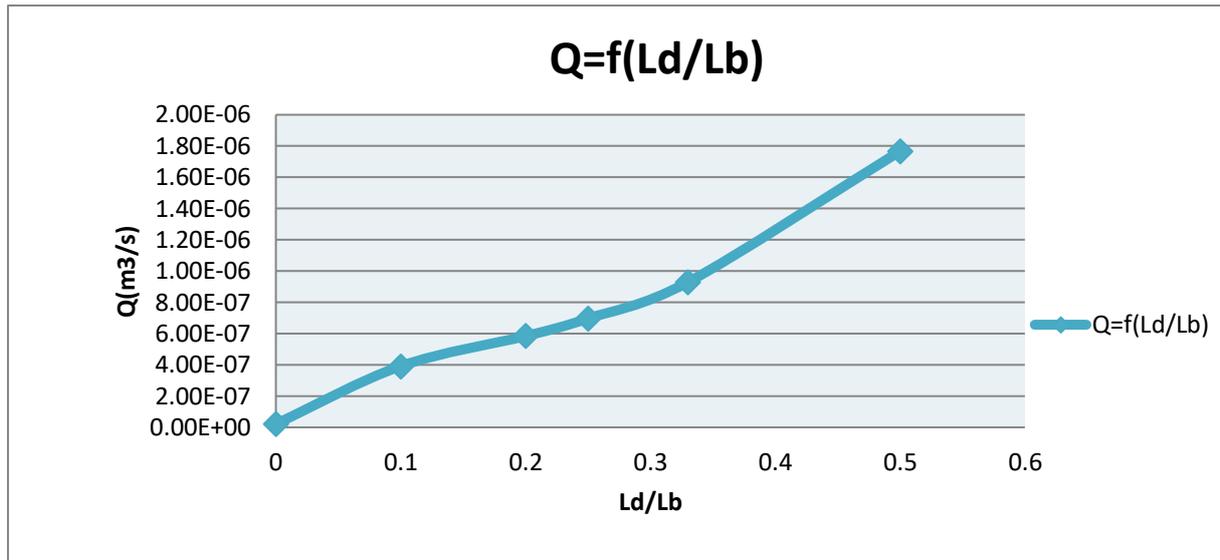


Figure 3.18 : Variation du débit de fuite en fonction de la longueur du drain.

Les résultats graphiques de la simulation, révèlent que pour de faibles longueurs de drains, la ligne de saturation est très proche du parement aval. Au fur et à mesure que le drain est plus introduit vers l'intérieur, la surface de saturation s'éloigne du talus aval et la pression interstitielle diminue.

A partir de la figure (3.18), nous avons remarqué une élévation de débit de fuite avec l'augmentation relative de la longueur du drain horizontale de 0 à  $L_d/L_b = 0,35$ . Au-delà, la pente de la courbe s'accroît et le débit devient plus important.

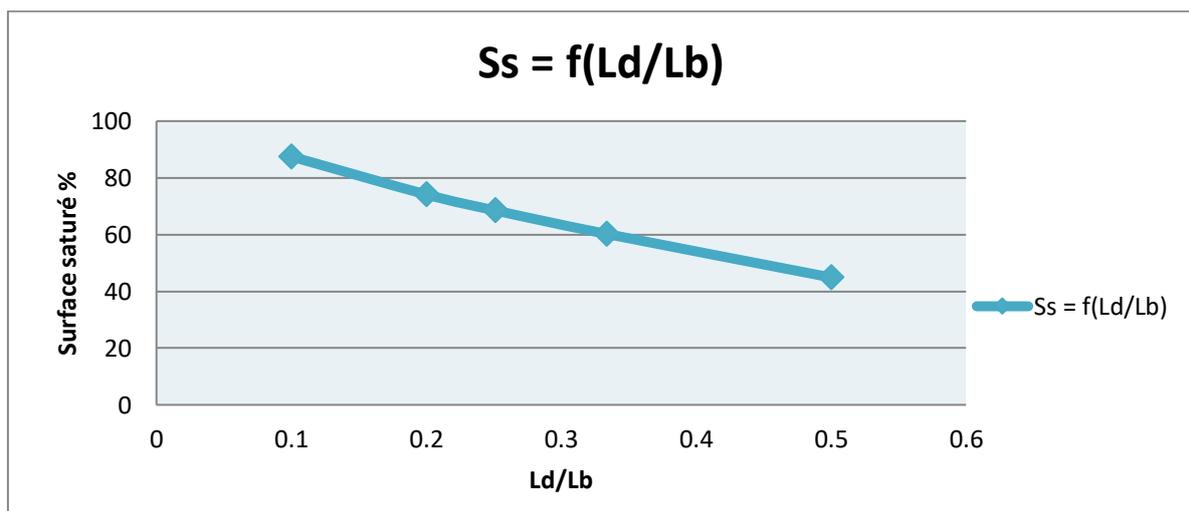


Figure 3.19 : Variation de la surface du sol saturé en fonction de la longueur du drain.

Dans le cas d'absence du drain, la ligne de saturation débouche sur le côté aval, ce qui va déstabiliser notre ouvrage et augmente la possibilité d'occurrence du glissement sur le parement aval.

D'après les résultats des modélisations, on constate que l'augmentation de la longueur du tapis drainant a provoqué :

- L'éloignement de la ligne de saturation du parement aval du barrage,
- Une diminution de la surface du sol saturé,
- Une diminution de la pression interstitielle,
- Une augmentation du débit de fuite évacué.

Les conditions favorables de maîtrise des écoulements semblent se manifester avec une longueur du drain de 29,5m et de 39m :

- Position favorable de la ligne de saturation,
- Surface de saturation varie entre 68% et 60%,
- Gradient hydraulique varie entre 0,3 et 0,4

Il est recommandé de prendre la longueur du drain  $L_d = \left(\frac{1}{4}, \frac{1}{3}\right) L_b$  (H.Femmam et N.Benmebarek, 2011). Pour notre cas on va fixer une longueur de  $L_d = 39\text{m}$  ( $L_d = 1/3 L_b$ ) du drain horizontal pour assurer la sécurité du barrage.

#### 3.3.2 Influence des dimensions du drain dans un barrage homogène (Logiciel version 2018)

Cette étude est divisée en deux parties, la première et dans les cas extrêmes et l'autre on respectant un prenant un rapport de longueurs 1/4 (la longueur du drain = 1/4 longueur de la base). [26]

##### a. La relation entre la longueur de la base du barrage et la longueur du drain (cas extrêmes)

La figure 3.20 jusqu'au 3.26 représente des barrages en terre homogènes avec différentes longueurs de bases et longueurs de drains

La conductivité hydraulique dans chaque cas de ces barrages est de :

- Le drain  $K_d = 10^{-4} \text{ m/s}$
- Le tout-venant ou le remblai  $K_r = 10^{-8} \text{ m/s}$

Tableau 3.4 : les Longueurs des bases avec les longueurs des drains pour le cas extrême.

La longueur de la base (Lb) (m)	La longueur du drain (Ld) (m)
92	7
108	9
122	8
183	13
232	22
316	32
432	47

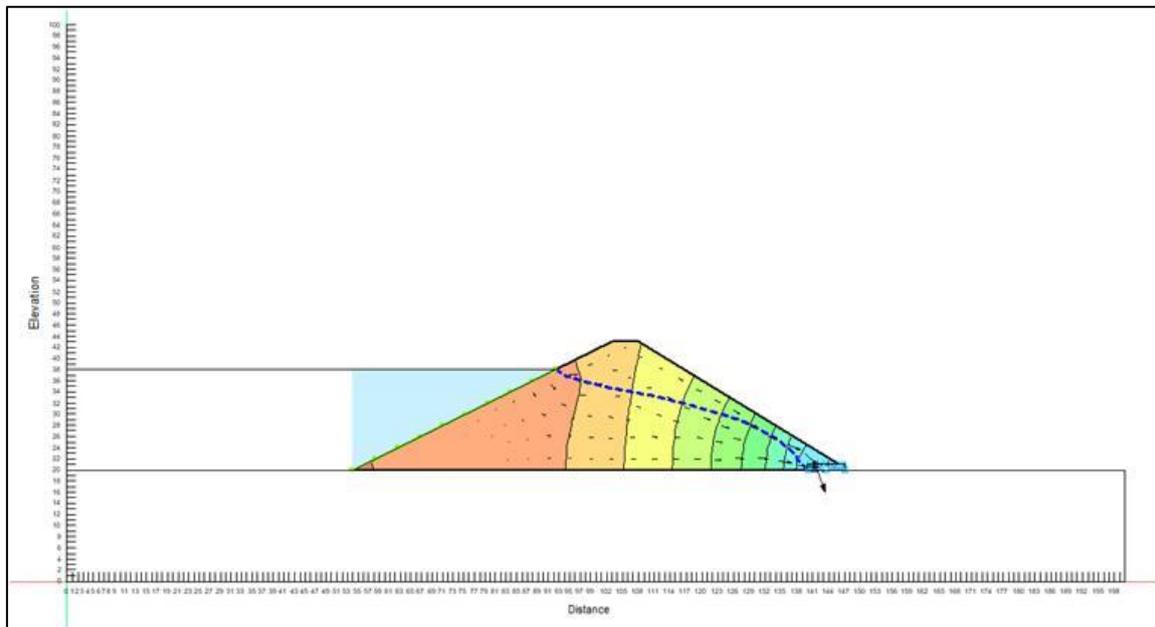


Figure 3.20 : Résultat de simulation sur un barrage homogène (Lb= 92 m ,Ld=7 m).

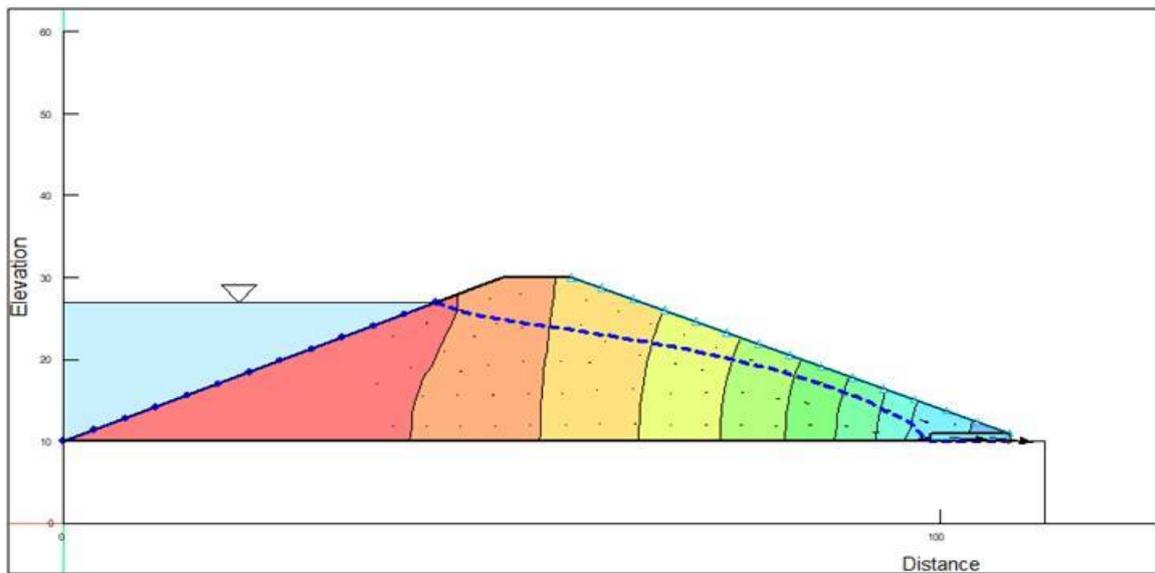


Figure 3.21 : Résultat de simulation sur un barrage homogène (Lb=108m,Ld=9 m).

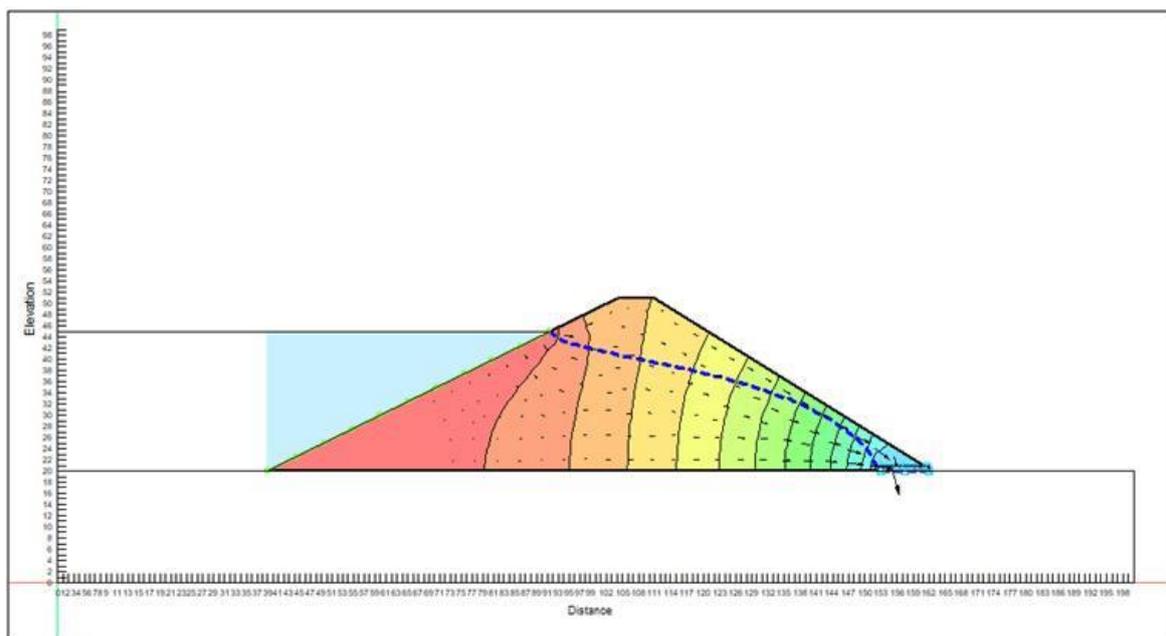


Figure 3.22 : Résultat de simulation sur un barrage homogène (Lb=122m,Ld=8 m).

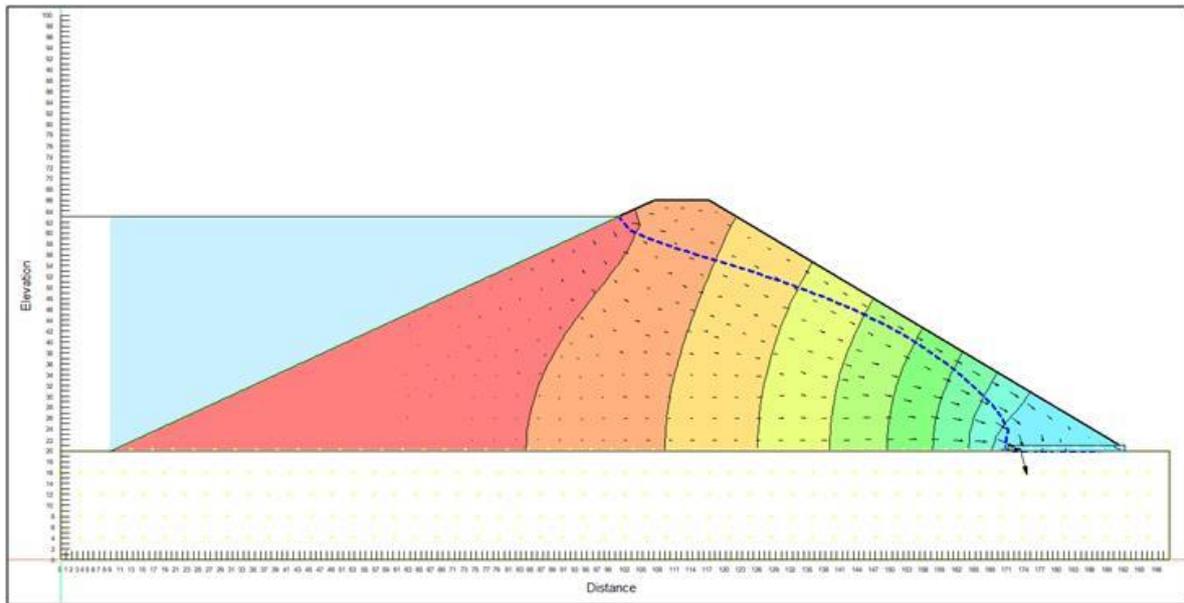


Figure 3.23 : Résultat de simulation sur un barrage homogène ( $L_b=183$  m,  $L_d=13$  m).

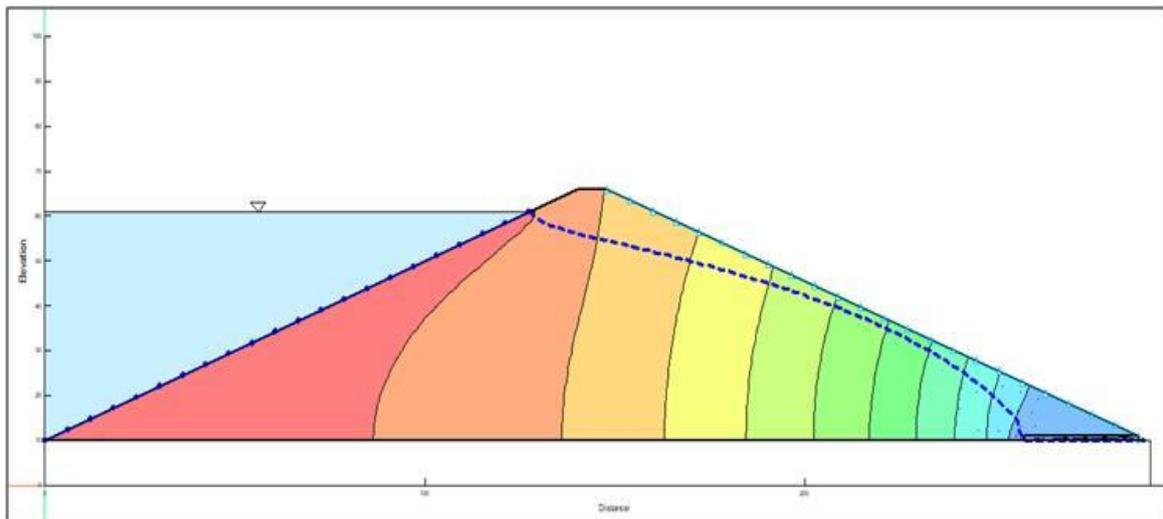


Figure 3.24 : Résultat de simulation sur un barrage homogène ( $L_b=232$  m,  $L_d=22$  m).

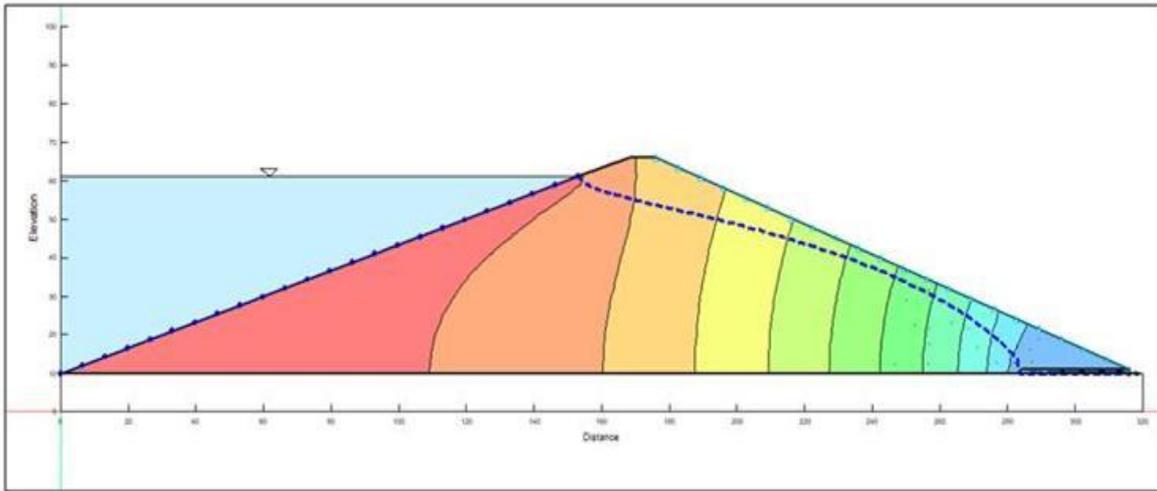


Figure 3.25 : Résultat de simulation sur un barrage homogène ( $L_b=316$  m,  $L_d=32$  m).

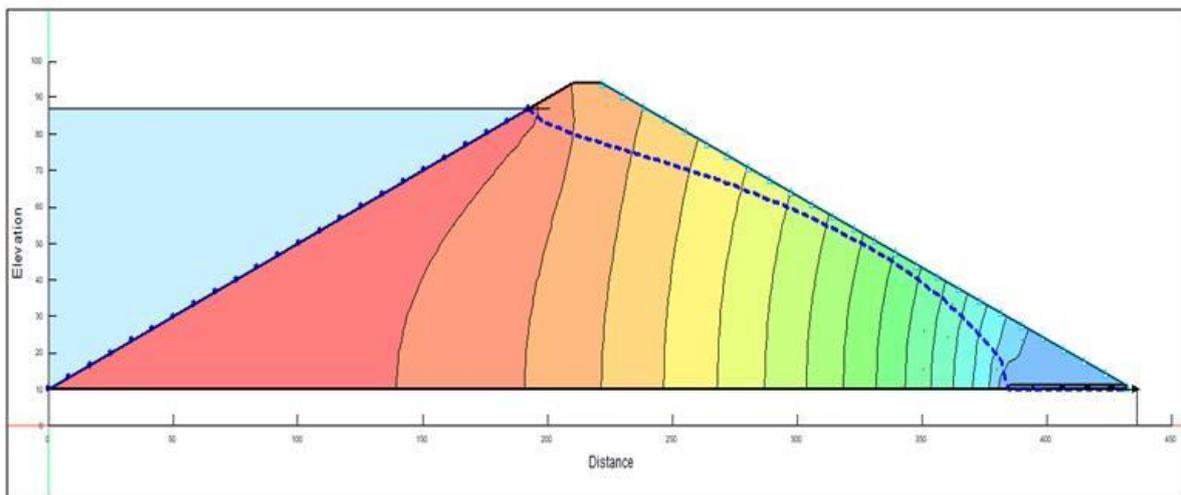
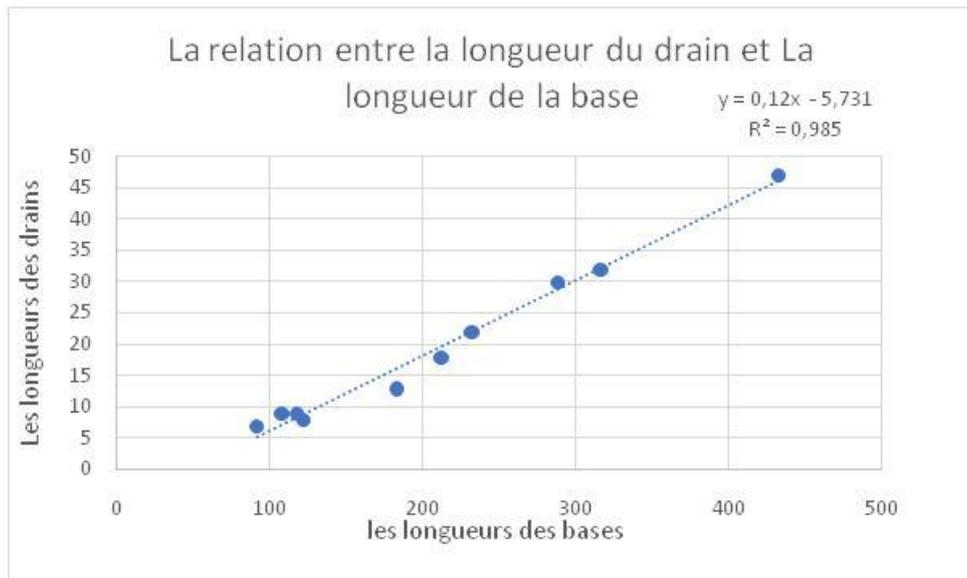


Figure 3.26 : Résultat de simulation sur un barrage homogène ( $L_b=432$  m,  $L_d=47$  m).

Les figures 3.20 jusqu'au 3.26 montrent que les lignes de saturation suivent le début du drain de l'amont vers l'aval; cela veut dire que chaque longueur de barrage a une longueur de drain appropriée.

Les figures données ci-dessous récapitulent les simulations faites et montrent l'existence de relations entre  $L_d$  et  $L_b$ . Ces relations sont tirées à partir des graphes suivants :



**Figure 3.27: La relation entre la longueur du drain et la longueur de la base.**

La figure 3.27 représente une relation trouvée entre la longueur du drain et la longueur de la base, en utilisant un ajustement par une droite du premier ordre :

- Equation :  $y = 0.12x - 5.7317$
- Coefficient de corrélation:  $R=0,9928$

#### **b. La relation entre la longueur du drain et la surface saturé (cas extrême)**

Lors du service d'un barrage deux types de surfaces peuvent être distinguées : une surface et une autre non saturée. Il est évident que les caractéristiques physiques, mécaniques et hydrauliques vont changer selon que le sol est saturé ou non.

Dans cette partie, nous allons considérer différentes dimensions des drains et voir la variation du pourcentage de la partie saturée du sol.

Pour la détermination de ces surfaces nous avons utilisé le logiciel AUTOCAD comme outil de calcul de surfaces en rapatriant les figures obtenues à partir des modélisations par GeoStudio.

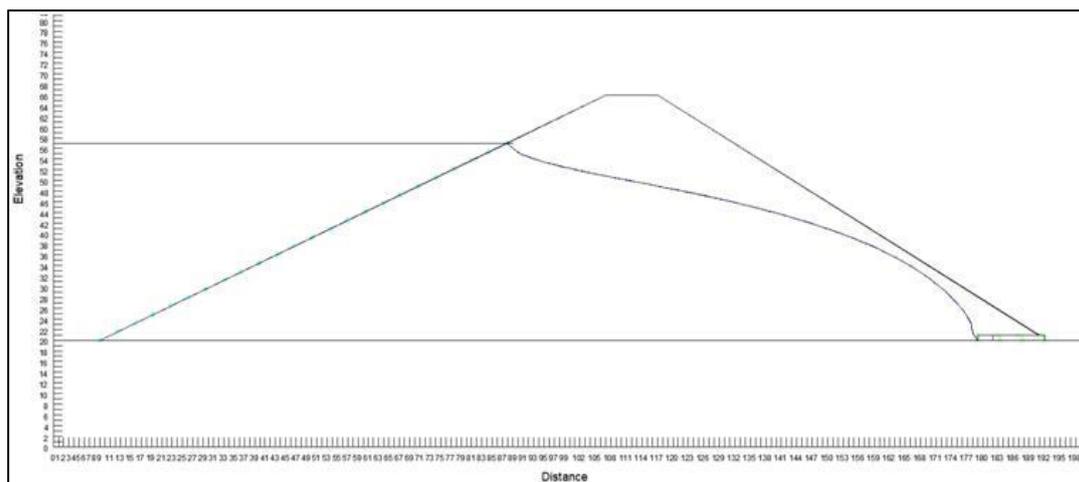
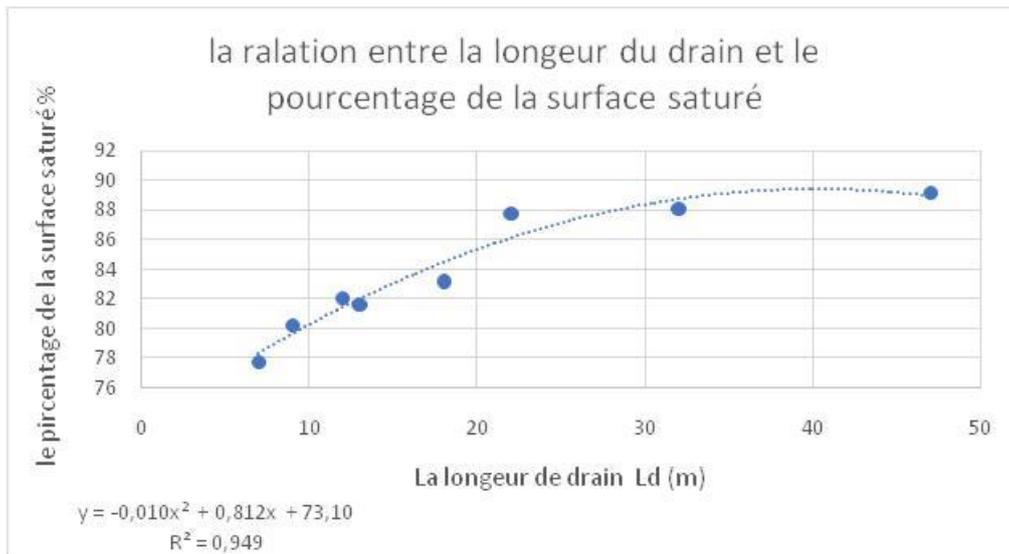


Figure 3.28 : dessin AUTOCAD.

Tableau 3.5 : les valeurs des surfaces calculées.

Longueur de la base (Lb) (m)	Longueur du drain (Ld) (m)	Surface saturé%	Surface non saturé%
174	12	82	18
108	9	80,2	19,8
232	22	87,72	12,28
316	32	88,05	11,95
432	47	89,12	10,88
212	18	83,15	16,85
122	30	77,72	22,28
183	13	81,62	18,37

Nous allons voir comment ce présente la relation entre la longueur du drain et la surface saturée dans le graphe suivant :



**Figure 3.29 : la relation entre la longueur du drain et la surface saturée.**

La figure 3.29 représente la relation entre la longueur du drain et la surface saturée qui est ajustée par une courbe polynomiale :

- Equation :  $y = -0.0101x^2 + 0.8129x + 73.109$
- Coefficient de corrélation:  $R=0,9744$

**c. La relation entre la longueur du drain et la surface saturé (un coefficient de ¼)**

Nous allons suivre les mêmes étapes pour les cas extrêmes

**Tableau 3.6 : les valeurs des surfaces calculées.**

Longueur de la base (Lb) (m)	Longueur du drain (Ld) (m)	Surface saturé%	Surface non saturé%
176	44	68,84	31,16
108	27	63,35	36,65
232	58	69,15	30,85
316	79	70,09	29,91
432	108	71,18	28,82
162	40,5	64,42	35,58
122	30	62,08	37,92
183	45	57,88	42,12

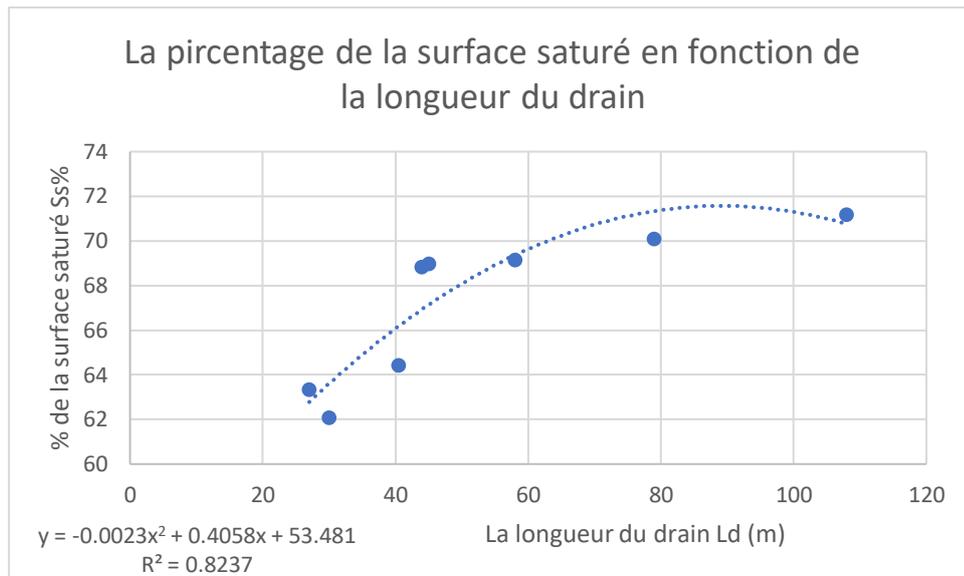


Figure 3.30 : la relation entre la longueur du drain et la surface saturée avec un coefficient de  $\frac{1}{4}$ .

La figure 3.30 représente le résultat de la relation entre la longueur du drain et la surface saturée qui est visualisé par une courbe polynomiale :

- Equation :  $y = -0.0023x^2 + 0.4058x + 53.481$
- Coefficient de corrélation:  $R=0,9075$

### 3.4 Comparaison entre la méthode graphique et la méthode numérique

- **La ligne de saturation pour un barrage homogène sans drain sur sol imperméable**

La ligne de saturation dans le cas d'un barrage en terre homogène non drainé est déterminée par la méthode de kozeny. Il a été démontré que, la ligne de saturation peut être assimilée dans sa partie médiane à une parabole d'axe horizontal dont le foyer O est situé au pied du parement aval du barrage (Figure 3.31). [7]

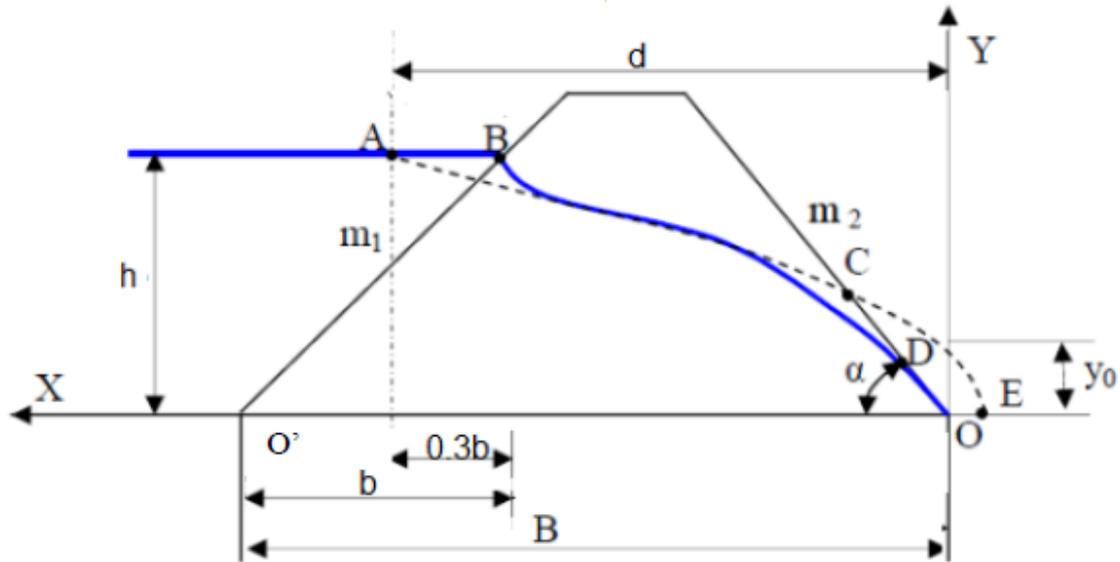


Figure 3.31 : Ligne de Saturation dans un barrage en terre.

L'équation de cette parabole est:

$$y^2 - y_0^2 - 2 x y_0 = 0 \quad (3.1)$$

Avec :

$$y_0 = \sqrt{(h^2 + d^2) - d} \quad (3.2)$$

h : hauteur d'eau ;

d : largeur en base du barrage diminué de 0,7b,

$$d = B - 0,7b \quad (3.3)$$

$$\text{ou : } d = 2 H \cot \alpha + bc - 0,7 \cot \alpha h \quad (3.4)$$

b : distance qui correspond à la projection horizontale de la partie mouillée du même parement.

Les étapes suivantes permettent la détermination de la ligne de saturation pour un barrage en terre homogène non drainé reposant sur une fondation imperméable:

- Dessiner la section du barrage en terre et le niveau d'eau en amont (h) ;
- Repérer le point B qui se situe sur le talus amont et coïncide avec le niveau d'eau ;
- Localiser le point A situé sur la surface libre de la retenue à une distance égale à 0,3d de la projection horizontale de O'B :

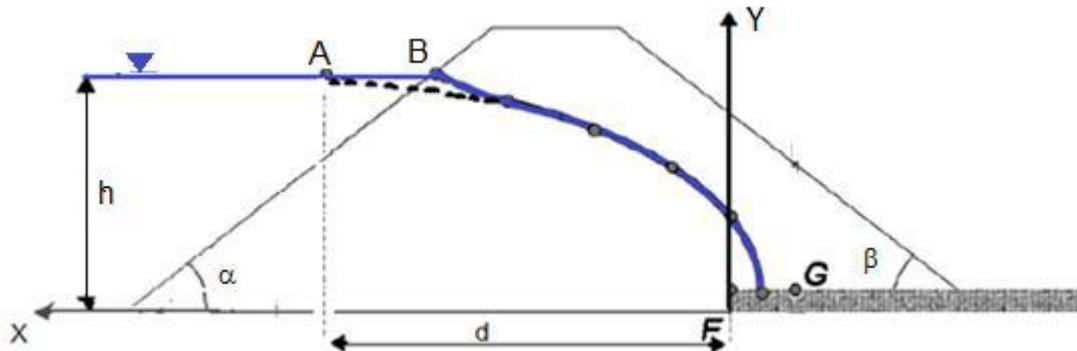
$$\Delta = 0.3b \quad (3.5)$$

$\Delta$  : la distance entre A et B.

- Choisir O comme origine des axes X Y ;
- Tracer la courbe de Kozeny en utilisant l'équation en fixant les valeurs des ordonnées y (par exemple 0,2H, 0,4H... H) et en calculant les abscisses x,
- Pour obtenir la ligne de saturation, la courbe de Kozeny doit être corrigée au droit du parement amont et aval du barrage,
- Correction en amont : on raccorde la ligne de saturation au point B du plan d'eau amont par une courbe normale au parement amont en B et tangente à la parabole,
- Correction en aval : la ligne de saturation sera raccordée au point D situé au 2/3 de OC :

$$OD = \sqrt{h^2 + d^2} - \sqrt{d^2 - h^2 \cot^2 \alpha} \quad (3.6)$$

• **Ligne de saturation pour un barrage homogène avec drain :**



**Figure 3.32: Ligne de saturation d'un barrage à drain horizontale.[7]**

La construction des digues en terre homogène requiert dans la plus part des temps la construction des dispositifs drainants pour contrôler et réduire les pressions interstitielles. Dans ce cas la ligne de saturation est déterminée de la manière suivante (Figure 3.32) :

- Dessiner la section du barrage en terre et le niveau d'eau en amont (h) ;
- Repérer le point B qui se situe sur le talus amont et coïncide avec le niveau d'eau ;
- Localiser le point A situé sur la surface libre de la retenue à une distance égale à 0,3 de la projection horizontale de O'B :

$$\Delta = 0.3b \quad (3.5)$$

- Le foyer de la parabole de Kozeny se situe au pied amont du drain au point F (l'abscisse du point A est d).
- Choisir F comme origine des axes X Y ;
- Localiser le point G situé à  $y_0$  de F ;
- Tracer la courbe de Kozeny en utilisant l'équation. Cette courbe part du point A jusqu'au point qui se trouve à mi-distance de FG ;
- Pour obtenir la ligne de saturation, la courbe de Kozeny doit être corrigée au droit du parement amont seulement ;
- On corrige la ligne de saturation au point B du plan d'eau amont par une courbe normale au parement amont en B et tangente à la parabole. [7]

#### 3.4.1 La méthode graphique

Dans cette partie, nous avons utilisé la méthode de kozeny afin d'étudier les infiltrations à travers un barrage en terre homogène. L'étude s'intéresse à la détermination de la ligne de saturation.

Le tracé de la ligne phréatique a été effectué pour deux cas :

##### a. Le cas d'un barrage homogène sans drain

L'exemple étudié est un barrage en terre homogène de perméabilité isotrope  $k$  reposant sur un substratum imperméable (Figure 3.33), leurs caractéristiques sont les suivants :

$h = 20\text{m}$  (niveau d'eau dans la retenue) ;

$H = 22\text{m}$  (hauteur du barrage) ;

$bc = 7.5\text{m}$  (largeur en crête du barrage) ;

$B = 107,5\text{ m}$

$m_1 = m_2 = 1/2.5$  ( $m_1$  et  $m_2$ : pente du talus amont et aval du barrage).

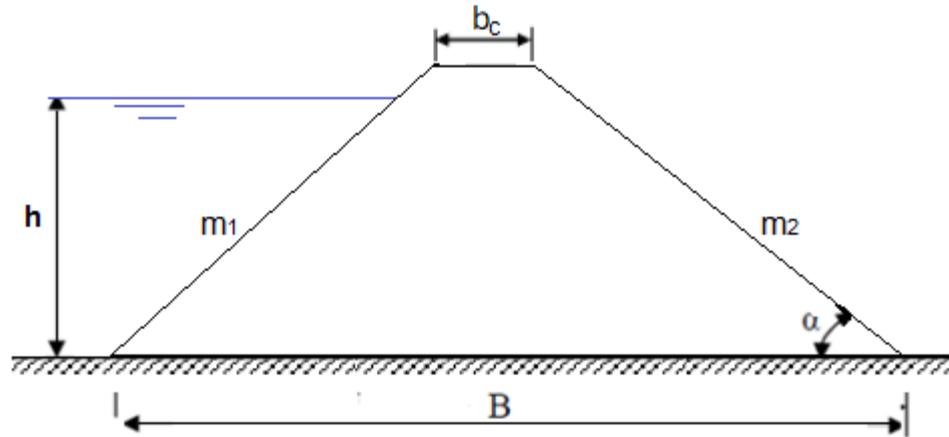


Figure 3.33 : Barrage en terre homogène reposant sur un substratum imperméable.

- Le tracé de la ligne de saturation :

La première étape est de déterminer les coordonnées (x, y) de chacun des points : A, B, C et D, puis de procéder au traçage de la parabole de Kozeny. Pour obtenir la ligne de saturation des corrections doivent être effectuées. Du côté amont on raccorde la ligne de saturation au point B du plan d'eau amont par une courbe normale au parement amont en B et tangente à la parabole, du côté aval, la correction consiste à tracer la tangente au talus aval au point D. [7]

L'angle  $\alpha$  que fait le talus aval avec le plan horizontal est :

$$\alpha = \tan^{-1}(1/2.5) = 21.8^\circ. \quad (3.7)$$

Cet angle est inférieur à  $30^\circ$  par conséquent :

$$OD = \sqrt{h^2 + d^2} - \sqrt{d^2 - h^2 \cot^2 \alpha} \quad (3.6)$$

Avec,  $d = 2 H \cot \alpha + bc - 0.7 \cot \alpha h \quad (3.4)$

$A.N : H = 22 \text{ m}, h = 20 \text{ m}, bc = 7.5 \text{ m}, m_1 = m_2 = 1/2.5, \alpha = 21.8^\circ$

$$d = 2 \times 22 \times \cot 21.8 + 7.5 - 0.7 \times \cot 21.8 \times 20 = \mathbf{82,50 \text{ m}}$$

$$OD = \sqrt{20^2 + 82.50^2} - \sqrt{82.50^2 - 20^2 \times \cot^2 21.8} = \mathbf{19,27 \text{ m}}$$

$b = 50 \text{ m}$  (déterminée par projection sur AutoCad)

### Chapitre 3 : Analyse des paramètres des écoulements dans un barrage en terre

- **Coordonnées du point B :**

$$B (d - 0.3b, h) \quad \rightarrow \quad B (67.5, 20)$$

- **Coordonnées du point A :**

$$A (d, h) \quad \rightarrow \quad A (82,50, 20)$$

- **Coordonnées du point C :**

C est le point d'intersection entre le talus aval d'équation  $y=0.4x$  et la parabole de Kozeny d'équation  $y^2 - y_0^2 - 2 x y_0 = 0$  (3.1)

Avec :

$$y_0 = \sqrt{(h^2 + d^2)} - d = \sqrt{(20^2 + 82.5^2)} - 82.5 = 2.38 \text{ m}$$

$$\rightarrow 0.16x^2 - 4.76x - 5.66 = 0$$

La racine positive :  $x = 30.89 \text{ m}$

On remplace dans l'équation :  $y = 0.4x \rightarrow y = 0.4 \times 30,89 = 12.36 \text{ m}$

Les coordonnées du point C vaut alors :

$$C (30.89, 12.36)$$

- **Coordonnées du point D :**

$$D (OD \cos \alpha, OD \sin \alpha) \quad \rightarrow \quad D (17.89, 7.15).$$

- **L'équation de parabole s'écrit :**

$$y^2 = 2 * x * 2,38 + 2.38^2 \quad (3.8)$$

Les coordonnées de la parabole sont données par le tableau suivant :

**Tableau3.7 :** Les coordonnées de la parabole de saturation.

	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>X (m)</b>	20	25	30	35	40	45	50	55
<b>Y (m)</b>	10,04	11,17	12,18	13,12	14,00	14,83	15,61	16,35

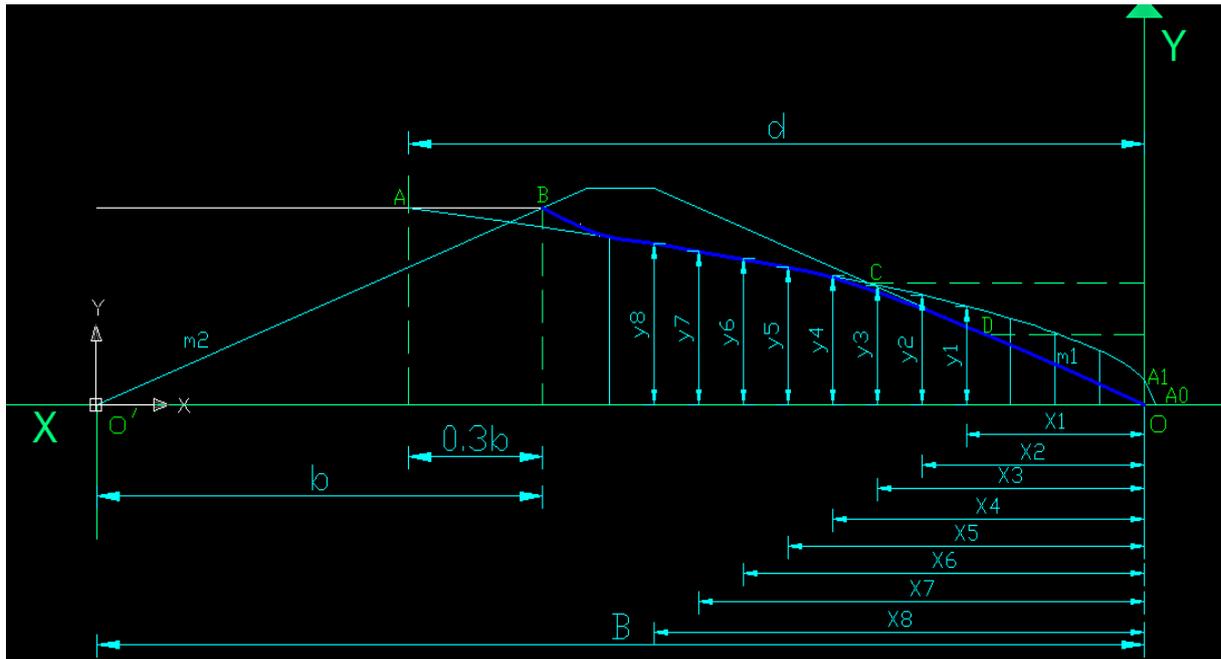


Figure 3.34 : Tracé de la courbe de saturation par la méthode de Kozeny (AutoCAD 2008).

**b. Le cas d'un barrage homogène avec drain**

Nous avons utilisé l'exemple précédent en ajoutant un drain avec une longueur de 34m ( $L_d = 1/4 L_b$  plus 5m de sécurité).

- La première étape : on va déterminer les coordonnées des points suivants : A, B, G et D :

$b = 50$  m (déterminée par projection sur AutoCad).

$\Delta = 0.3b = 15$  m

- **Les coordonnées du point B :** (par projection : B est le point sur le talus amont qui coïncide avec le niveau d'eau.)

**B (33.5, 20)**

- **Coordonnées du point A :**

**A (d, h) → A (48.5, 20)**

- **Coordonnées du point G :**

$$y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d = \sqrt{20^2 + 48.5^2} - 48.5 = 3,96 \text{ m}$$

**G (y0, 1) → G (3.96, 1)**

- La deuxième étape : déterminer les coordonnées de la parabole de Kozeny.

L'équation de la parabole s'écrit de la manière suivante :

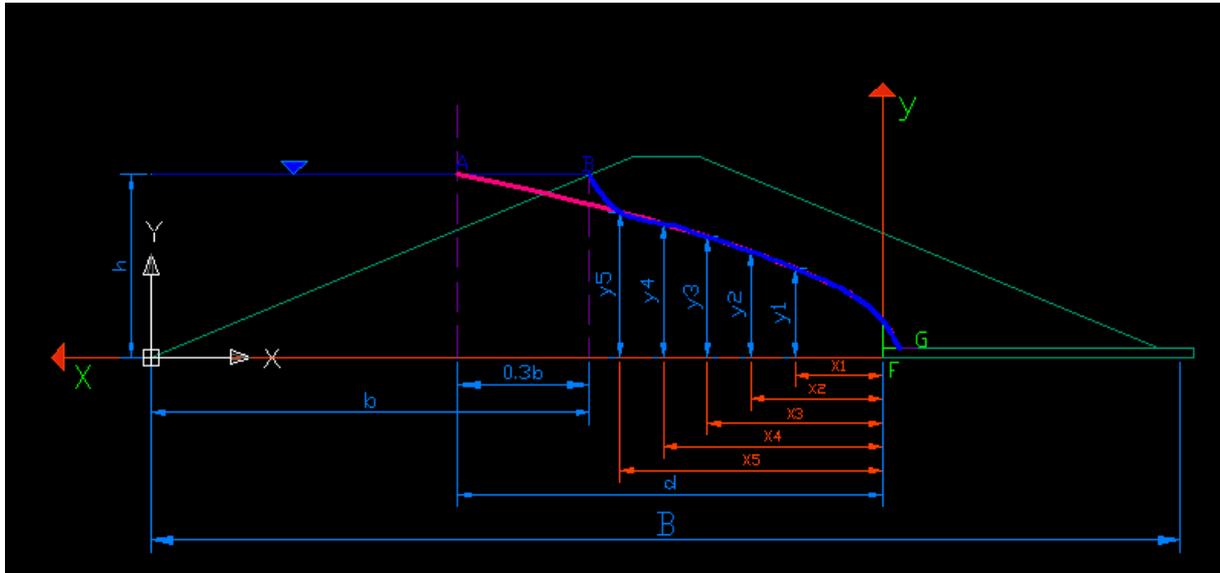
$$y^2 = 2 * x * 3,96 + 3,96^2 \quad (3.9)$$

Les coordonnées de la parabole sont données par le tableau suivant :

**Tableau 3.8 :** Les coordonnées de la parabole théorique (barrage homogène avec drain).

	1	2	3	4	5
<b>X (m)</b>	10	15	20	25	30
<b>Y (m)</b>	9,74	11,60	13,19	14,62	15,91

- Troisième étape : pour avoir la ligne de saturation, il suffit de relier la ligne de saturation au point B du plan d'eau amont par une courbe normale au parement amont en B et tangente à la parabole.



**Figure 3.35 :** Tracé de la courbe de saturation méthode de Kozeny (barrage homogène muni d'un drain) (AutoCAD 2008).

### 3.4.2 La méthode numérique

Dans cette partie, une simulation numérique pour déterminer la ligne de saturation est entreprise. L'étude sera faite pour les mêmes cas précédents.

Nous avons procédé à la simulation numérique en utilisant le logiciel Géo-Studio, plus précisément le module SEEP. Nous avons utilisé le logiciel AutoCAD (2008) pour faire des projections permettant d'obtenir les coordonnées de la ligne de saturation. Ces données seront utilisées pour établir les comparaisons entre les résultats de la méthode graphique et ceux de la méthode numérique.

### Chapitre 3 : Analyse des paramètres des écoulements dans un barrage en terre

Les figures 3.36 et 3.37 illustrent les profils géométriques du barrage ayant servi à la modélisation pour les deux cas (absence et la présence du drain).

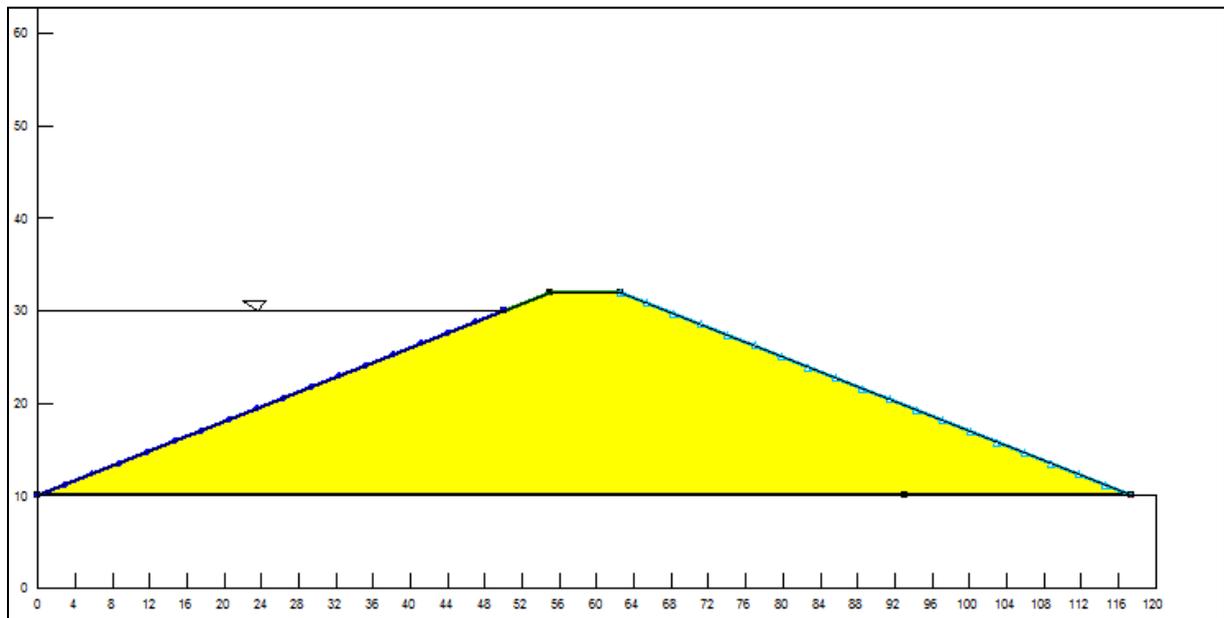


Figure 3.36 : profil d'un Barrage en terre homogène (sans drain) (GéoStudio 2007).

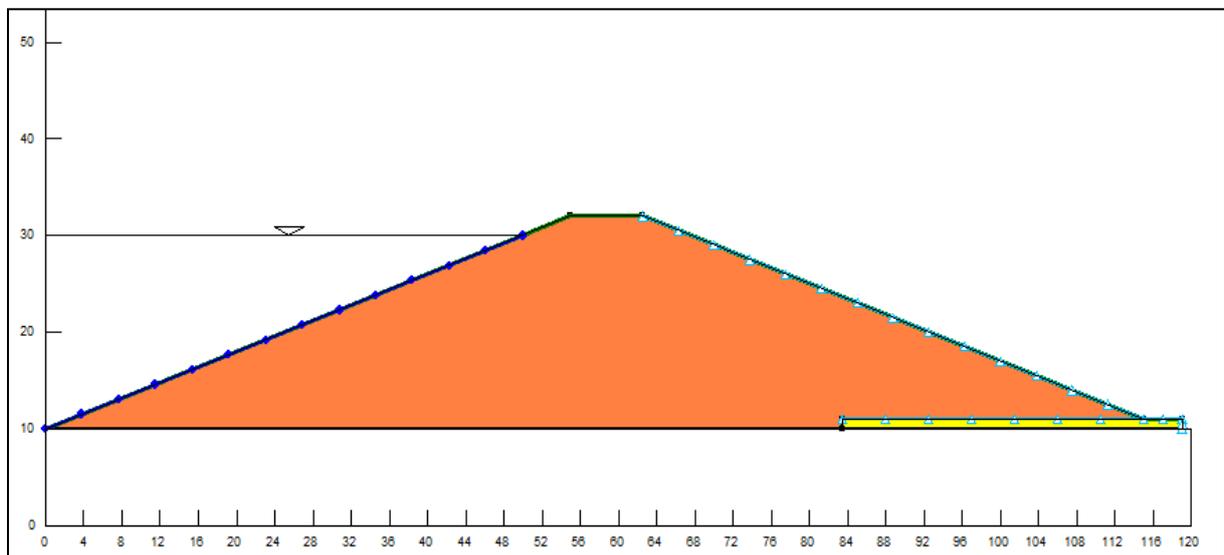


Figure 3.37 : Profil d'un barrage en terre homogène avec un drain.

- Résultats de la simulation

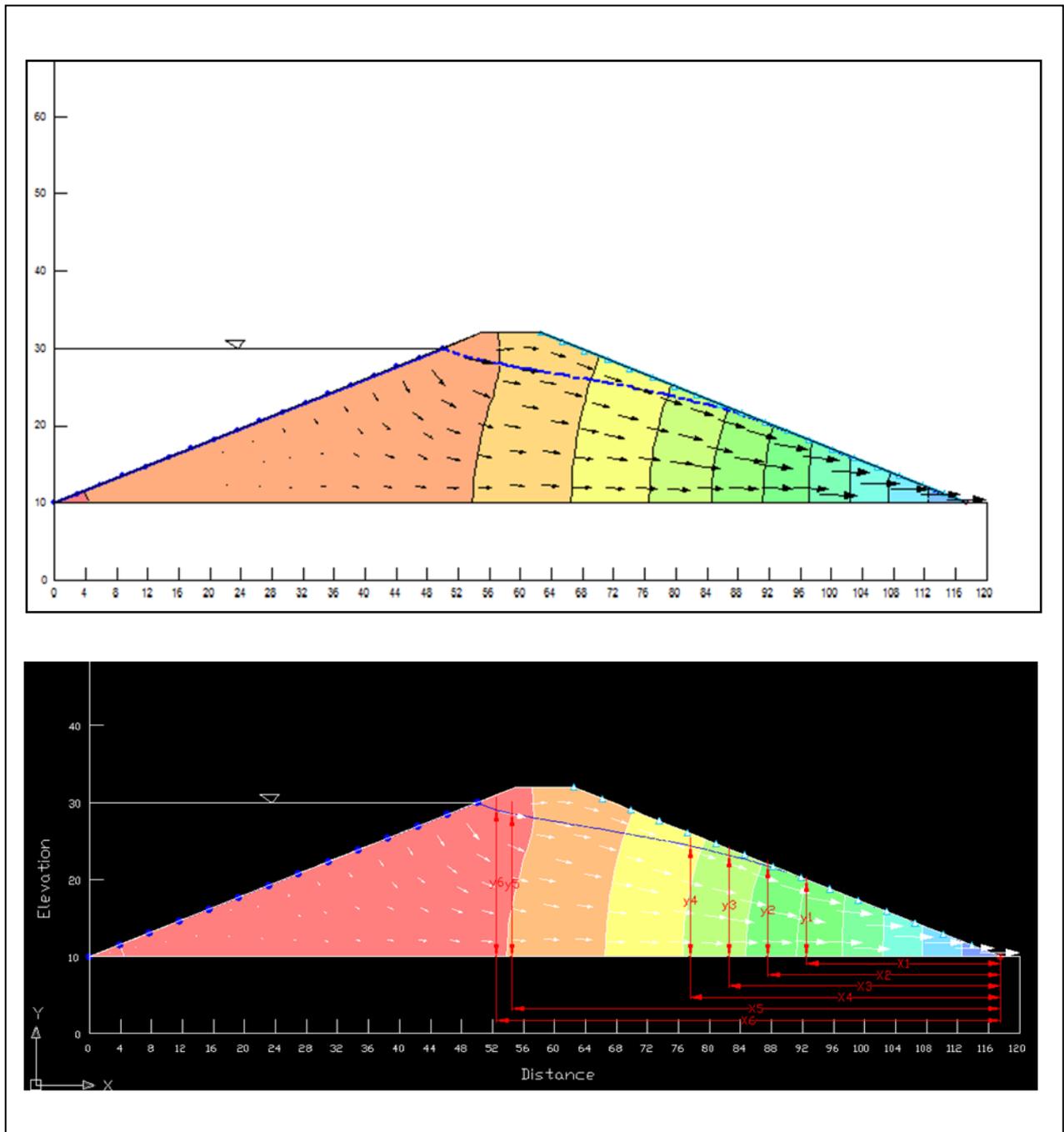


Figure 3.38 : Résultats de la simulation Cas n°1 (Visualisation de l'évolution de la ligne de saturation) (GéoStudio 2007 et Auto-CAD (2008)).

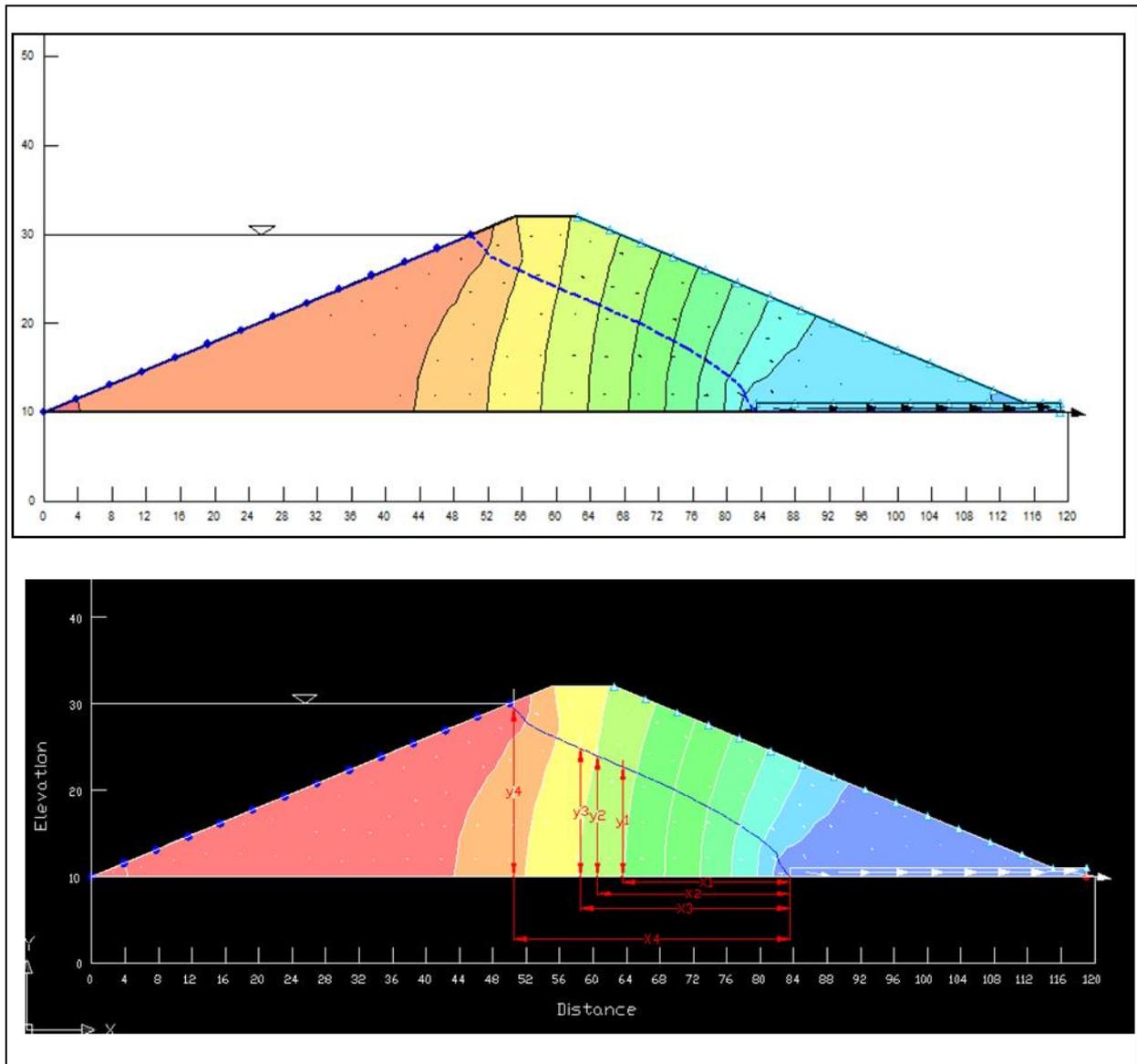


Figure 3.39 : Résultats de la simulation cas n°2 ((Visualisation de l'évolution de la ligne de saturation) (GéoStudio 2007 et Auto-CAD (2008))).

Les figures 3.38 et 3.39 donnent pour chaque cas, la position de la ligne de saturation, les coordonnées de cette ligne obtenues à partir des deux méthodes sont présentées sur les tableaux 3.9 et 3.10.

## Chapitre 3 : Analyse des paramètres des écoulements dans un barrage en terre

**Tableau 3.9** : les coordonnées de la ligne de saturation (sans drain).

	1	2	3	4	5	6	
<b>X (m)</b>	25	30	35	40	63	65	
<b>Y (m) méthode graphique</b>	9,8	11,46	12,9	14	18	18,83	
<b>Y(m) GéoStudio</b>	10,00	11,77	13,15	14,33	18,53	19,07	La moyenne
<b>L'erreur %</b>	2,0	2,7	1,9	2,3	2,9	1,3	2,2

**Tableau 3.10** : les coordonnées de la ligne de saturation (la présence du drain).

	1	2	3	4	
<b>X(m)</b>	20	23	25	33	
<b>Y (m) méthode graphique</b>	13,19	14,13	14,62	19,21	
<b>Y (m) GéoStudio</b>	12,96	13,92	14,74	19,47	La moyenne
<b>L'erreur %</b>	1,75	1,50	0,83	1,32	1,35

- **Discussion :**

L'analyse de ces tableaux montre que les résultats obtenus par la méthode graphique sont très proches de ceux trouvés par la méthode numérique. L'erreur ne dépasse pas 2%.

Nous pouvons donc conclure que la méthode de Kozeny apporte des résultats très satisfaisants malgré son aspect ancien et empirique. Elle est simple, rapide et ne nécessite pas de moyens particuliers. Toutefois, la qualité de ses résultats dépend de la compétence et la patience du dessinateur.

### 3.5 Conclusion :

A partir des résultats obtenus, on constate que l'augmentation de la longueur du drain dans un barrage en terre a pour effets:

- Le rabattement de la ligne de saturation et éviter, de ce fait, les résurgences sur le talus aval,
- L'augmentation du débit de fuite évacué,
- La diminution de la pression interstitielle.

### Chapitre 3 : Analyse des paramètres des écoulements dans un barrage en terre

---

Les conditions favorables de maîtrise des écoulements semblent se manifester autour d'une longueur du drain de 29,5m et de 39m. On s'est fixé une longueur de  $L_d = 39\text{m}$  ( $L_d = 1/3 L_b$ ) du drain horizontal pour assurer la sécurité du barrage.

Après calculs et simulations, nous avons trouvé :

- Une relation linéaire entre la longueur du drain et la longueur de la base du barrage (les cas extrêmes) :
  - Equation :  $y = 0.12x - 5.7317$
  - Coefficient de corrélation:  $R=0,9928$
- Une relation entre la longueur du drain et la surface saturée qui est ajustée par une courbe polynomiale pour les deux cas :
  - Le premier cas (les cas extrêmes) :  
Equation :  $y = -0.0101x^2 + 0.8129x + 73.109$   
Coefficient de corrélation:  $R=0,9744$
  - Le deuxième cas (coefficient de 1/4) :  
Equation :  $y = -0.0023x^2 + 0.4058x + 53.481$   
Coefficient de corrélation:  $R=0,9075$

La méthode graphique de Kozeny, est une méthode simple, rapide et donne des résultats satisfaisants, mais la qualité du résultat dépend aussi de la compétence et la patience du dessinateur.

Enfin, nous avons déduit que pour une structure stable, il faut que le pourcentage de la surface du sol saturée doit être compris entre 60% et 69% ( $60\% \leq S_s\% \leq 69\%$ ).

# CHAPITRE 4

---

## Etude de cas (Barrage SIKKAK)

### 4.1 Situation du barrage SIKKAK

Le barrage Sikkak a été réalisé pour les besoins d'irrigation de la plaine de Hennaya ainsi que l'alimentation en eau potable de la ville de Tlemcen. Il a une capacité de  $30\text{Mm}^3$  et régularise un volume de  $25\text{Mm}^3$ . La superficie du bassin versant correspondant est de  $251\text{Km}^2$ . Cet ouvrage est réalisé sur l'oued Sikkak, affluent de la Tafna. [27]

Il est situé à la hauteur de Guaad et Boukaben, à environ 1 km du village d'Ain Youcef. Le site du barrage est accessible à partir des routes de wilaya CW38 et CW71. [27]



**Photo 1 : Le Barrage de SIKKAK.**

### 4.2 Les caractéristiques du barrage [28]

- Capacité totale du barrage :  $27\text{Hm}^3$ [28]
- Niveau de la retenue normale (NRN) : 218 m
- Niveau max de la retenue (NMR) : 220.4 m
- Volume mort :  $2\text{Hm}^3$ [28]
- Capacité normale de la retenue :  $25.5\text{Hm}^3$
- Capacité maximale de la retenue :  $30.8\text{Hm}^3$
- Capacité utile de la retenue :  $23.5\text{Hm}^3$
- La surface de la retenue au niveau maximale :  $206.7\text{Ha}$ [28]
- Longueur de lac : 2.6 Km.

### 4.3 Aspect d'ensemble de l'aménagement

#### 4.3.1 Barrage

Le barrage de SIKKAK est un barrage en terre zoné avec un Batardeau intégré. Cet ouvrage se compose : [29]

- D'un noyau argileux central
- D'un filtre amont et aval en sable calibré
- D'une transition amont et aval en calcaire concassé : max 80 mm
- D'une recharge amont et aval en tout venant : des grés 0-1000 mm
- D'une zone de protection amont et aval en enrochement : du calcaire.

#### 4.3.2 Les ouvrages de dérivations [29]

- Le batardeau
- La galerie de dérivation
- Le canal de fuite

Ils sont dimensionnés pour contrôler une crue de  $939 \text{ m}^3/\text{s}$ . [29]

#### 4.3.3 La tour de prise

La tour de prise est située au-dessus de la chambre des vannes de la vidange de fond et abrite trois pertuis de prise, elle a un diamètre intérieur de 9 m et une hauteur totale de 51,45 m. [29]

#### 4.3.4 L'adduction

La conduite d'adduction est installée dans la partie supérieure de la galerie de dérivation avec un diamètre de 1000 mm. [29]

#### 4.3.5 L'évacuateur de crue

Dimensionné pour le passage de la crue millénaire laminée de  $1477 \text{ m}^3/\text{s}$ , il comporte les quatre parties suivantes.

- Le seuil déversant en forme de labyrinthe
- Le coursier rectiligne
- Le bassin de dissipation
- Le canal de fuite

## 4.4 La géologie et la géotechnique

### 4.4.1 Le choix du site

Les caractéristiques du site sont favorables pour la réalisation de deux types de barrage : un barrage en terre zoné et un barrage en béton compacté par rouleau (BCR) ; la variante BCR a été écartée à cause de la déformation excessive de la fondation. [29]

### 4.4.2 La géologie du site

Le site du barrage et la cuvette se trouvent dans un bassin sédimentaire de la moyenne Tafna ; ce bassin est constitué de dépôts du miocène inférieure, sa partie supérieure se termine par une couche d'alluvions plio-quadernaire, cachée par des encroulements carbonatés plus récents. [29]

### 4.4.3 La stratigraphie du site

Les formations rencontrées dans le site sont les suivantes :

- *Série pélito-gréseuse supérieure* : Elle a une épaisseur qui varie entre 0 à 25 m
- *Le grés* : Le grés est la roche la plus résistante rencontrée sur le site, c'est du grés à grain moyen à fin à ciment carbonaté, il constitue des couches dont l'épaisseur varie de 0.8 à 2m [29]
- *La pélite bleu* : Il s'agit d'une couche d'épaisseur variant entre 6 et 7 m constituée de pélites et de pélites marneuses d'une couleur bleu sombre. [29]
- *La série pélito-gréseuse inférieure* : Cette formation se retrouve en dessous de la couche pélite bleu, il s'agit d'une succession de couche de pélite plus au moins marneuse et de couches de grés. L'épaisseur des couches de pélite varie de quelques centimètres à 0.4 m alors que celles du gré varie de 0.7 à 1m. [29]

### 4.4.4 Les matériaux de construction

#### a. Matériaux argileux (zone 1)

Les matériaux argileux du noyau proviennent en totalité de la zone d'empreinte située en rive droite dans la cuvette et juste en amont de ChabatLihody. [29]

**Tableau4.1.** : Propriétés physiques des matériaux argileux des bancs d'empreintes. [29]

Propriétés	Le banc d'empreinte de la rive droite	Le banc d'empreinte El Haffariya
Particule <80 $\mu\text{m}$	75-100	89-100
Particule < 2 $\mu\text{m}$	51-97	82-96
Teneur en eau naturelle $W_n$ (%)	9-22	14
Limite liquide $W_L$ (%)	30-57	41-51
Limite de plasticité $W_p$ (%)	15-34	17-22
L'indice de plasticité $I_p$ (%)	15-23	19-34
L'indice de liquidité $I_L$	0.1-0.5	0.1-0.2
La densité sèche	1.4-1.85	1.88

**Remarque :** La densité sèche à l'optimum est de 1.77 et la teneur en eau optimale est de 16%.

#### b. Matériaux pour le filtre et la transition (Zones 2A et 2B)

Les matériaux pour les filtres ont été préparés à partir d'un mélange de TVO de l'oued Tafna et du sable concassé provenant de la carrière Sidi Ali Benyoub, le mélange était ensuite concassé, tamisé et lavé. [29]

Les matériaux pour la transition ont été préparés par mélange de différents calibres de pierre concassée. [29]

#### c. Recharge amont et aval (Zone 3A)

Le matériau des recharges amont et aval est constitué de tout venant de grès extrait à partir des excavations de l'évacuateur de crue et à partir des carrières des grès situées à proximité du barrage. [29]

#### d. Matériaux de protections (Zones 3C et 4)

Les matériaux de protection amont proviennent de l'ancienne carrière de Sidi Abdelli. Il en est de même pour la carapace de surface qui a été posée sur le parement aval du barrage. [29]

#### e. Matériaux de remblai

Les caractéristiques des matériaux de remblai du barrage et du batardeau qui ont été prises en considération pour les calculs de ces ouvrages sont récapitulées ci-dessous : [29]

Tableau4.2 : Paramètres mécanique et hydraulique dans l'analyse.

Numéro	Description	$\gamma_n(KN/m^3)$	$\gamma_{sat}(KN/m^3)$	$\phi$ (°)	$K_h(m/s)$
1	Alluvion	18.30	20.4	30	$10^{-5}$
2	Noyau : argile	20.1	20.7	19.5	$10^{-8}$
3	Filtre ; sable max 10 mm	20.1	21.6	33	$10^{-5}$
4	Transition : pierre concassée max 80 mm	20.6	22.1	38	$10^{-4}$
5	enrochement tout venant max1000 grès	19.2	20.2	37	$10^{-5}$
6	Pierre calcaire sélectionné	19.5	21.6	45	$10^{-3}$

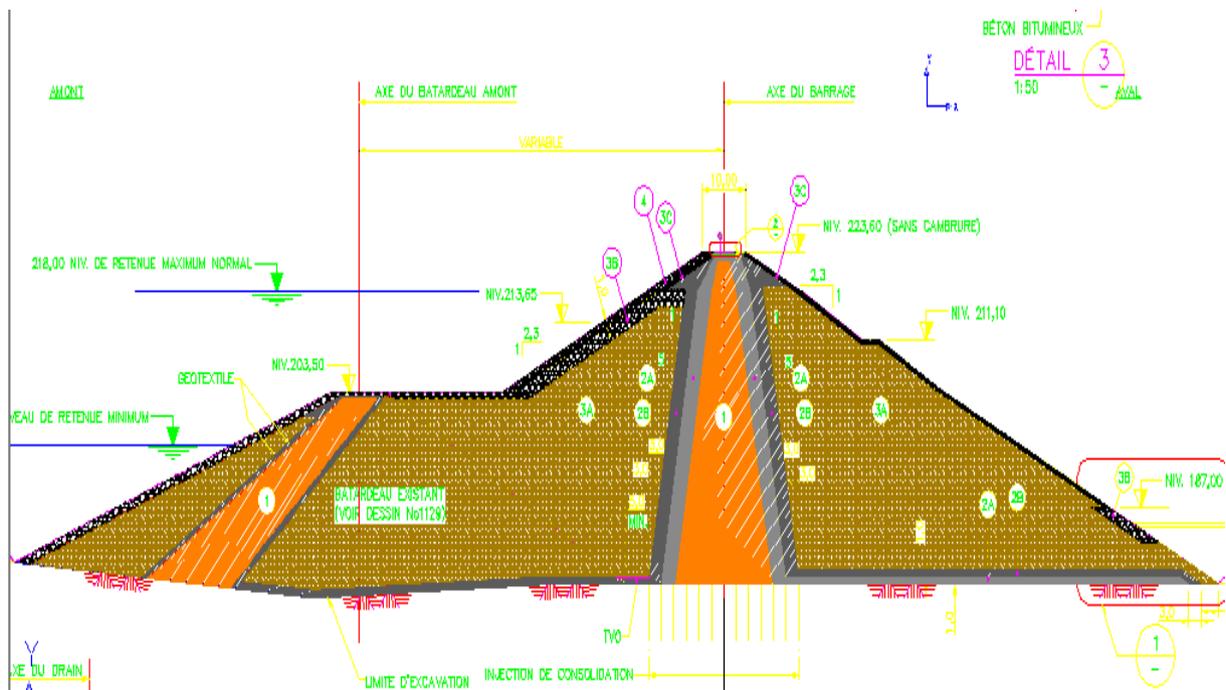


Figure4.1 : dessin Autocad des différentes couches du barrage SIKKAK.

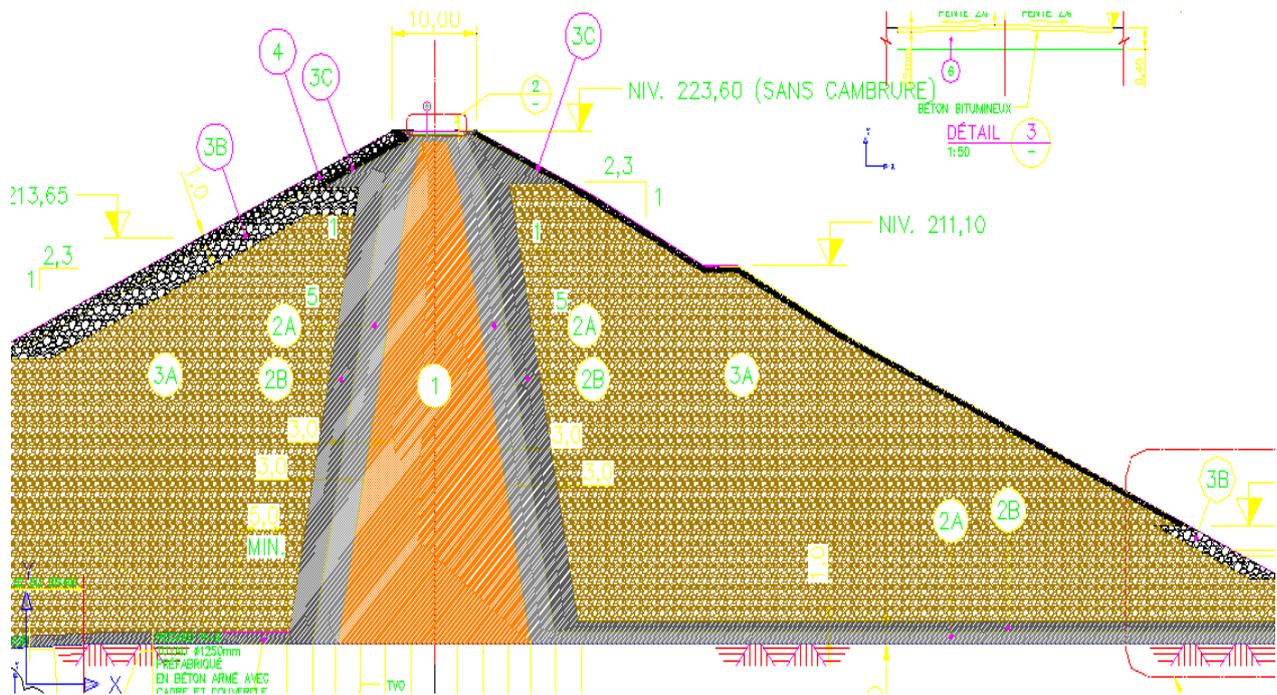


Figure4.2 : dessin Autocadd des différentes couches du barrage SIKKAK.

#### La légende de la figure [29]

1-Noyau, argile

2A-Filtre, sable, max 10mm

2B- Transition, pierre concassée, max80 mm

3A-Recharge, enrochement tout-venant grés max 1000 mm

3B- Enrochement tout venant calcaire max 1000 mm

3C-coussin perré 0-300 mm

4-Perré, enrochement 300-950 mm

#### 4.5 Etude de cas

Afin d'étudier et d'appréhender les infiltrations dans le corps du barrage SIKKAK, nous avons procédé à des simulations numériques suivis d'études comparatives.

La méthodologie adoptée est de faire des simulations correspondant à trois niveaux d'eau en amont. Les résultats trouvés sont comparés à ceux recueillis sur le site.

Les données utilisées pour l'exécution de cette étude sont les pressions interstitielles et les niveaux piézométriques du barrage en terre de SIKKAK mesurées dans le profil 310 en 2020, 2013 et 2005.

Les figures 4.3 et 4.4 illustrent le profil géométrique du barrage ainsi que son maillage avec six points qui représentent les emplacements des piézomètres à corde vibrante sur lesquels l'analyse sera engagée.

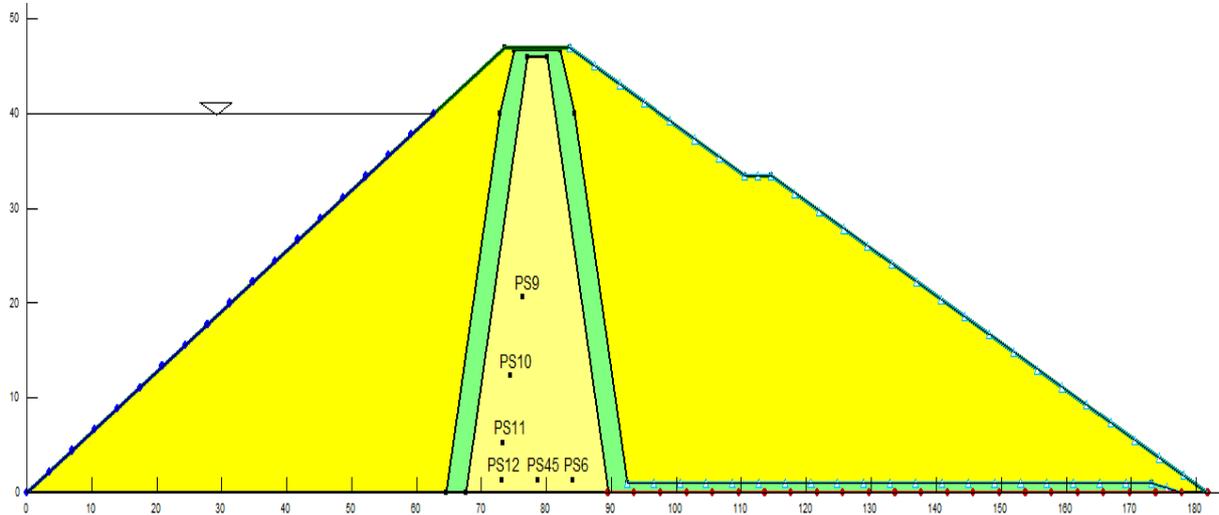


Figure4.3 : Profil de référence.

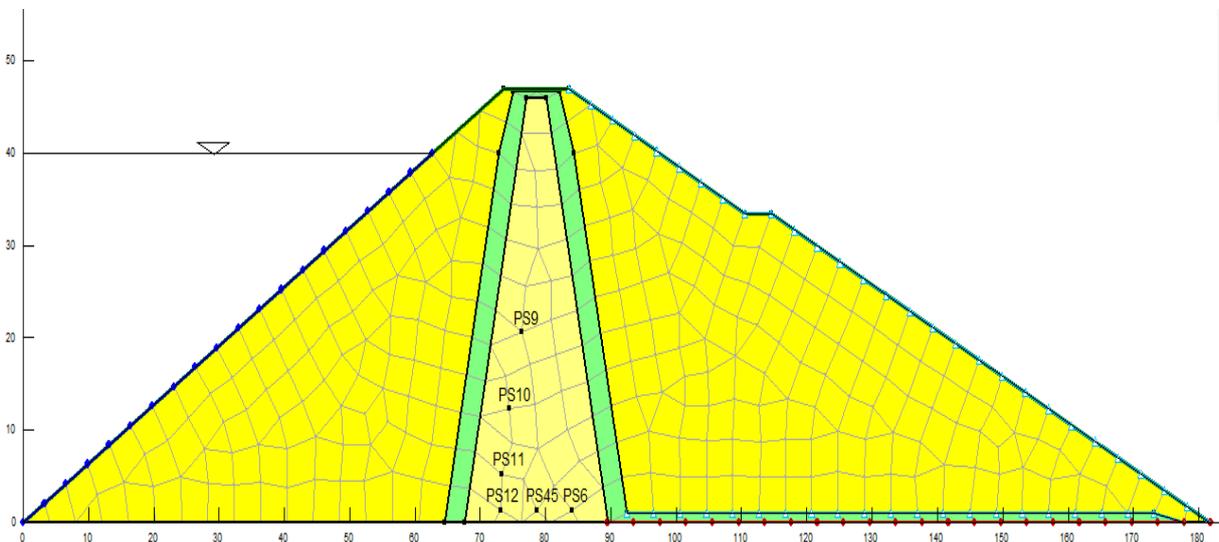


Figure4.4 : Maillage du profil.

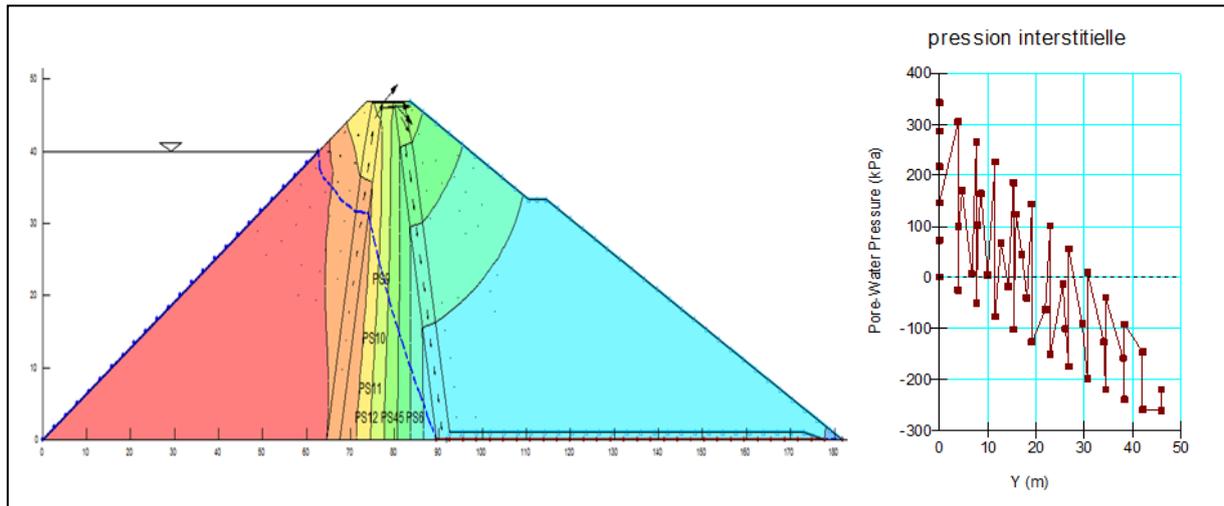
Tableau4.3 : Nature des matériaux avec valeur des perméabilités.

Matériaux	Noyau	Filtre	Recharge
Perméabilité K (m/s)	$10^{-8}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$

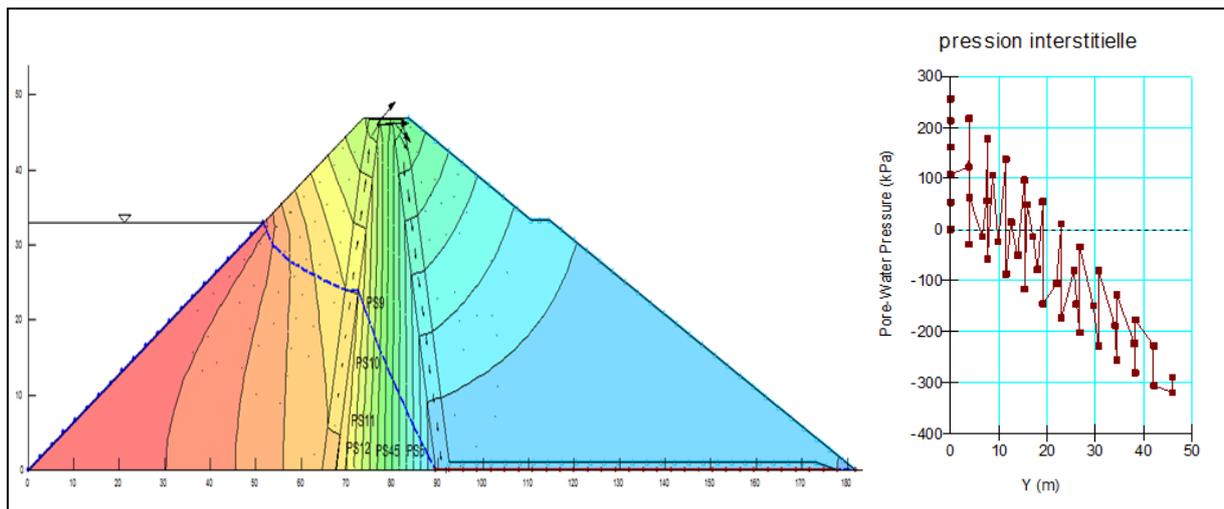
Les résultats graphiques de la modélisation sont présentés pour chaque cas sous forme de champs des charges hydrauliques, la position de la ligne de saturation, ainsi que la variation de la pression interstitielle selon l'axe vertical.

**4.5.1 Les résultats**

Les figures suivantes donnent pour chaque cas de modélisation les résultats graphiques sous forme des charges hydrauliques et la variation des pressions interstitielles en altitude.



**Figure4.5 : Résultat de la simulation H = 218m, (profile 310)**



**Figure4.6 : Résultat de la simulation H = 209m, (Profile 310).**

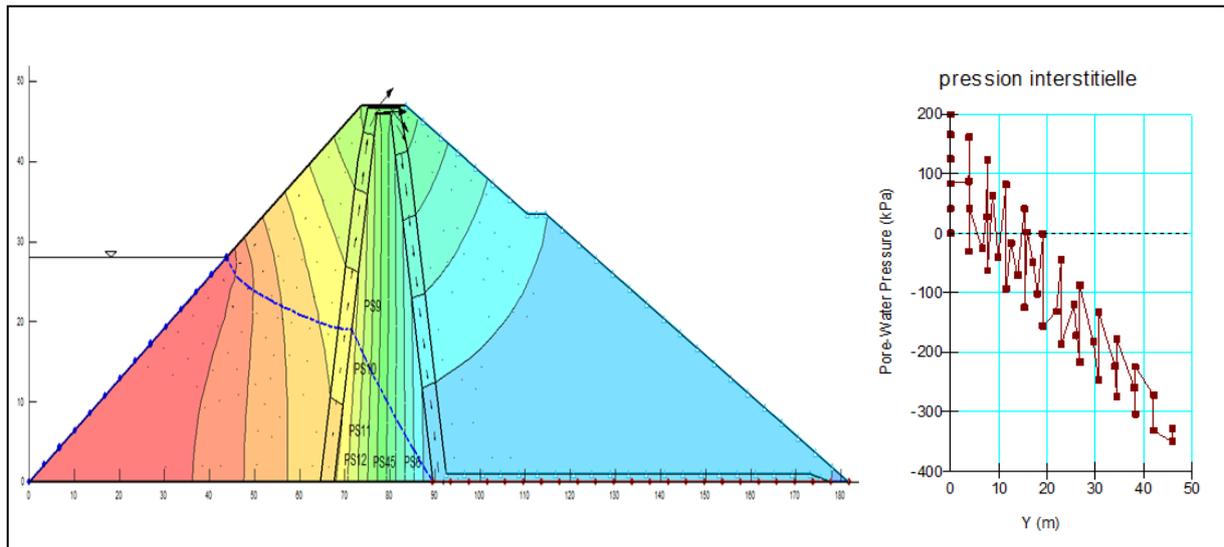


Figure4.7 : Résultat de la simulation H = 209m, (Profile 310).

Avec :

H : Le niveau d'eau dans la retenue (m).

Les tableaux suivants donnent pour chaque cas, les pressions interstitielles et les niveaux d'eau mesurés sur site et ceux qui sont trouvés par les simulations numériques.

- H = 218m

Tableau4.4 : Valeurs des pressions interstitielles mesurées sur site et simulées (H =218m).

	PS12	PS45	PS6	PS11	PS10	PS9	
Les valeurs mesurées sur site (Kpa)	233	154	101	257	182	54	
Les valeurs simulées (Kpa)	256,291	168,61	77,028	217,712	142,763	39,329	
L'erreur (%)	9,996	9,487	23,735	15,287	21,559	27,169	Erreur moyenne : 17,872

Tableau4.5 : Valeurs des niveaux d'eau mesurées sur site et simulées (H =218m).

	PS12	PS45	PS6	PS11	PS10	PS9	
Les valeurs mesurées sur site (m)	24,26	16,57	11	31,37	32,28	27,3	
Les valeurs simulées (m)	27,433	18,493	9,154	27,5	26,857	24,71	
L'erreur (%)	13,079	11,605	16,782	12,337	16,800	9,487	Erreur moyenne : 13,348

- **H = 209m**

**Tableau4.6 :** Valeurs des pressions interstitielles mesurées sur site et simulées (H =209 m).

	<b>PS12</b>	<b>PS45</b>	<b>PS6</b>	<b>PS11</b>	<b>PS10</b>	<b>PS9</b>	
<b>Les valeurs mesurées sur site (Kpa)</b>	214	103	54	250	159	40	
<b>Les valeurs simulées (Kpa)</b>	187,149	121,314	53,167	148,077	73,29	27,56	
<b>L'erreur (%)</b>	12,547	17,781	1,543	40,769	53,906	31,100	Erreur moyenne : 26,274

**Tableau4.7 :** Valeurs des niveaux d'eau mesurées sur site et simulées (H =209 m).

	<b>PS12</b>	<b>PS45</b>	<b>PS6</b>	<b>PS11</b>	<b>PS10</b>	<b>PS9</b>	
<b>Les valeurs mesurées sur site (m)</b>	21,67	10,81	5,63	29,97	29,28	25,25	
<b>Les valeurs simulées (m)</b>	20,383	13,67	6,721	20,399	19,773	17,89	
<b>L'erreur (%)</b>	5,939	26,457	19,378	31,935	32,469	29,149	Erreur moyenne : 24,221

- **H = 205 m**

**Tableau4.8 :** Valeurs des pressions interstitielles mesurées sur site et simulées (H =205m).

	<b>PS12</b>	<b>PS45</b>	<b>PS6</b>	<b>PS11</b>	<b>PS10</b>	<b>PS9</b>	
<b>Les valeurs mesurées sur site (m)</b>	144	128	93	126	73	31	
<b>Les valeurs simulées (m)</b>	142,921	91,457	38,386	103,701	29,724	20	
<b>L'erreur (%)</b>	0,749	28,549	58,725	17,698	59,282	35,484	Erreur moyenne : 33,414

Tableau4.9 : Valeurs des niveaux d'eau mesurées sur site et simulées (H =205 m).

	PS12	PS45	PS6	PS11	PS10	PS9	
Les valeurs mesurées sur site (m)	15,36	13,97	10,2	18,27	21,38	25,05	
Les valeurs simulées (m)	15,873	10,626	5,214	15,874	29,724	13,783	
L'erreur (%)	3,340	23,937	48,882	13,114	39,027	44,978	Erreur moyenne : 28,880

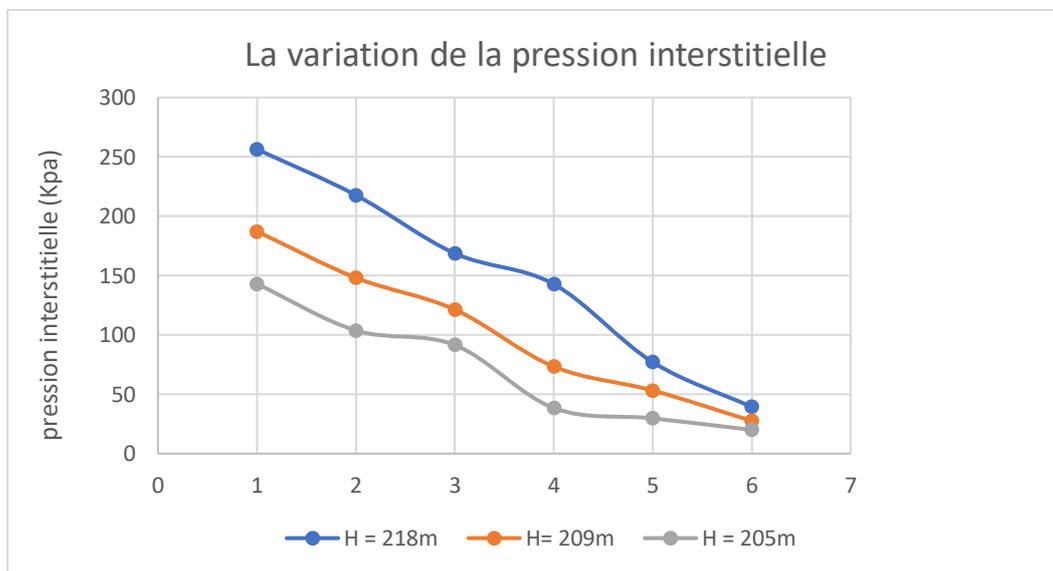


Figure4.8 : La variation de la pression interstitielle pour chaque hauteur.

#### 4.5.2 Discussion

Les tableaux 4.4 jusqu'au 4.9 représentent les valeurs de niveau d'eau et les pressions interstitielles observées et celles obtenues par simulation numérique.

Pour le premier cas (H=218m), nous avons remarqué que l'accord entre les valeurs simulées et celles qui sont mesurées sur le site est relativement bon (l'erreur varie entre 13% et 17%). Par contre, l'erreur peut atteindre 25% pour le deuxième cas (H = 209m) et 33% pour le troisième cas.

Nous pensons que les écarts constatés dans certains cas sont dus aux limitations de la version académique du logiciel que nous avons utilisé en l'occurrence « GéoStudio 2007 Student license » qui ne nous a permis d'utiliser que trois matériaux seulement alors que le barrage comporte plus de quatre. Aussi, nous étions limités par le nombre de mailles.

A partir des résultats graphiques présentés dans les figures 4.5, 4.6 et 4.7, on remarque que les pressions interstitielles augmentent en s'éloignant de la crête, la valeur maximale est atteinte à la base de l'ouvrage avec une pression de 342,83 Kpa pour une hauteur d'eau de 218m et 256 Kpa pour une hauteur de 209m. On constate que l'abaissement de la hauteur d'eau dans la retenue entraîne le rabattement de la ligne de saturation, la diminution de la pression interstitielle et la charge hydraulique. Il en résulte une augmentation des contraintes effectives.

#### **4.6 Conclusion**

D'après les résultats obtenus, nous pouvons conclure ce qui suit :

- Le logiciel GéoStudio (surtout la version complète), est un outil très bien adapté à l'étude de l'infiltration dans un barrage en terre. Il permet de faire des simulations dans un temps réduit et avec précision et peut considérer toute une panoplie de paramètres et plusieurs cas de figures. Il peut être utilisé pour la conception, l'étude, le suivi, la planification et la gestion des barrages en terre.
- La trajectoire de la ligne d'écoulement a une influence significative sur les variations de la pression interstitielle, en particulier au niveau de la base du noyau.
- Le réseau d'écoulement dans le barrage est influencé par la hauteur d'eau à l'amont, et le système d'étanchéité.

# CONCLUSION GENERALE

## CONCLUSION GENERALE

Le comportement des barrages en terre est influencé par plusieurs paramètres et phénomènes pouvant affecter leurs performances ou engendrer la rupture. Ces phénomènes sont souvent liés en partie à l'écoulement de l'eau à travers le corps de barrage et sa fondation. L'interaction de l'eau avec ces ouvrages peut être à l'origine de dommages importants allant jusqu'à la rupture. Une grande partie de ces dommages (environ un cas sur deux des accidents recensés [30]) est due au phénomène d'érosion interne, c'est-à-dire à une migration de particules générée par un écoulement hydraulique dans le sol ou dans l'ouvrage même. Pour assurer une meilleure stabilité et pérennité de l'ouvrage, le concepteur doit posséder les éléments et données nécessaires lui permettant de bien évaluer le taux d'infiltrations à travers la structure et l'importance des forces dues aux pressions interstitielles et de prévoir ainsi le comportement de l'ouvrage dans différents cas de figures.

Notre travail vise à analyser le comportement des barrages en terre en considérant les principaux paramètres liés à l'écoulement dans ces barrages. L'outil informatique utilisé est le logiciel GeoStudio module Seep.

GéoStudio est un outil très performant et bien adapté à l'étude des infiltrations dans un barrage en terre. Il offre plusieurs avantages et présente plusieurs points forts notamment la précision, le temps de calcul réduit, le nombre élevé de paramètres pouvant être considérés, la souplesse et la compatibilité entre ses différents modules ainsi que la possibilité d'interaction avec d'autres logiciels.

En premier lieu, nous avons procédé à une étude paramétrique visant à tester l'influence des dimensions du drain horizontal sur l'infiltration dans un barrage homogène isotrope en considérant une variation de longueurs des drains allant de 11m à 58m. Pour chaque longueur, nous avons examiné les pressions interstitielles, les pourcentages des surfaces saturées et les débits de fuite. Dans un but de pouvoir, éventuellement, étendre nos résultats à d'autres cas de barrages nous avons travaillé avec la longueur relative  $L_{\text{drain}} / L_{\text{barrage}}$ .

Les résultats obtenus révèlent que pour de faibles longueurs de drains, la ligne de saturation coupe encore ou bien elle est très proche du parement aval. Au fur et à mesure que le drain est plus introduit vers l'intérieur, la surface de saturation s'éloigne du talus aval et la pression interstitielle diminue.

## Conclusion générale

---

Nous avons remarqué aussi un accroissement du débit de fuite avec l'augmentation du rapport  $L_d/L_b$  et que si l'on dépasse un rapport de l'ordre de  $L_d/L_b=0,35$  le débit de fuite augmente plus rapidement. Dans le cas d'absence du drain, la ligne de saturation débouche sur le côté aval, ce qui va déstabiliser notre ouvrage et augmente la possibilité d'occurrence du glissement sur le parement aval.

Les résultats ont montré que pour chaque longueur de barrage il existe une longueur de drain appropriée qui évite la résurgence de la ligne de saturation du côté aval. Nous sommes arrivés à trouver des ajustements donnant des relations entre les dimensions optimales des drains et celles du barrage avec de très bons coefficients de corrélation.

Lors du service d'un barrage deux types de surfaces peuvent être distinguées : une surface et une autre non saturée avec des caractéristiques physiques, mécaniques et hydrauliques différentes. Nous avons procédé à des simulations en considérant différentes dimensions des drains et pour chaque cas, nous avons calculé le pourcentage de la partie saturée des matériaux du barrage. Les résultats nous ont permis d'obtenir des relations entre la longueur du drain et la surface saturée ajustées par des courbes polynomiales avec de bons coefficients de corrélation.

Nous avons constaté aussi que l'augmentation de la longueur du tapis drainant provoque une nette diminution de la surface du sol saturé dans le barrage et une augmentation du débit de fuite évacué.

Nous avons procédé ensuite à une étude comparative entre la méthode numérique du logiciel et la méthode graphique de Kozeny largement utilisée.

A la lumière des résultats obtenus, nous avons constaté que les résultats obtenus par simulation numérique et par la méthode graphique de Kozeny sont très proches. L'erreur est inférieure à 2%. Nous pouvons donc conclure que la méthode de Kozeny reste fiable et donne des résultats très satisfaisants malgré son aspect ancien et empirique.

Nous avons terminé par une étude de cas consacrée au barrage Sikkak situé à Ain Youcef, Wilaya de Tlemcen pour lequel nous avons procédé à une analyse paramétrée des critères liés à la position de la ligne de saturation, variation du champ de la pression interstitielle et la charge hydraulique de la digue du barrage en se référant à trois niveaux d'eau en amont ( $H=218m$ ,  $H=209m$ , et  $H=205m$ ). Les résultats trouvés ont été comparés à ceux recueillis sur site. Pour le premier cas ( $H=218m$ ), nous avons remarqué un assez bon accord entre les valeurs simulées et mesurées. Par contre, l'erreur devient plus grande pour le deuxième et troisième cas. Nous pensons que les écarts

## Conclusion générale

---

constatés dans quelques cas sont dus aux limitations de la version académique du logiciel « GéoStudio 2007 Student license » qui ne nous a permis d'utiliser que trois matériaux au maximum alors que le barrage comporte plus de matériaux. La version académique limite aussi le nombre de mailles à 500.

A partir des résultats graphiques présentés dans les figures 4.5, 4.6 et 4.7, on remarque que les pressions interstitielles augmentent en s'éloignant de la crête, la valeur maximale est atteinte à la base de l'ouvrage avec une pression de 342,83 Kpa pour une hauteur d'eau de 218m et 256 Kpa pour une hauteur de 209m. On constate que l'abaissement de la hauteur d'eau dans la retenue entraîne le rabattement de la ligne de saturation, la diminution de la pression interstitielle et la charge hydraulique. Il en résulte une augmentation des contraintes effectives.

Ce travail nous a donné l'occasion de rencontrer des personnes du domaine, d'avoir une vision détaillée et minutieuse sur le projet du barrage Sikkak et d'appréhender un peu la méthodologie de gestion d'un barrage.

Il nous a permis également de mieux maîtriser AUTOCAD, de nous familiariser à la méthode des éléments finis et surtout de maîtriser l'utilisation du logiciel GéoStudio.

Nous espérons que ce modeste travail sera utile pour les recherches en hydraulique et constituera un outil d'aide quant à l'analyse des paramètres d'écoulement dans les barrages en terre et dans la conception, l'étude, le suivi, le contrôle, la planification et la gestion de ces ouvrages.

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. **Jean COSTET, Guy SANGLERAS.** Cours pratique de mécanique des sols. Tome 1, Ed. Dunod, Paris, France, 1975.
- [2]. **R. HOLTZ, W.Kovacs.** Introduction à la géotechnique, Ed. L'école polytechnique de Montréal, Montréal, Canada, 1992.
- [3]. **G. SCHNEEBLI,** Hydraulique Souterraine, Ed. Eyrolles, Paris, France, (1966).
- [4]. Cours de barrage – infiltration [en ligne]. Disponible au format PDF sur Internet : « <https://www.univ-chlef.dz/FGCA/wp-content/uploads/2019/06/cours-barrage-infiltration.pdf> ». [consulté le 27 mai 2021].
- [5]. **AMALI, A.,** « Contribution à l'étude numérique de la stabilité des barrages en remblai renforcés par des géo-synthétiques, cas barrage Ouled Abdelouahab-Sidi Aissa-M'sila ». Projet de fin d'étude. Université Mohamed Boudiaf, M'sila, 2016.
- [6]. **BENADDA, L.,** « Infiltration à travers les barrages ». Cours. Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen.
- [7]. **LEHBAB Z. et BOUKEZZI R.** « Les barrages en remblai de terre ». Polycopié, Faculté d'Architecture et de Génie Civil, Département d'Hydraulique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF.
- [8]. **CHABANI, A. ET BEKKOUCHE, A. ET ABDELAZIZ, Y.,** « Utilisation de modèles numériques pour simuler les processus d'écoulement et de transport dans les eaux souterraines ». Université Aboubakr Belkaid Tlemcen, 2009.
- [9]. **SCHLEISS, A. ET POUGATSCH, H.,** « Les barrages : du projet à la mise en service ». Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2011.

## Références Bibliographiques

---

- [10]. Réseaux d'écoulement [en ligne]. Disponible sur :  
«<http://hydrogeologistswithoutborders.org/wordpress/1979-francais/chapitre-5/> ».  
[Consulté le 1<sup>er</sup> avril 2021].
- [11]. **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, Republique du Senegal.
- [12]. **HERVE O.**, « Méthode des éléments finis ». Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2008.
- [13]. Méthode des volumes finis [en ligne]. Disponible au format PDF sur Internet :  
« <http://thesis.univ-biskra.dz/2722/5/Chapitre%2003.pdf> ». [Consulté le 27 mars 2021].
- [14]. **DOUIS, M. ET BEDJOUTI, M.**, « Etude des infiltrations des eaux par les berges et le fond des barrages réservoirs en région arides : Cas du barrage fontaine des gazelles-Biskra ».Projet de fin d'étude. Université d'El-Oued, Mai 2017.
- [15]. **BENCHERRAT, N. ET MOTEFA KARA, M.**, « Analyse paramétrée pour l'optimisation des dimensions des drains des barrage en terre ». Mémoire de projet de fin d'étude. Université AboubekrBelkaid-Tlemcen, 2017.
- [16]. **KEDDOURI, A.**, « Etude des pathologies de la digue de Oued KreirechWilaya de Djelfa », Mémoire de Magister. Universite Abou BekrBelkaid,Tlemcen, 07 juillet 2011.
- [17]. **MINISTERE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE ET SOLIDARITE.** Guide : Petits barrages en remblai et situations d'incident. 2019. Disponible au format PDF sur Internet :  
« [https://www6.paca.inrae.fr/recover/content/download/3740/36343/version/1/file/Guide\\_Petits%20barrages%20en%20remblai%20et%20situations%20d%27incident.pdf](https://www6.paca.inrae.fr/recover/content/download/3740/36343/version/1/file/Guide_Petits%20barrages%20en%20remblai%20et%20situations%20d%27incident.pdf) ».  
[Consulté le 13 mai 2021].

## Références Bibliographiques

---

- [18]. **BAGHZIM, H.** « Etude numérique de la conception des barrages en terre », Mémoire de Magister. Université Mohamed Khider– Biskra, 17 juillet 2015.
- [19]. **HAMRICHE, H.** « Etude de l'évolution de certaines grandeurs physiques d'un barrage en terre (cas du barrage de KoudietMedaouar) », Mémoire de Magister. Université Hadj Lkhdar-Batna, 09 mai 2013.
- [20]. **MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE**,  
Direction de la prévention des pollutions et des risques - Sous-direction de la  
prévention des risques majeurs 20, Ruptures des Barrage, avenue de Ségur, 75302  
Paris 07 SP – Disponible sur : « <http://www.ecologie.gouv.fr> » «<http://www.prim.net>»  
[Consulté le 30/05/2021]
- [21]. **LA REGLEMENTATION FRANÇAISE**, *La maîtrise du risque à la source*,  
[Enligne], 24/07/2013, «[www.rhone.gouv.fr/Politiques-publiques/Securite-et-protection-de-la-population/La-securite-civile/Les-risques-majeurs/Les-risques-majeurs-dans-le-Rhone/Le-Dossier-Departemental-sur-les-Risques-Majeurs/Risques-technologiques/Risque-de-rupture-de-barrage/La-prevention](http://www.rhone.gouv.fr/Politiques-publiques/Securite-et-protection-de-la-population/La-securite-civile/Les-risques-majeurs/Les-risques-majeurs-dans-le-Rhone/Le-Dossier-Departemental-sur-les-Risques-Majeurs/Risques-technologiques/Risque-de-rupture-de-barrage/La-prevention)»[Consulté le 30/05/2021]
- [22]. **CENTRE D'INFORMATION POUR LA PREVENTION DES RISQUES MAJEURES**, Rupture des barrages [En ligne]  
« [www.cypres.org/Default/rupture-de-barrage.aspx](http://www.cypres.org/Default/rupture-de-barrage.aspx) » [Consulté le 30/05/2021]
- [23]. **ROUISSAT née SMAILN.**, surveillance des barrages ,Cours Master Ouvrages hydrauliques, Université ABOU BEKR BELKAID, Tlemcen, Algérie
- [24]. **JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 84**, Loi n° 04-20 du 13 Dhou El Kaada 1425 correspondant au 25 décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable, 17 Dhou El Kaada, 1425 29 décembre 2004.

## Références Bibliographiques

---

- [25]. **GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD**, Géo-SlopeV7 (Slope/W et Seep/W), Version 7.10: User's Manual", GEO-SLOPE International Ltd, Calgary, Alberta, Canada. 2008.
- [26]. **FEMMAM, H.**, « Analyse numérique de l'influence des pressions interstitielles sur la stabilité des taules », mémoire de master. Université Mohamed Khider-Biskra.
- [27]. **MAHAMMEDI, H. ET GHOMRI, Z.**, « Analyse et tendance des deséciement superficiels entrant aux barrage du BV de la Tafna », [En ligne], Memoir Master, université AboubekrBelkaid, 2017 « <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/11863/1/Ms.Hyd.Ghomri%2BMahammedi.pdf> »
- [28]. **CHERIF, H. ET MAHBOUBI, A.**, « Monographie des barrage de la Tafna et étude spastique des apport liquide ». Université AboubekrBelkaid, 2007.
- [29]. **Ministère De Ressource En Eau, Agence Nationale Des Barrages**, Monographie du barrage d'Ain Youcef, Mars 2005
- [30]. **DANIELLE LAUTRIN**, Vieillissement et réhabilitation des petits barrages en terre, Cemagref 2003

**ANNEXES**

## ANNEXES

## Annexe 1 : Auscultation du barrage SIKKAK

## Cote de la retenue : 209m - Cellules de pression interstitielles

Date de la lecture	N° de la cellule	Zone de pose de la cellule	Lecture en (bar)	Niveau piézométrique (m)
28/12/2020	PS19	Noyau	-0,10	214,01
//	PS20	Noyau	-0,12	205,73
//	PS21	Noyau	-0,31	211,93
//	PS22	Noyau	0,02	207,05
//	<b>PS35</b>	Fondation	0,19	191,94
//	<b>PS36</b>	Fondation	/	/
//	<b>PS41</b>	Fondation	0,22	203,50
//	PS13	Noyau	-0,15	213,51
//	PS14	Noyau	-0,29	204,04
//	<b>PS15</b>	Noyau	/	/
//	PS16	Noyau	-0,28	212,16
//	PS17	Noyau	-0,07	206,40
//	PS18	Noyau	0,11	200,28
//	PS33	Fondation	-0,07	194,55
//	PS34	Fondation	0,80	193,29
//	<b>PS40</b>	Fondation	/	/
//	PS46	Noyau	0,28	201,98
//	PS1	Noyau	-0,17	213,30
//	PS2	Noyau	0,03	207,28
//	PS3	Noyau	0,25	201,46
//	PS4	Noyau	0,40	194,87
//	PS5	Noyau	1,13	194,27

**ANNEXES**

//	PS6	Noyau	0,54	183,30
//	PS7	Noyau	-0,20	212,96
//	PS8	Noyau	0,18	208,85
//	PS9	Noyau	0,40	202,92
//	PS10	Noyau	1,59	206,95
//	PS11	Noyau	2,50	207,64
//	PS12	Noyau	2,14	199,34
//	PS31	Fondation	1,32	187,18
//	PS32	Fondation	0,72	178,18
//	PS38	Fondation	0,39	178,78
//	PS39	Fondation	0,58	177,83
//	PS43	Noyau	1,21	203,04
//	PS44	Noyau	1,64	199,08
//	PS45	Noyau	1,03	188,48
//	PS23	Noyau	/	/
//	PS24	Noyau	0,00	206,84
//	PS25	Noyau	0,28	201,60
//	PS26	Noyau	0,47	200,02
//	PS27	Noyau	-0,24	212,61
//	PS28	Noyau	-0,08	206,03
//	PS29	Noyau	0,71	/
//	PS30	Noyau	0,54	200,50
//	PS37	Fondation	0,44	196,26
//	<b>PS42</b>	Fondation	/	/
//	PS47	Noyau	0,72	206,04
//	PS48	Noyau	0,45	199,63

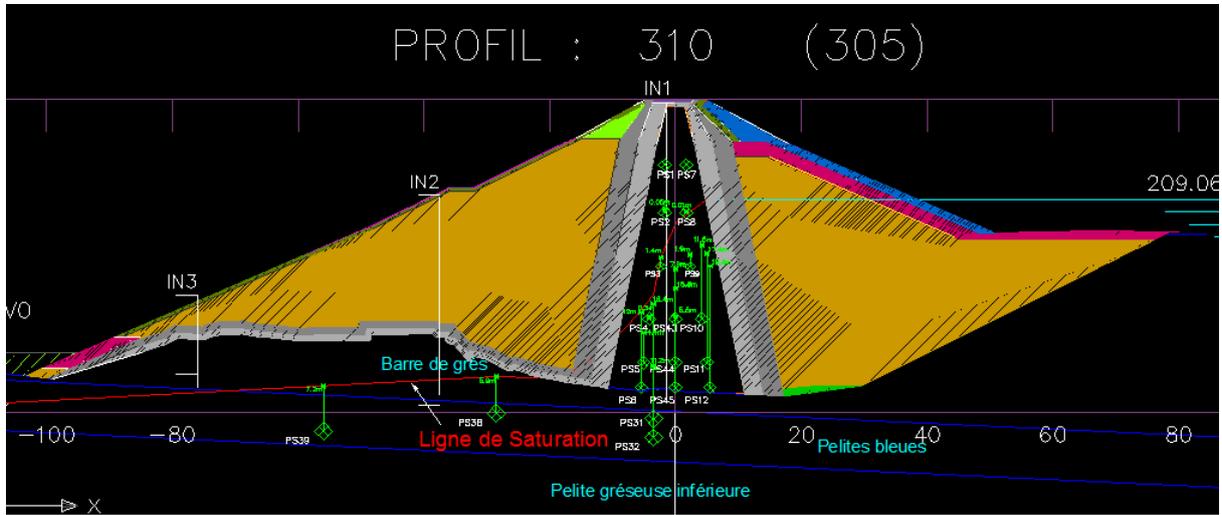
**Annexe 2 : Auscultation du barrage SIKKAK**  
**Cote de la retenue : 218m - Cellules de pression interstitielles**

Date de la lecture	N° de la cellule	Zone de pose de la cellule	Lecture en (bar)	Niveau piézométrique (m)
30/05/2013	PS1	Noyau	0,12	216,20
//	PS2	Noyau	0,35	210,52
//	PS3	Noyau	0,44	203,32
//	PS4	Noyau	0,53	196,18
//	PS5	Noyau	1,14	194,37
//	PS6	Noyau	1,01	188,00
//	PS7	Noyau	0,16	216,60
//	PS8	Noyau	0,38	210,86
//	PS9	Noyau	0,54	204,35
//	PS10	Noyau	1,82	209,28
//	PS11	Noyau	2,57	208,37
//	PS12	Noyau	2,33	201,26
//	PS31	Fondation	1,65	190,5
//	PS32	Fondation	1,01	181,10
//	PS38	Fondation	0,49	179,75
//	PS39	Fondation	0,63	178,30
//	PS43	Noyau	1,30	203,97
//	PS44	Noyau	1,67	199,43
//	PS45	Noyau	1,54	193,57

**Annexe 3 : Auscultation du barrage SIKKAK**  
**Cote de la retenue : 205m - Cellules de pression interstitielles**

Date de la lecture	N° de la cellule	Zone de pose de la cellule	Lecture en (bar)	Niveau piézométrique (m)
25/04/2005	PS1	Noyau	-0,02	214,80
//	PS2	Noyau	0,09	207,92
//	PS3	Noyau	0,23	201,22
//	PS4	Noyau	-0,04	190,48
//	PS5	Noyau	0,33	186,27
//	PS6	Noyau	0,93	187,20
//	PS7	Noyau	-0,03	214,70
//	PS8	Noyau	0,04	207,46
//	PS9	Noyau	0,31	202,05
//	PS10	Noyau	0,73	198,38
//	PS11	Noyau	1,26	195,27
//	PS12	Noyau	1,44	192,36
//	PS31	Fondation	1,80	192,00
//	PS32	Fondation	1,07	181,70
//	PS38	Fondation	0,61	180,95
//	PS39	Fondation	0,76	179,60
//	PS43	Noyau	0,37	194,70
//	PS44	Noyau	0,22	184,93
//	PS45	Noyau	1,28	190,97

**Annexe 4 : Profil principale du barrage SIKKAK.**



**Annexe 5 : Emplacement des cellules de pression interstitielle.**

