



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTÉ DE GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE  
DÉPARTEMENT de GENIE CIVIL

### MÉMOIRE DE MASTER

Présenté par : Lakhdari Mounira

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Hydraulique

OPTION : Ressources Hydrauliques

### Thème

**Simulation numérique des écoulements à travers  
un barrage en terre (Cas du Barrage Harreza)**

### Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	qualité
CHETTIH Mohamed	Pr	Président
TADJ WALID	MC.B	Examineur
DJEHICHE ABDELKADER	Pr.	Rapporteur

Promotion : 2020



## *Dédicace*

*Je dédie ce travail :*

*A la mémoire de ma mère que j'aime et qui je manque à  
ses prières et que j'aurai tant aimé qu'elle soit avec  
nous.*

*A mon petit prince rayane.*

*A ceux qui illumine ma vie et qui me toujours soutenue  
mes chères soeurs*

*Et spécialement a mimi, ilyess, et youness.*

*A mes chères amies Sans exception*



## *Remerciements*

*Tout d'abord, nous voulons dire que grâce à Dieu que nous avons pu arriver à réaliser ce travail qui est le résultat d'un long et pénible travail d'investigation... Dieu-Merci*

*Je remercie chaleureusement mon promoteur, le*

*Professeur DJEHACHE ABDELKADER, pour ses méthodes, ses commentaires constructifs, sa gentillesse et son*

*Soutien. Je ne pourrai pas trouver les bons mots pour lui*

*Exprimer ma gratitude.*

*Je remercie profondément :*

*Tous les enseignants les membres techniques et*

*Administratifs du département de génie civil.*

*En fin de compte, je voudrais remercier tous ceux qui ont rendu cette étude possible grâce à leurs différentes contributions.*

## الملخص

لقد قمنا في هذا البحث بدراسة تأثير تسرب المياه عبر سد ترابي متجانس ومدى تأثيره على استقرار السد وأخذنا كمثال على ذلك سد حرازه. في البداية قدمنا سد حرازه الذي يقع في بلدية جليدة بولاية عين الدفلة. ثم تطرقنا الطرق المختلفة لتصميم وتحليل استقرار السدود الترابية، وحماية المنحدر الأمامي والخلفي وطرق التصريف. وبعد ذلك تعرضنا الى برنامج **GEOSTUDIO** ، تطرقنا الى دراسة التوازن الهيدروليكي ثم التوازن الميكانيكي تحت تأثير التسربات الهيدروليكية وحساب مختلف الحالات لتوازن السد (أثناء الاستغلال العادي و الطارئ بوجود زلزال و بعدم وجود زلزال) بالاستعمال **SEEP/W** و **SLPOE/W**.

**كلمات البحث:** التسربات – استقرار السد - سد ترابي- سد حرازه - النمذجة الرقمية - **SEEP/W** - **SLPOE/W**.

### Résumé

Dans le présent travail de recherche, nous nous sommes intéressées à étudier l'effet de l'infiltration d'eau à travers un barrage en terre homogène sur la stabilité de barrage, et nous avons pris comme exemple le barrage de Harreza. Au début, nous avons présenté le barrage de Harreza, qui est situé dans la commune de Djelida, dans la wilaya d'Ain Defla. Ensuite, nous avons abordé les différentes méthodes de conception et d'analyse de la stabilité des barrages en terre, la protection des pentes amont et aval et les méthodes de drainage. Après cela, nous sommes passés à la présentation du programme **GEOSTUDIO**, à l'aide du programme **SEEP/W** nous avons déterminé le débit de fuite, puis l'équilibre mécanique sous l'influence des différentes conditions hydrauliques (en exploitation normale et exceptionnelle avec séisme et sans séisme) avec **SLPOE/W**.

**Mots clés :** infiltrations - stabilité – barrage en terre –barrage de Harreza – simulation numérique- **SEEP/W**- **SLPOE/W**

### ABSTRACT

In the present research, we were interested in studying the effect of the seepage through a homogeneous earthen dam on dam stability, and we took as an example of the Harreza dam. At the beginning, we presented the Harreza dam, which is located in the municipality of Djelida, in the wilaya of Ain Defla. Then, we approached the different methods of design and analysis of the stability of earth dams, the protection of upstream and downstream slopes and drainage methods. After that, we moved on to the presentation of the **GEOSTUDIO** program, using the **SEEP / W** program we determined the leakage flow, then the mechanical balance under the influence of different hydraulic conditions (in normal and exceptional charge with earthquake and without earthquake) with **SLPOE / W**.

**Keywords:** seepage - stability - earth dam - Harreza dam - numerical simulation - **SEEP / W**- **SLPOE / W**.

Table des matières

المخلص

Résumé

ABSTRACT

Liste des Tableau

Liste des figure

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Présentation de barrage Harreza .....</b>	<b>2</b>
<b>I.1 Introduction : .....</b>	<b>2</b>
<b>I.2. Situation géographique et délimitations .....</b>	<b>2</b>
<b>I.3. Présentation de barrage Harreza.....</b>	<b>3</b>
<b>I.5 Localisation du barrage de Harreza .....</b>	<b>5</b>
<b>I.7.3 Réseau de surveillance .....</b>	<b>8</b>
<b>I.7.4 Caractéristiques climatiques .....</b>	<b>9</b>
<b>I.7.4.1. Précipitations .....</b>	<b>9</b>
<b>I.7.6 Géologie .....</b>	<b>16</b>
<b>I.7.7 Géologie de la cuvette.....</b>	<b>16</b>
<b>I.7.8 Hydrogéologie .....</b>	<b>17</b>
<b>I.8. Conclusion.....</b>	<b>17</b>
<b>Chapitre II Méthodes de résolution.....</b>	<b>19</b>
<b>II.1. Introduction : .....</b>	<b>19</b>
<b>II.2.1. Écoulement confiné:.....</b>	<b>19</b>
<b>II.2.2. Écoulement non confiné: .....</b>	<b>19</b>
<b>II-3. Méthodes de résolution des infiltrations : .....</b>	<b>22</b>
<b>II.3.1 Méthode graphique : .....</b>	<b>22</b>
<b>II.3.2 Méthode analytique : .....</b>	<b>23</b>
<b>II.3.3 Méthodes expérimentales .....</b>	<b>26</b>
<b>II.3.4. Méthodes numériques : .....</b>	<b>30</b>
<b>III.4 Conclusion :.....</b>	<b>36</b>
<b>Chapitre III :Simulation de l'effet des infiltrations sur la stabilité du barrage Harreza</b>	<b>37</b>
<b>III.1. Introduction : .....</b>	<b>37</b>
<b>III.2.Étude de l'infiltration du barrageHarreza .....</b>	<b>37</b>
<b>III.2.1 Calcul les infiltrations de barrage Harreza : .....</b>	<b>37</b>

III.2.2. Résultats et validation de modèle SEEP/W .....	39
III.3. Étude de la stabilité du barrage Harreza : .....	41
III.3.1. Définition : .....	41
III.3.2 Principe d'analyse : .....	41
III.3.3 Conditions d'analyse .....	44
III.3.4 Facteurs de sécurité minimaux : .....	46
III.3.5 Stabilité de talus aval du barrage de Harreza : .....	Erreur ! Signet non défini.
III.4. Conclusion : .....	51
Conclusion Générale .....	52
Références bibliographiques	

**Liste des Tableau :**

<b>tableau</b>		<b>page</b>
<b>(I.1)</b>	Caractéristiques principales du barrage Harreza	3
<b>(I.2)</b>	Caractéristiques du barrage Harraza	4
<b>(I.3)</b>	Localisation du bassin versant de Harreza	4
<b>(I.4)</b>	Identification du Bassin Versant	5
<b>(I.5)</b>	Répartition de la superficie par tranche pluviométrique avec localisation	5
<b>(I.6)</b>	Précipitations totales annuelles dans la station pluviométrique durant la période de 2005/2014	9
<b>(I.7)</b>	Précipitations mensuelles	9
<b>(I.8)</b>	Température la région de Harreza durant la période de 2005/2014.	10
<b>(I.9)</b>	Évaporation la région de Harreza pour la période de (2005/2014).	11
<b>(I.10)</b>	Vent de la région de Harreza pour la période de (2005/2014).	12
<b>(I.11)</b>	Humidité la région de Harreza en (%).	13
<b>(I.12)</b>	Tableau des caractéristiques du bassin versant	15
<b>(II.1)</b>	Analogie des paramètres de l'écoulement souterrain et aux du courant électrique	29
<b>(III.1)</b>	Paramètres du barrage harreza	38
<b>(III.2)</b>	Résultats des débits de fuite du barrage Harreza	40
<b>(III.3)</b>	Résultats de la stabilité du barrage harreza.	48
<b>(III.4)</b>	Résultats de stabilité de la vidange rapide sans charge sismique.	49
<b>(III.5)</b>	Résultats de stabilité de la vidange rapide avec charge sismique.	50

Liste des figures		
Figure		page
(I.1)	Situation géographique de la zone d'étude	3
(I.2)	Hydrographie du bassin versant de Harreza	7
(I.3)	Variation des précipitations annuelles.	10
(I.4)	Variation des précipitations mensuelles (mm).	11
(I.5)	Variation des températures moyenne mensuelles (°C)	12
(I.6)	Variation de l'évapotranspiration moyenne mensuelle	13
(I.7)	Variation de Vent moyenne mensuelle.	13
(I.8)	variation d'humidité moyenne mensuelle.	19
(II.1)	types d'infiltration (A) infiltration confiné, (B) infiltration non confiné	22
(II.2)	Infiltration à travers barrage en terre homogène avec tapis horizontal.	23
(II.3)	Solution graphique de l'équation de Laplace.	23
(II.4)	Profil de la courbe de saturation.	25
(II.5)	La ligne de saturation d'après Kozeny.	26
(II.6)	Effet de l'anisotropie sur la ligne de saturation.	27
(II.7)	Modèle Hèle-Shaw (Modèle écoulement visqueux).	30
(II.8)	Les modules du logiciel Geostudio 2012.	31
(II.9)	Fenêtre d'analyse du module SLOPE/W	32
(II.10)	Dessin des régions et le niveau de la nappe phréatique	32
(II.11)	Introduction des propriétés des matériaux.	33
(II.12)	Fenêtre du gestionnaire des solutions.	34
(II.13)	Tracé des équipotentielles.	34

(II.14)	Distribution de la pression interstitielle après les drains.	34
(II.15)	Choix de la méthode d'analyse	35
(II.16)	Visualisation des résultats de calcul de la stabilité	35
(III.1)	Maillage de SEEP/W modèle Harreza	38
(III.2)	Ligne de saturation et la pression interstitielle à la fin de la vidange rapide.	39
(III.3)	Simulation par SEEP/W de barrage Harreza CPHE =314.9m	39
(III.4)	Ligne de saturation et la pression interstitielle à la fin de la vidange rapide.	40
(III.5)	Ligne de saturation et la pression interstitielle à la fin de la vidange rapide.	40
(III.6)	Découpage en tranche	42
(III.7)	Sollicitation pseudo-statique	44
(III.8)	Surface de rupture les plus critiques en fonction du type de barrage en terre	45
(III.9)	Glissement du parement amont sous l'effet de vidange rapide	46
(III.10)	Talus sans charge sismique (RETENUE NORMALE)	47
(III.11)	Talus avec charge sismique	48
(III.12)	Stabilité lors de la vidange rapide CRN=313m	49
(III.13)	Stabilité lors de la vidange rapide CPHE =314.9m	49
(III.14)	Stabilité lors de la vidange rapide avec charge sismique CRN=313m	50
(III.15)	Stabilité lors de la vidange rapide avec charge sismique CPHE=314.9m	50

## Liste de symbole

bc	Largeur de la crête du barrage	[L]
b	Largeur du bassin de perméabilité	[L]
$C_u$	Coefficient d'uniformité	[L]
$C_C$	Coefficient de courbure	
D	Diamètre moyenne	[L]
$e_{min}$	Epaisseur du drain	[L]
$F_s$	Coefficient de sécurité	
$H_{mur}$	Hauteur du barrage	[L]
$H_e$	Hauteur d'eau en amont du barrage	[L]
$H_r$	Hauteur totale du barrage	[L]
$H_1$	Hauteur d'eau en amont	[L]
$H_2$	Hauteur d'eau en aval	[L]
h	Hauteur d'eau	[L]
I	Gradient hydraulique	
$K_h$	Coefficient de perméabilité horizontale	[L T <sup>-1</sup> ]
$K_v$	Coefficient de perméabilité verticale	[L T <sup>-1</sup> ]
L	Longueur de l'échantillon	[L]
$m_1$	Pente du talus aval	
n	Pente du talus amont	
m/n	Facteur de forme	
P	Reste de refus du tamis	
Q	Débit	[L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> ]
T	Température	[C°]
t	Temps	[T]
$V'$	Volume de sol	[L <sup>3</sup> ]
$V_t$	Volume total de l'échantillon de sol	[L <sup>3</sup> ]
v	Vitesse de filtration	[L T <sup>-1</sup> ]
X	Largeur de la digue	[L]
$\rho_{app}$	Masse volumique apparente	[M L <sup>-3</sup> ]

$\rho_s$	Masse volumique absolue	$[M L^{-3}]$
$\mu$	Viscosité dynamique	$[L^2 T^{-1}]$
$\nu$	Viscosité cinématique	$[L^2 T^{-1}]$
$b$	Epaisseur de la tranche	$[L]$
$\alpha$	Angle que fait la base de la tranche avec l'horizontale	$[^\circ]$
$R$	Rayon du cercle de rupture de centre O	
$dl$	Longueur du plan de glissement de la tranche	
$x$	Bras de levier du poids des terres	
$C$	Cohésion du sol, elle s'exprime en unité de contrainte	
$\sigma$	Contrainte normale	
$u$	Pression interstitielle	$[M L^{-1} T^{-1}]$
$\varphi$	Angle de frottement interne.	$[^\circ]$

# INTRODUCTION GENERAL

## INTRODUCTION

La construction des barrages en terre continue à se développer en raison du fort accroissement des besoins en eau vu l'augmentation de la population et le manque de ressources hydriques. Ils sont constitués d'un matériau argileux qui assure à la fois les fonctions d'étanchéité et de stabilité, à la différence des barrages en béton. Mais de telles constructions posent des nombreux problèmes et délicats, et ces derniers sont liés en partie aux infiltrations. Les problèmes hydrodynamiques que posent ces ouvrages de retenue ou de protection sont d'une part l'évaluation et la limitation du débit de fuite à travers ou sous l'ouvrage, et d'autre part la distribution des pressions au voisinage des parements ou sous la base, intervenant dans des questions de stabilité (par exemple dans l'examen des forces de soulèvement ou des risques d'apparition des phénomènes de renard liés à l'état de boulangerie des matériaux granulaires).

L'infiltration de l'eau à travers le corps ou la fondation des ouvrages en remblai causant ces phénomènes d'érosion interne, est engendrée par la présence de renard, par le mécanisme de suffusion et d'autres mécanismes. Le phénomène de l'infiltration de l'eau est évolutif et il peut mettre en péril la pérennité ou la stabilité de ces ouvrages et par conséquent la sécurité du public. Des statistiques basées sur 11 192 barrages en remblai à travers le monde ont montré que 48% des ruptures (jusqu'à 1986) ont eu pour cause des phénomènes d'érosion interne.

L'objectif du présent travail de recherche sera d'étudier et analyser l'effet des infiltrations sur la stabilité de barrage de Harreza situé à (willaya de Ain Défla) à l'aide des logiciels SEEP/W et SLOPE/W:

**Le chapitre I :** présentation du barrage de Harreza situé à (willaya de Ain Défla).

**Le chapitre II :** a été consacré à l'étude des méthodes de résolution du problème des infiltrations à travers les massifs poreux, particulièrement dans le cas des barrages en terre.

**Le chapitre III :** simulation de l'effet d'infiltration sur la stabilité du barrage de Harreza.

Enfin, nous clôturerons notre travail, par une conclusion générale qui synthétisera notre travail de recherche.

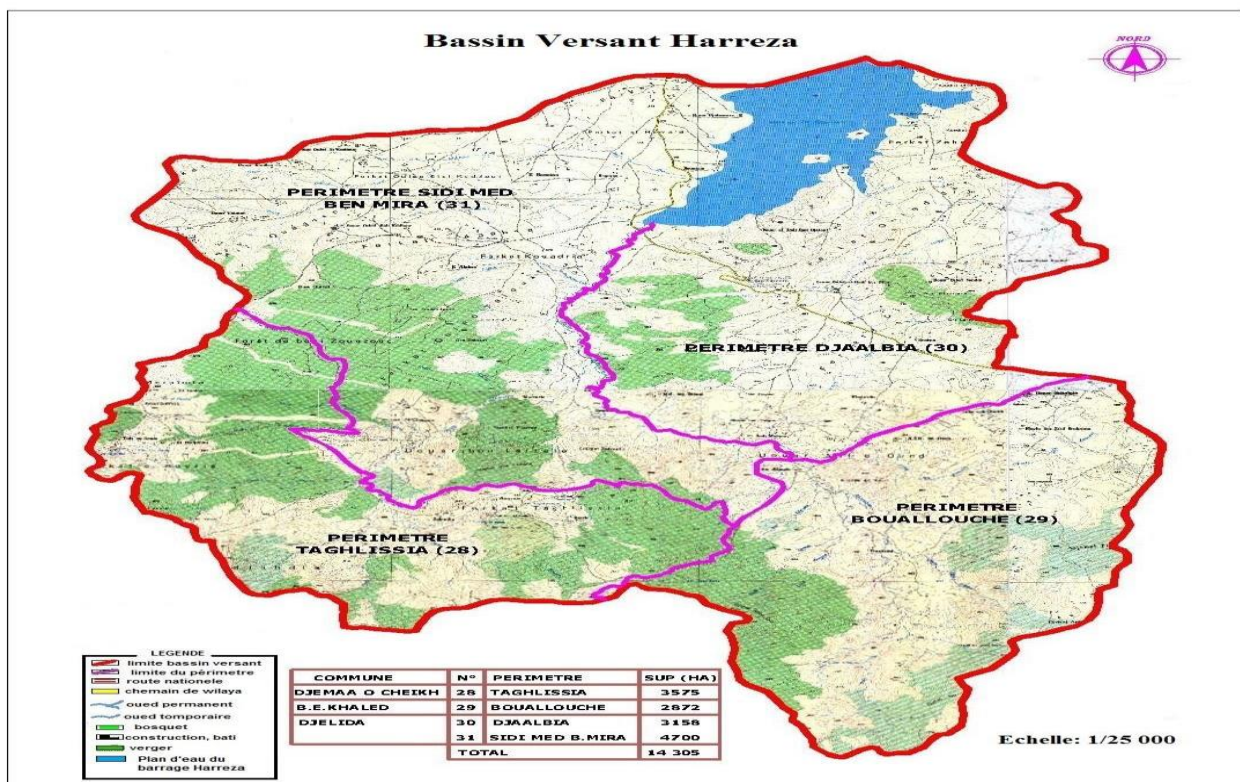
# Chapitre I

## Présentation de barrage Harreza

### I.1 Introduction :

La wilaya d'Ain Défla dispose de grandes réserves hydriques tant souterraines que superficielles, ce dernier, elles sont destinées plus particulièrement à l'irrigation. Elle est située à 150 km au Sud- Ouest d'Alger.

Elle est limitée au Nord par la wilaya de Tipaza, à l'Est par celles de Médéa et Blida, à l'Ouest par celle de Chlef, au Sud par la wilaya de Tissemsilt. Elle compte 14 Dairas et 36 communes.



**Figure( I.1) :** Délimitation du BV du Harreza. (DGF Ain Defla, 2018)

### I.2. Situation géographique et délimitations

Le bassin versant de l'oued Harreza (attribué du code 0117) fait partie du bassin de l'Oued Cheliff (01). Situé à 120 Km à l'Ouest d'Alger, entre les géographiques 2° et 2°40' de longitude Est et entre 36° et 36°40' de latitude Nord. D'une altitude moyenne de 450 mètres, il draine une superficie de 142 Km<sup>2</sup>. L'Oued Harreza parcourt une distance de 40,5 Km suivant

une orientation Sud-Est vers l'Ouest. Au sud du bassin, le relief atteint une altitude de 765 mètres, tandis que le point le plus bas est à l'exutoire avec une altitude de 313 mètres.

### I.3. Présentation de barrage Harreza

Le barrage de Harraza se trouve à 15 km au Sud-Ouest de la ville d'El-Khemis Miliana, sur l'Oued Harreza, affluent de la rive gauche de l'Oued Cheliff.

Il est destiné à satisfaire partiellement les besoins en eau d'irrigation de la haute plaine de la rive gauche du Cheliff, par stockage des eaux de l'oued Harraza et les eaux pompées à partir de l'Oued Deurdeur par la station de Khemis II (ONID).

Les caractéristiques hydrologiques et techniques du barrage sont :

### I.4. Caractéristiques hydrologiques

#### I.4.1 OUED HARREZA :

- ⊕ Capacité initiale : 70,00 hm<sup>3</sup>
- ⊕ Capacité dernier levé (2004) : 76,65 hm<sup>3</sup>
- ⊕ Apport moyen annuel : 30,80 hm<sup>3</sup>/an
- ⊕ Envasement : 0,28 hm<sup>3</sup>/an
- ⊕ Surface du bassin versant : 142 km<sup>2</sup>

#### I.4.2. BARRAGE HARRAZA :

Les principales Caractéristiques du barrage Harreza représenté dans le tableau suivant :

<b>Type</b>	Homogène avec drain vertical
<b>Hauteur maximale H</b>	41 m
<b>Largeur du barrage B</b>	295 m
<b>Largeur en crête b</b>	11 m
<b>Longueur en crête</b>	1 787 m
<b>Altitude de la crête</b>	317 m NGA
<b>Cote de Retenue Normale</b>	313 m NGA
<b>Cote des Plus Hautes Eaux</b>	314.90 m NGA
<b>Pente des talus</b>	• Amont : 1/3 • Aval : 1/2.5
<b>Perméabilité du corps</b>	2.1 e <sup>-8</sup>
<b>Perméabilité de la base</b>	1.12e <sup>-9</sup>

**Tableau (I.2) :** Caractéristiques du barrage Harraza

Barrages	Wilaya	Oued	Type	Mise en service	Capacité dernier levé Hm <sup>3</sup>	Destination
Harraza	Ain-Defla	Harreza	Terre	1984	76.65	IRR. Périmètre Haut Cheliff

Source : (DGF Djelida, 2016)



**Photo 1:** Photo d'un vue générale du Barrage de Harreza (**Cliché Bettassa et Tafiani 2018**)

### **I.5 Localisation du barrage de Harreza**

La localisation et la répartition en terre du bassin d'étude sont données par le tableau suivant :

**Tableau (I.3) :** La localisation du bassin versant de Harreza

Willaya	Daira	Commun	Nature juridique	Surface (Ha)	%
Ain Defla	Djelida	Djelida	Secteur forestier	3043	21.3
		Djmaa Ouled Cheikh	Secteur privé	9268	64.8
			Lac du barrage	867	6.1
			Divers	1127	7.8

**Source :** (DGF Djelida, 2016)

**Tableau (I.4) :** Identification de Bassin Versant

Il s'agit de la superficie située à l'intérieur du Bassin Versant et non Superficie totale.

Bassin Versant	Wilaya	Daïra	Commune	Superficie(Ha)
<b>BV. HARRAZA</b>	Ain - Défla	BORDJ EMIR KHALED  + DJELIDA	Djelida	8583 Ha
			Djemaa Ouled Cheikh	2850 Ha
			BORDJ EMIR KHALED	2872 Ha
<b>Total Bassin Versant</b>				14305 Ha

## I.6 Caractéristiques du bassin versant

**Tableau (I.5):** Répartition de la superficie par tranche pluviométrique avec localisation

Tranche pluviométrique	Superficie	Zone ou secteur de B.V	Répartition partielle des surfaces en%
350	3305 Ha	Voisinage du lac	23.1
350-450mm	5000 Ha	Partie inférieur du B.V	34.9
450-550mm	6000 Ha	Partie supérieur du BV	42

## I.7 Hydrologie

### I.7.1 Hydrographie du bassin versant de Harreza

Le bassin versant est drainé par l'oued Harreza et ses affluents. Du côté Est, l'oued Dar Emial prend sa source dans le relief de Beni Zoug Zoug et vient se jeter dans l'oued Harreza. Le bassin versant se trouve dans un foret domanial de Beni Zoug Zoug elle existe dans le territoire de la commun de djemaa Oueled Chikh et Djelida et situe dans le couté sud de la chef-lieu de wilaya de Ain Defla. L'oued Slimane se joint à l'oued principal en drainant la partie Ouest du bassin versant.

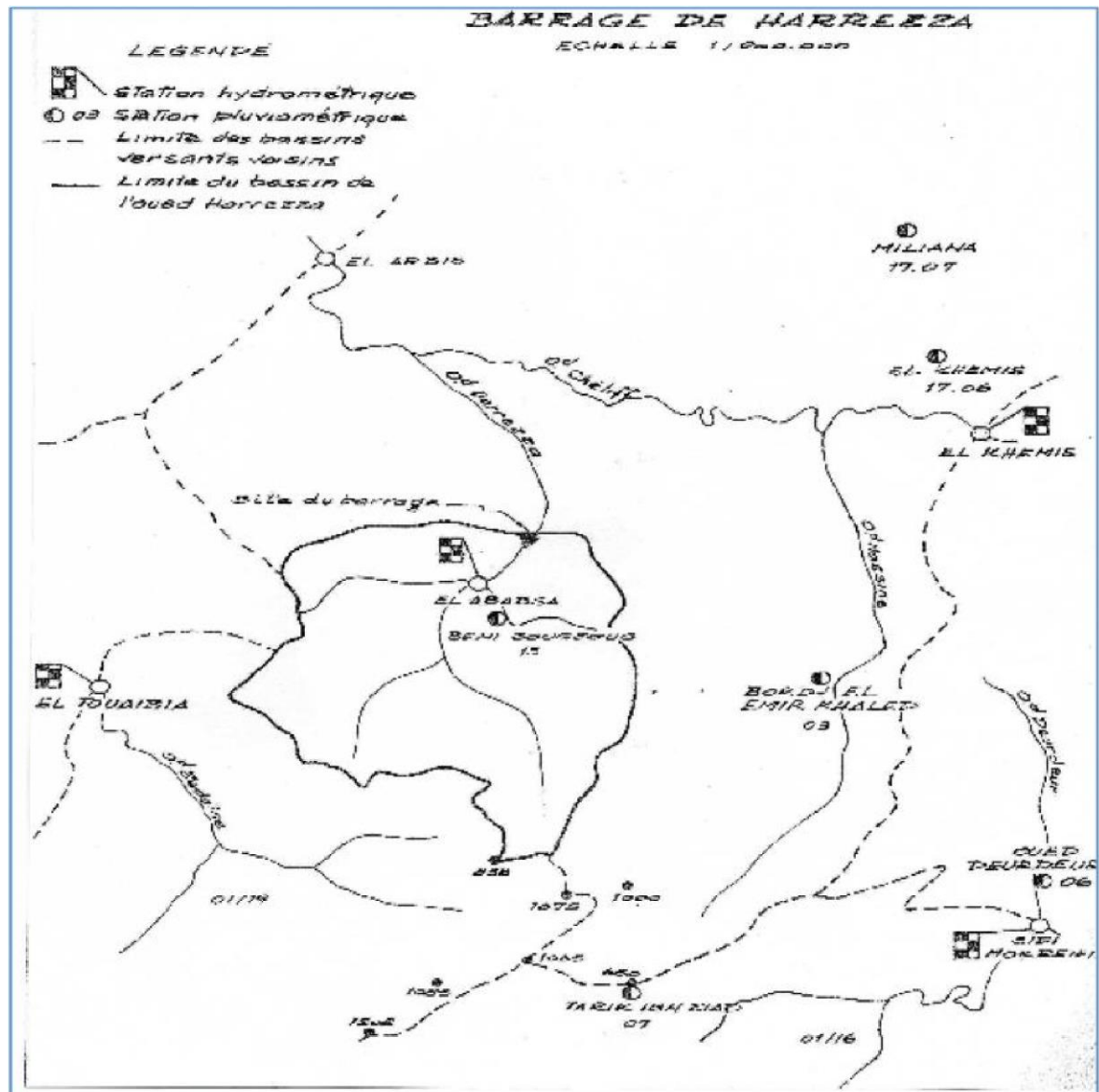


Figure ( I. 2 ) : Hydrographie du bassin versant de Harreza

(Source : ANBT ; 1985)

### I.7.2 Apportes liquide et solide de l'Oued Harreza

Les apports sont fournis pour la plupart les mois de janvier à avril. L'apport total du bassin versant, estimé en moyenne à  $7,5\text{Mm}^3$  /an. D'entente avec l'administration, les caractéristiques des crues retenues pour le Dimensionnement définitif des ouvrages sont les suivantes :

Les calculs hydrauliques, de la dérivation provisoire et de l'évacuation de crues, ont été effectués pour les débits de pointe de  $270\text{m}^3/\text{s}$  et  $800\text{m}^3/\text{s}$ , respectivement.

D'accord avec l'hydro gramme de la crue cinq millénaire le débit d'entrée arrive à la valeur maximum de  $800\text{m}^3/\text{s}$ .

---

### ➤ **Apport pompé de Oued Chélif**

Le volume moyen annuel pompé de l'Oued Chélif est évalué en;  $23,3 \cdot 10^3 \text{ m}^3$

Il sera obtenu par pompage continu à la station de pompage d'El khemis 2 pendant 6 mois et pour un débit nominal de  $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Dans le stade actuel de l'aménagement, à droite de la station de pompage, il n'est pas possible de pomper en période hivernale tous les apports du Chélif, car le niveau devant la prise d'eau latérale ne devra pas descendre au-dessous de la cote 269m pour que les pompes fonctionnent. La création ultérieure d'un seuil, qui augmente le niveau de l'oued Chélif est admise.

L'hypothèse d'un remplissage partiel du réservoir à partir de pompage dans la nappe phréatique en rive droite a été examinée mais elle n'a pas retenue, étant donné le coût élevé des adductions nécessaires à amener l'eau jusqu'à la retenue et le risque de déséquilibre hydrogéologique que cette solution pourrait comporter. .

### ➤ **Apport solides**

L'apport solide prévisible dans la retenue a été évalué par la direction du barrage compte tenu des données d'érosion spécifique disponibles dans la région et des mesures de concentration entreprises dans la station de pompage.

L'avant-projet détaillé avait retenue pour la garde d'envasement le volume de  $20 \text{ Mm}^3$ , correspondant à une durée prévisible de 30 ans. C'était une estimation déjà prudente, justifiée par l'indétermination du transport solide provenant notamment du Chélif, qui peut attendre des concentrations importantes.

Une fois que la capacité du réservoir, déterminée à la cote de retenue normale avec les éléments du nouveau plan au 1 :5000 est de  $75 \text{ Mm}^3$  au lieu des  $70 \text{ Mm}^3$  auparavant considérés, en maintenant le volume utile de la retenue de  $50 \text{ Mm}^3$ , on augmentera la garde d'envasement pour  $25 \text{ Mm}^3$  et, en conséquence, la durée qui n'apportera pas une perte du volume utile par l'envasement.

De cette façon, la garde d'envasement sera, en réel réalisé, correspondant à une durée de l'ordre de 40 ans, pour l'envasement annuelle moyen qui a été prévu.

Sur l'apport total de sédiment il est évalué que 30% proviennent de l'oued Harreza et 70% de l'oued Chélif, par pompage.

D'accord avec ces valeurs, l'envasement annuel en pourcentage du débit annuel moyen sera de 2,5% pour les apports de l'oued Harreza et de 1,8% pour les pompées de l'oued Chélif.

### **I.7.3 Réseau de surveillance**

Le réseau de surveillance du bassin versant de Harreza est constitué de :

#### **Stations hydrométrique :**

- El Ababsa (011715)
- El khemis (0117)
- El Touaibia
- Sidi Mokreife

#### **Stations pluviométriques :**

- Beni Zoug Zoug
- Miliana
- El Khemis
- Bordj el Amir Khaled
- Deurdeur
- Tarik Ibn Zaidi

De ces stations, seulement la station pluviométrique de Beni Zoug Zoug et la station hydrométrique de El Ababsa restent situées au bassin versant de l'oued Harreza en amont du site du barrage.

Au sud, dans les limites du bassin de Harreza avec les bassins versants voisins (bassins des Oueds Zeddin et Massine) il y a une partie montagneuse, qui fait que la station pluviométrique de Tarek ibn Ziad se trouve à controversant.

### **I .7.4 Caractéristiques climatiques**

La caractéristiques climatique du bassin versant Harraza est basé sur les donnée des stations météorologiques dans le bassin, les éléments principaux qui caractérisant le climat sont ; Température de l'Air, pluviométrie, vents et l'évapotranspiration.

Le climat du bassin versant Harraza est de type méditerrané avec un caractère de continentalité marquée, aux étés très chauds et secs aux hivers froids et rigoureux, avec un printemps écourté (Avril, Mai) et un automne très bref (Octobre).

### I.7.4.1. Précipitations

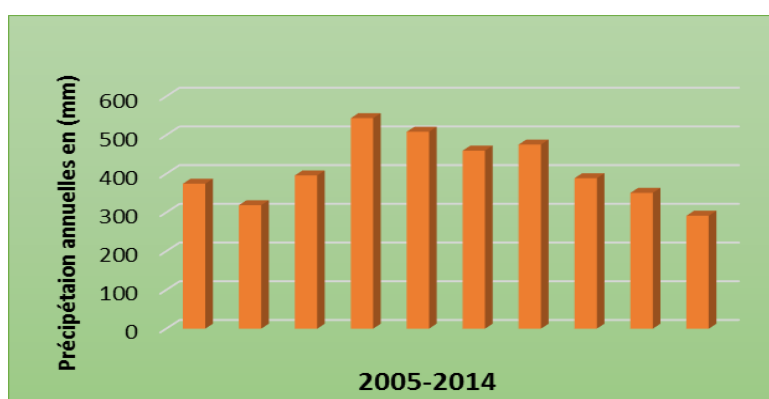
#### a) Les précipitations annuelles

La moyenne annuelle des précipitations pour le bassin versant de HARRAZA est de 415mm.

. **Tableau( I.6):** les précipitations totales annuelles dans la station pluviométrique durent la période de 2005/2014

Année	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Moyen en (mm)	374,5	319	395,9	543,9	508,7	459,9	476	437,8	351	291,9

Source :( ANRH Khemis –Miliana, 2016)



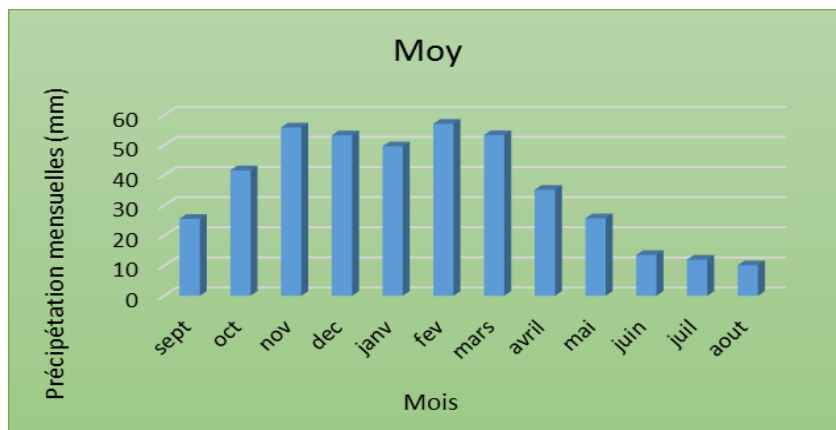
**Figure (I.3):** variation des précipitations annuelles.

Généralement, la pluie tombe sous forme d'averse de courte durée donc de forte intensité causant ainsi quelque fois une inondation.

#### a) Précipitations mensuelles

**Tableau(I.7):** Les précipitations mensuelles

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	janv	Fev	Mars	Avril	Mai	juin	Juil	Aout
2005- 2015	25,54	37,46	55,84	53,25	49,57	57,08	53,25	45,83	23,11	13,54	11,20	10,40



Source : (ANRH Khemis –Miliana, 2016)

**Figure (I.4):** variation des précipitations mensuelles (mm).

Selon le tableau et la figure on constate que :

- Une période nettement sèche et bien déterminée à partir du mois de fin juin jusqu’au mois de septembre.
- La période principale pluvieuse commence en novembre et finit au mois de mars.
- La pluviosité pendant les mois d’avril, mai et octobre présentent des passages respectivement vers la période sèche et la période pluvieuse.

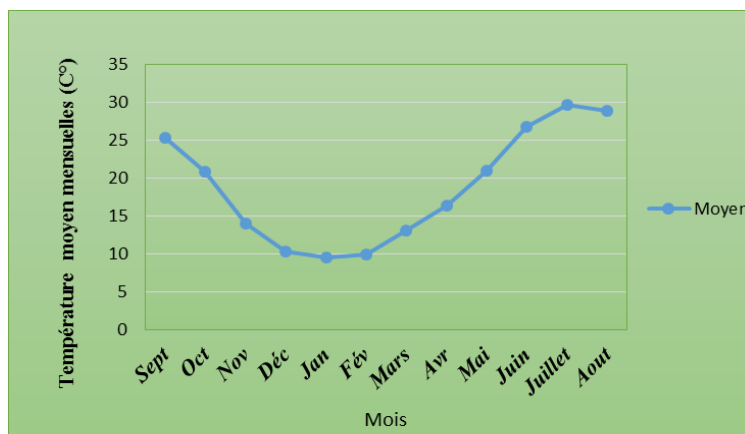
**I.7.4.2. Température**

Les données de la température présentée dans le tableau, ci-dessous montre une température annuelle, la température moyenne annuelle 18,79°C et une température minimale annuelle 8,35°C, et une température maximale annuelle 32,66°C, durent l’année (2005/2014).

**Tableau (I.8):** La température de barrage Harreza durant la période de 2005/2014 .

Années	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juillet	Aout	Annuelle
Moyen	25,26	20,86	14,03	10,35	9,58	9,88	13,05	16,34	21	26,76	29,58	28,82	18,79
Max	38,75	35	27,19	20,58	30,87	21,47	26,38	28,44	36,31	41,33	44,49	41,175	32,66
Min	14,47	8,51	4,36	2,02	2,38	1,18	2,02	5,71	8,36	12,90	19,74	18,56	8,35

Source :( ANRH Khemis –Miliana, 2016)



**Figure (I.5) :** variation des températures moyenne mensuelles (°C)

A la base ce fait et en utilisant les figures on montre que ;

- La température mensuelle maximale des mois les plus chauds 44.49 C°.
- La température mensuelle minimale des mois les plus froids 9.58 C°.
- les températures moyenne mensuelles à partir du mois de mai jusqu'à la fin d'octobre sont plus élevées que la température annuelle moyenne.
- Les mois les plus froids sont janvier et décembre.

### I.7.4.3 Evapotranspiration

L'évapotranspiration est un facteur important dans le bilan hydrologique. C'est un paramètre essentiel pour l'évaluation des besoins en eau des cultures, et par conséquent pour la demande en eau à prendre en compte dans la planification

**Tableau (I.9) :** évaporation du barrage de Harraza pour la période de (2005/2014).

Année	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Annuelle
<b>Moyen (mm)</b>	15,38	10,73	71,99	37,72	38,95	45,53	62,94	10,21	12,79	21,10	19,35	21,61	13,69
<b>Max (mm)</b>	68,11	54,34	45,22	36,67	27,20	30,12	42,23	49,63	60,56	87,33	60,35	97,17	65,89
<b>Min (mm)</b>	9,68	6,66	2,43	0,30	1,8	1,45	1,73	6,79	5,26	24,74	25,97	18,56	10,54

Source : (ANRH Khemis –Miliana, 2016)

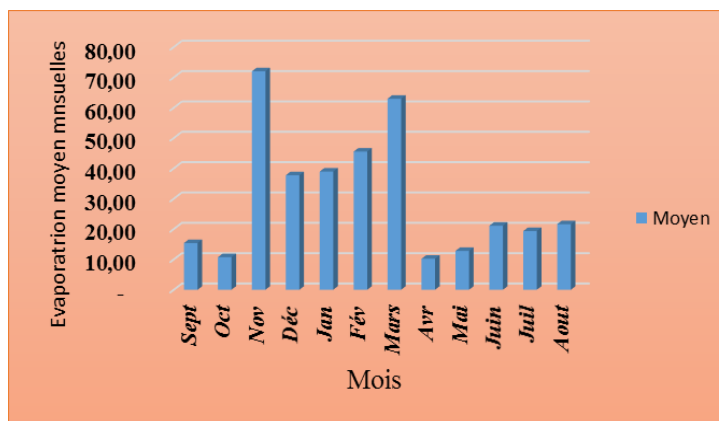


Figure (I.6) : variation de l'évapotranspiration moyenne mensuelle

**I.7.4.4. Vitesse de vent**

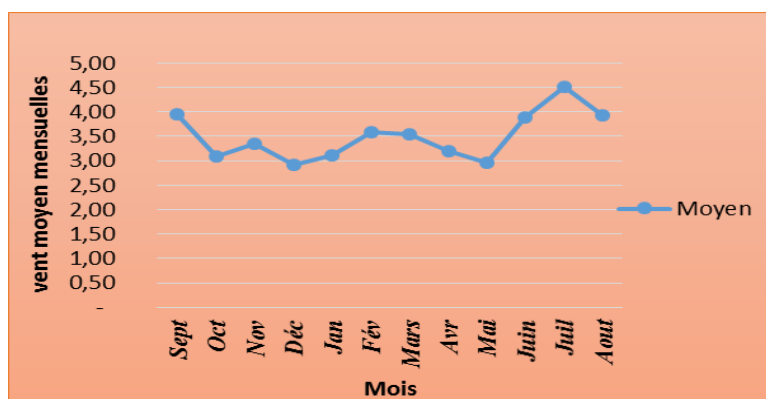
Le vent est un paramètre climatique qui influe sur le déplacement des fines particules de sable et accentue de ce fait le processus de désertification. En plus il est considéré comme un facteur provoquant de l'évaporation de l'eau.

Les vents qui viennent du Nord, bien chargés en air humide venant de la méditerranée, sont empêchés de passer vers la partie intérieure du bassin par la barrière constituée de l'Atlas qui s'allonge d'Ouest en Est. (Tableau n°9 La vitesse du vent m /s).

Tableau I.10: le vent de la région de Harreza pour la période de (2005/2014).

2005-2014	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juillet	Aout	Annuelle
<b>Moyen</b>	3,95	3,09	3,34	2,92	3,12	3,59	3,55	3,21	2,96	3,89	4,52	3,93	42,06
<b>Max</b>	7,35	8,14	10,34	10,84	12,63	10,71	11,24	8,74	8,81	6,01	5,52	5,75	106,10
<b>Min</b>	1,97	1,10	0,89	0,76	0,43	1,21	1,23	1,54	1,26	2,66	3,79	2,73	19,56

Source : (ANRH Khemis –Miliana, 2016)



Figure(I.7) : variation de Vent moyenne mensuelle.

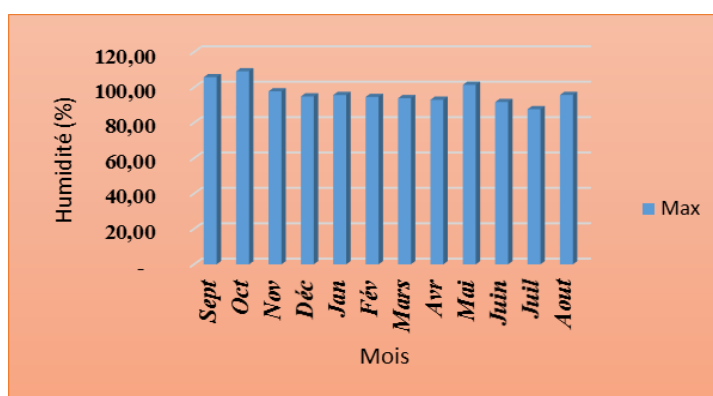
### I.7.4.5 Humidité

Les données d'humidités sont mentionnées dans le tableau II, l'humidité maximale annuelle 96.78 %, et le minimale annuelle 11.89 %.

**Tableau (I.11):** Humidité du barrage de Harreza en (%).

2005-2014	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Annuelle
<b>Max</b>	105,78	109,1	97,78	94,89	95,7	94,6	93,9	93	101,44	91,75	87,67	95,75	96.78
<b>Min</b>	0,00	10	13,5	21	18,9	12,25	9	3,5	0,00	7,00	0	0	11.89

Source : (ANRH Khemis –Miliana, 2016)



**Figure (I.8) :** variation d'humidité moyenne mensuelle.

### I.7.4.6 Grêles et neiges

Les grêles et neiges sont pratiquement présentes chaque année, elles sont enregistrées durant les mois de décembre, janvier, février et de mai, elles sont localisées au sommet.

## I.7.5 Caractéristique Hydrogéologique du bassin versant

### I.7.5.1 Densité de drainage

Elle est définie comme étant le rapport entre la longueur totale de tous les cours d'eau et la surface totale du bassin versant. (Meguenni et Remini ,2008)

$$D_d = \frac{\sum Li}{S} \quad (I.1)$$

### I.7.5.2 Coefficient de torrentialité ( $C_d$ )

Le coefficient de torrentialité est le produit de la densité de drainage par la fréquence des talwegs élémentaires :

$$C_d = D_d * F \quad (I.2)$$

Où :  $F$  : fréquence des talwegs élémentaires  $F=N/S$

Avec :  $N$  : nombre de talwegs d'ordre 1

$S$  : surface du bassin versant

### I.7.5.3 Temps de concentration

C'est le temps parcouru, par la particule d'eau pour s'écouler depuis l'élément le plus éloigné du bassin versant jusqu'à l'exutoire de ce dernier. (Meguenni et Remini ,2008)

Pour sa détermination, on utilisé la formule de GIANDOTTI

$$T_c = \frac{4\sqrt{S}+1,5L_p}{\sqrt{0.8 H_{moy}H_{min}}} \quad (I.3)$$

Où :  $L_p$  : longueur du talweg principale (Km)

$S$  : surface du bassin versant ( $Km^2$ )

$H_{moy}$  : altitude moyen du bassin versant (m)

$H_{min}$  : altitude minimale du bassin versant (m)

### I.7.5.4 Vitesse de ruissellement

Elle est donnée par la formule suivante

$$V_r = L_p/T_c \quad (Km/h) \quad (I.4)$$

Où  $L_p$  : longueur du talweg principale en Km

$T_c$  : temps de concentration en h

### I.7.5.5 Altitude moyenne du bassin versant

$$H_{moy} = \frac{\sum S_i \bar{H}_i}{S}$$

$\bar{H}_i$  : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau successive (m)

$S_i$  : Surface partielle comprise entre deux courbes de niveau Successives ( $Km^2$ )

$S$  : surface du bassin versant ( $Km^2$ )

### I.7.5.6 Indice de pente globale

$$I_g = (D/L)$$

Avec :

D : dénivelée entre H5% et H95%

L : longueur du rectangle équivalent

### I.7.5.7 Pente moyen du bassin versant

Elle est donnée par la formule suivante :

$$I_{moy} = (\Delta H * (0,5L_1 + L_2 + \dots + 0,5L_n) / S)$$

$\Delta H$ : équidistance entre deux courbes de niveau successives

$L_i$ : longueur de la courbe de niveau d'ordre I

S : surface du bassin versant

**Tableau(I.12) :Tableau des caractéristiques du bassin versant**

Désignation	Symbole	Unité	Quantité
Superficie du bassin versant	S	Ha	14305
Périmètre	P	Km	142
Altitude maximale	Hmax	M	715
Altitude moyenne	Hmoy	M	470
Altitude minimale	Hmin	M	230
Indice de compacité	Kc	-	1,5
La pente globale	I	m/km	23.9
Longueur du rectangle équivalent	L	Km	82.4
Largeur du rectangle équivalent	L	Km	12.6
Densité de drainage	D <sub>d</sub>	m/ Km <sup>2</sup>	651

Source : (DGF Djelida ; 2016)

## I.7.6 Géologie

La géologie du site, montre que, d'une Façon générale, le barrage repose :

- ❖ En rive droite : sur des matériaux résultants de l'altération des schistes ;
- ❖ En rive gauche : sur des matériaux argilo-détritiques ;
- ❖ En fond de la vallée : sur des limons argileux ;
- ❖ En rive droite, la formation est datée de l'Albien (Crétacé moyen). Sous le substratum formé par des schistes très altérés de couleur jaune, des schistes beaucoup plus compacts, de couleur gris sombre, forment la base de la série.

A l'intérieur de ces schistes on trouve des petits niveaux de quartzite et même de gros bancs très plissés et tectonisés.

Dans quelques zones ces terrains sont surmontés par des matériaux détritiques plus récents. Au sommet de la colline du Gramat se trouvent des bancs de quartzite pentes de 10° à

---

15° vers le Nord-Est. Au pied de la rive apparaissent des galets roulés ainsi que des argiles rouges appartenant au Miocène.

Dans le col, où la digue auxiliaire a été exécutée, la fondation de base des schistes était recouverte d'une couche de matériaux argilo-détritiques.

En rive gauche, sur une pente très douce affleurent des terrains de couleur rouge. La formation appartient au Miocène qui recouvre la couche de l'Albien et constituée de matériaux argilo détritiques présentant parfois un faciès conglomératique.

Au large de cette rive, un encroutement calcaire masque partiellement le substratum, constitué soit par la série argilo-détritique du Miocène soit par des schistes de l'Albien.

### **I.7.7 Géologie de la cuvette**

Les conditions géologiques de fondation de l'ouvrage de retenue présentent une hétérogénéité relative, en rive droite, puisqu'un peu de conglomérats du Miocène est trouvé en bordure de la terrasse actuelle.

Les terrains immergés étant de dominance argileuse, la retenue ne devra pas poser de problèmes d'étanchéité.

Les matériaux qui ont été utilisés pour la construction de la digue sont des limons argileux de la base terrasse existant dans la zone de la cuvette sur une bande qui se développe tout au long du lit de l'Oued.

Aussi on disposait de matériaux argilo-détritiques du Miocène pour l'éventuelle protection du parement aval de la digue prévue dans l'avant-projet détaillé.

Ces formations, qui ont déjà été commentées ci-dessus, étaient disponibles sur des zones d'emprunt localisées à proximité du site du barrage, permettent de satisfaire les besoins pour une distance moyenne de l'ordre de 2 km.

### **I.7.8 Hydrologie**

D'abord, les sondages et les puits de reconnaissance et après les excavations effectuées à droite du site du barrage et dans les zones d'emprunt en amont de la digue ont repéré la nappe phréatique à une profondeur moyenne de l'ordre de 5 m dans la terrasse alluviale Oued principal : Oued Harreza

- ❖ Ecoulement moyen annuel : 17098.600 m<sup>3</sup>
- ❖ Précipitation moyenne annuelle : 472 mm
- ❖ Envasement moyen annuel : 120000 tonnes /an
- ❖ Lithologie dominante : Marnes
- ❖ Erosion spécifique : Modérée

## **I.8. Conclusion**

Le Bassin versant de Harreza situé à 120 km à l'ouest d'Alger et drain une superficie de 142 km<sup>2</sup>. La géologie de site est disposait de matériaux argileux détritiques du Miocène et un sol limons argileux.

# Chapitre II

## Méthodes de résolution

---

### II.1. Introduction :

Les problèmes pratiques d'infiltration doivent être résolus dans le cadre de la conception et l'exploitation des ouvrages hydrauliques (barrages, canaux, puits, etc.) nécessitent une connaissance des principaux paramètres hydrauliques du mouvement de l'eau.

Ces paramètres sont en développement dans les milieux poreux en raison des différences entre deux points ou sections. Les paramètres hydrauliques les plus importants sont la quantité d'eau transportée, ainsi que les valeurs de pression et la vitesse de développement à différents points à l'intérieur du domaine. Théoriquement, la solution complète de divers problèmes d'infiltration nécessite le calcul des paramètres hydrauliques à chaque point du domaine d'écoulement.

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

### II.2. Méthodes de résolution :

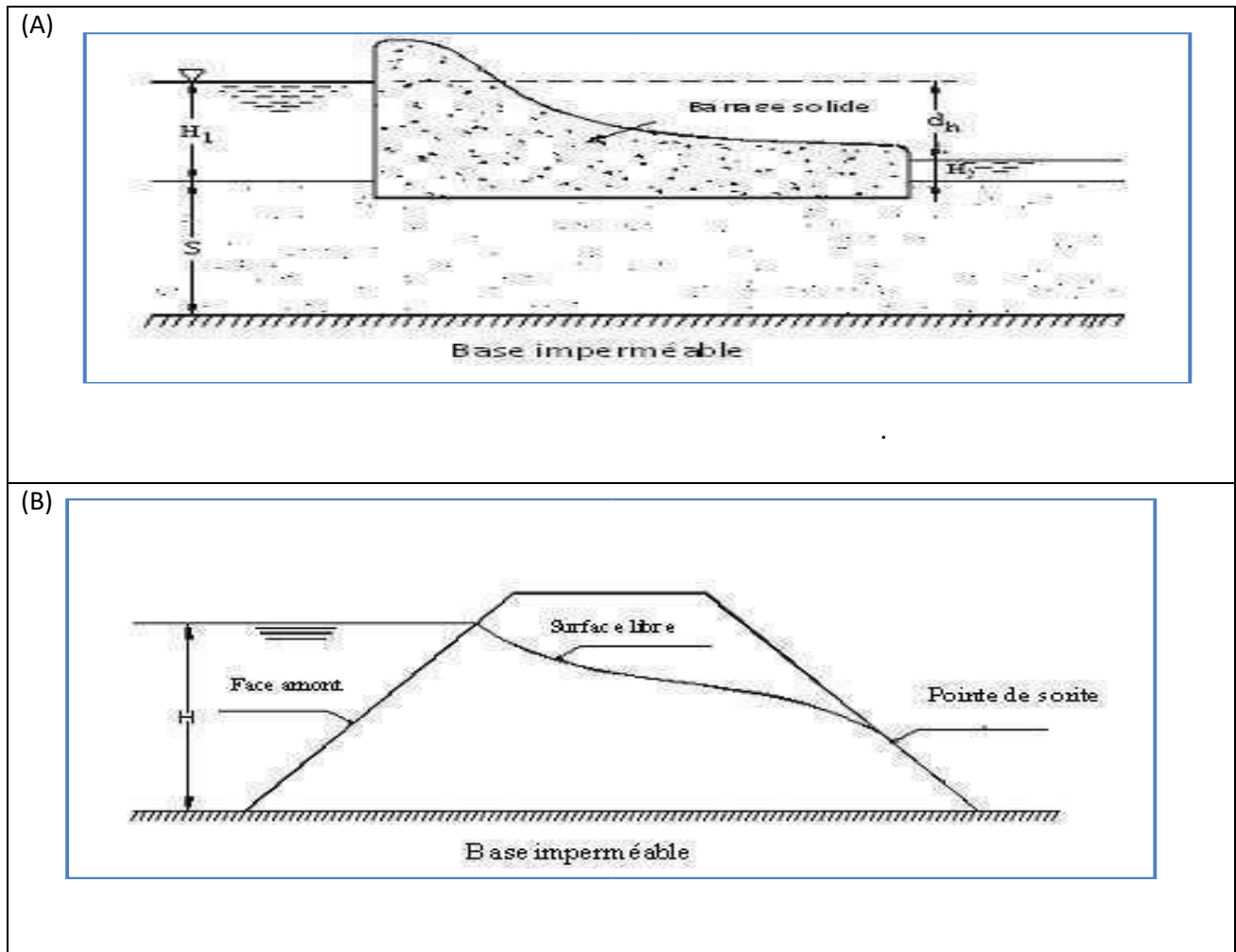
#### II.2.1. Écoulement confiné:

Dans les problèmes d'écoulement confiné, la ligne supérieure d'infiltration est soumise à une pression supérieure à la pression atmosphérique, (Figure.III.1A). Des exemples de ce type sont les infiltrations d'eau sous barrages en béton, les déversoirs et les régulateurs, puits artésiens entrent également dans cette catégorie. La ligne supérieure infiltration coïncide avec la limite supérieure imperméable de l'aquifère artésienne.

#### II.2.2. Écoulement non confiné:

Dans les problèmes d'écoulement non confiné, la surface supérieure d'infiltration est soumise à la pression atmosphérique. La pression d'eau le long de cette surface est égale à zéro à tout moment et la charge totale à tout point égale la hauteur d'élévation de surface, (Figure.II.1B).

Des exemples de ce type de flux sont des systèmes d'écoulement naturel en aquifère, infiltrations à travers les barrages en terre, écoulement vers drains souterrains.



**Figure :(II.1) :** types d'infiltration (A)infiltration confiné, (B) infiltration non confiné

La surface d'eau libre est en fait une frontière inconnue de la région d'écoulement. La solution devient encore plus complexe dans les systèmes d'infiltration non confiné que dans l'infiltration confiné.

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

- **Méthode graphique.**
- **Méthodes analytique.**
- **Méthodes expérimentales.**
- **Méthodes numériques.**

Cependant, lorsque plus d'une méthode peut être appliquée, le choix de la plus appropriée dépend de la disponibilité des experts et du temps et les coûts nécessaires pour parvenir à une solution.

Les conditions aux limites mixtes sur la surface libre, ainsi que le fait que l'emplacement de cette frontière est a priori inconnu fait une solution analytique exacte d'un tel problème le plus difficile, voir impossible, sauf dans un nombre très limité de cas.

D'après la loi Darcy à deux dimensions, la vitesse d'écoulement est liée linéairement au gradient hydraulique :

$$u = -k_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad v = -k_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad (\text{II-1})$$

Dans laquelle  $u$  et  $v$  sont les vitesses dans les directions  $x$  et  $y$  respectivement, et les constantes de proportionnalité,  $k_x$  et  $k_y$ , sont les coefficients de perméabilité dans les directions  $x$  et  $y$ .

-La charge totale de fluide est la somme de la pression et la hauteur d'élévation, ou :

$$h = \frac{P}{\gamma} + z \quad (\text{II-2})$$

- Equation de continuité pour les deux dimensions, écoulement incompressible à l'état d'équilibre :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.3})$$

En substituant l'équation, (II. 1) dans l'équation (III. 3), l'équation suivante est obtenue lorsque  $k_x$  et  $k_y$  sont des constantes:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{II-4})$$

Pour le sol isotrope, cette équation se réduit à l'objet de nombreuses études l'équation de Laplace :

$$\nabla^2 h = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{II-5})$$

Dans la relation (II.5) on remplacé la charge par le potentiel de vitesse  $\phi$

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{II-6})$$

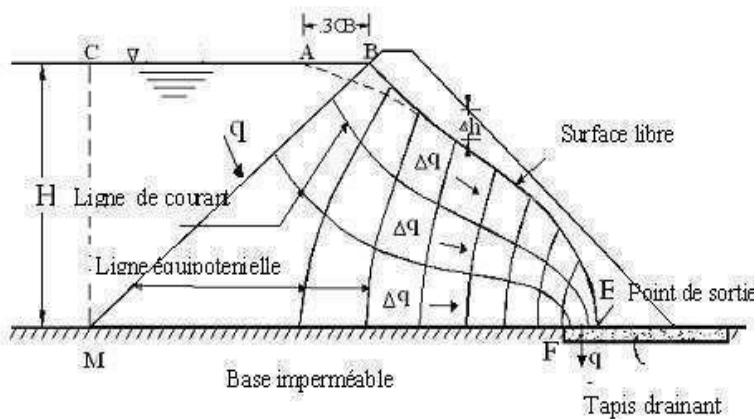
:

### II-3. Méthodes de résolution des infiltrations :

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

#### II.3.1 Méthode graphique :

Une représentation graphique de la famille des lignes de courant et de leurs correspondants des lignes équipotentielles dans une région d'écoulement est appelé un réseau d'écoulement, Fig. (II.2). Le flux net est une solution graphique à l'équation de Laplace pour l'écoulement à deux dimensions à travers un milieu homogène, isotrope ( $k_x = k_y$ ).



**Figure. (II.2) :** Infiltration à travers barrage en terre homogène avec tapis horizontal.

La méthode graphique peut être utilisée pour résoudre une large classe de problèmes que la méthode d'analyse. Son avantage est très remarquable dans le cas de l'écoulement potentiel à travers les domaines avec des limites irrégulières. D'autres types de flux telle que celle du sol à travers deux dimensions homogènes ou multicouches anisotropes peuvent également être traitées graphiquement.

Les méthodes graphiques consistent à tracer le réseau d'écoulement à la main ; en respectant le mieux possible les propriétés des réseaux, vues antérieurement. Il est toujours plus facile de construire un réseau quadratique, c'est-à-dire : Ces méthodes dépendant beaucoup de l'habileté, l'intelligence et la pratique individuelle

On peut signaler deux techniques pour tracer les réseaux à la main :

#### ✓ **Inscription de cercles :**

Dessiner sur une feuille les contours du milieu, puis repérer les lignes de courants et les équipotentielles connues d'après les conditions aux limites.

Tracer progressivement les lignes de courant et les équipotentielles en formant le mieux que possible des carrés curvilignes dans lesquels l'on peut inscrire des cercles (Fig.II.3).

Les propriétés essentielles à respecter sont :

- Les lignes équipotentielles et lignes de courant se coupent à angle droit.
- Deux lignes de courant ne doivent pas se rencontrer.
- Deux équipotentielles ne doivent pas se rencontrer.

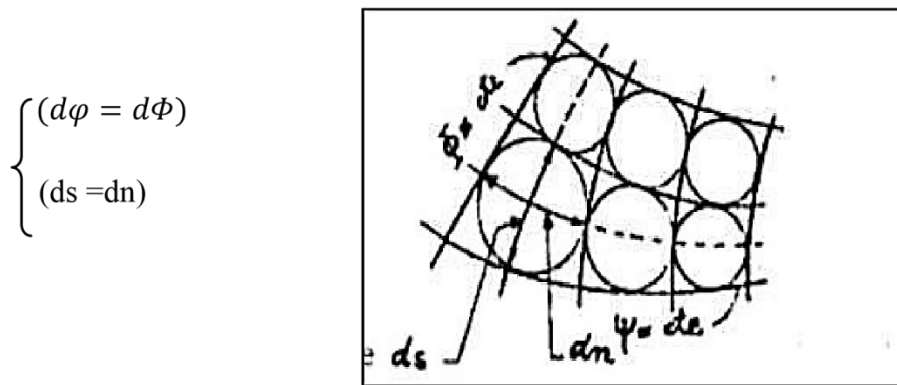


Figure. (II.3) :Solution graphique de l'équation de Laplace.

### II.3.2 Méthode analytique :

#### II.3.2.1 Théorie de Du puit :

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

La loi de Darcy est applicable, c'est-à-dire que les vitesses sont proportionnelles aux pertes de charge (gradient hydraulique).

Milieu homogène et isotrope, substratum horizontal l'eau et le milieu poreux sont incompressibles, régime permanent.

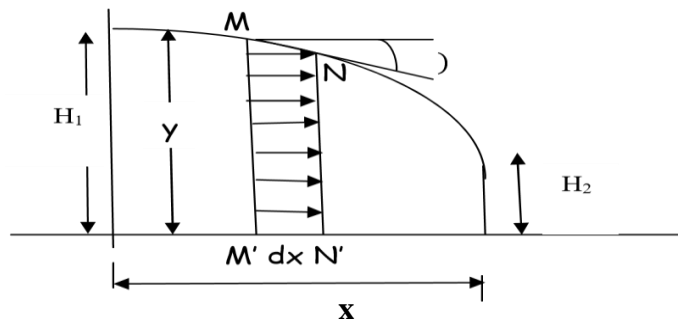


Figure. (II.4) : Profil de la courbe de saturation.

Dans une section verticale de la nappe de trace MN, toutes les vitesses  $V$  sont supposées égales, parallèles entre elles et ayant pour valeur commune  $v = k \frac{dy}{dx}$  au signe près,  $x$  et  $y$  étant les coordonnées du point  $M$  situé à la surface de la nappe dans la section transversale considérée .

On admet donc que l'écoulement se produit par tranches anneaux verticaux supposés animés sur toute leur hauteur de la vitesse horizontale  $V$  si on considère le filet liquide superficiel traversant en  $M$  et  $M'$  deux tranches infiniment voisines  $MN$  et  $M'N'$ , la perte de charge unitaire entre  $M$  et  $M'$  a pour expression exacte d'après Darcy si  $MM' = dl$  :

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

L'hypothèse de Dupuit suppose que perte de charge a pour expression :  $I = \frac{dy}{dx} = \tan \alpha$

En fait cette hypothèse reste valable tant que  $X$  petit c'est-à-dire la courbure de la surface libre est suffisamment faible.

Cette hypothèse est en défaut lorsque se trouve près de l'extrémité aval car la pente de la courbe atteint des valeurs assez grandes.

$$Q = V S = V \cdot L \cdot Y \rightarrow V = k \frac{dy}{dx} \rightarrow Q = kLY \frac{dy}{dx} = Q dx = KLY dY$$

Nous obtenons par intégration :

$$QX = \frac{1}{2} kLY^2 + cte \quad (\text{II-7})$$

En faisant intervenir les conditions aux limites on détermine la constante :  $cte = \frac{1}{2} kLH_2^2$

En introduisant l'expression de la constante dans l'équation on aboutit à :

$$Q = \frac{1}{2} \frac{kL}{x} (y^2 - H_2^2) \quad (\text{II-8})$$

L'équation de la courbe de Dupuit est donnée par

$$y^2 = \frac{x}{x} (H_1^2 - H_2^2) + H_2^2$$

(II-9)

Où :  $H_1$  : hauteur amont [m].

$H_2$  : hauteur aval [m].

$X$  : largeur de la digue [m].

L'absence du coefficient de perméabilité dans l'expression de  $Y$ , montre que la courbe pour un même matériel ne dépend pas de la perméabilité. Mais signalons que cette forme est toujours du second degré mais change d'allure quand on passe d'un type de matériel à un autre, c'est-à-dire d'une perméabilité à une autre.

**II-3.2.2. Méthode analytique semi-empirique de Kozeny :**

Pour un barrage en terre constitué de matériaux homogène assis sur une fondation imperméable, la ligne de saturation coupe la face aval du massif.

Cette position n'est pas influencée par la perméabilité du matériau composant le massif. Elle ne dépend que de la forme géométrique du massif. Ceci bien entendu dans le cas de l'isotropie.

A partir du potentiel complexe :  $\omega = \phi + i\psi = \sqrt{2}ez$

Kozeny a montré que pour les conditions énoncées ci-dessus la ligne de saturation, s'il n'y avait pas d'influence à l'entrée et la sortie de massif serait une courbe parabolique de foyer A et d'axe Ax représentée en tirets sur le schéma et d'équation :  $(x + y_0)^2 = x^2 + y^2$

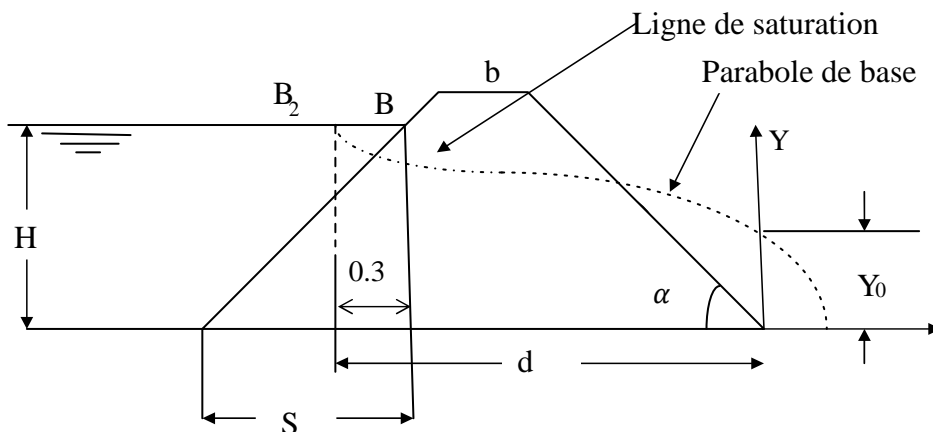
Pour des valeurs données de y les paraboles coupent la ligne délimitant le plan d'eau de la retenue en des points tels que B<sub>2</sub> de coordonnées y = H et x = d.

En supposant que l'infiltration dans les massifs de barrage en terre se comporte comme l'écoulement d'un fluide incompressible en mouvement plan permanent dans un milieu homogène, et obéit à la loi de Darcy qui met en relief la proportionnalité des pertes de charges aux vitesses d'écoulement,

Casagrande a montré que celle de ces paraboles qui passe par le point B<sub>2</sub> tel que BB<sub>2</sub> soit égal au 3/10 de la projection horizontale S de la portion de la face amont du massif en contact avec l'eau de la retenue se confond sensiblement avec la ligne de saturation.

La ligne de saturation d'après Kozeny:

$$\text{Parabole de base } x = \begin{cases} x = \frac{y^2 - y_0^2}{2 \cdot y_0} \\ Y_0 = \sqrt{H^2 + d^2} - d \end{cases}$$



**Figure. (II.5) :** La ligne de saturation d'après Kozeny.

Dans ces conditions, en faisant  $Y=H$  et  $x=d$  dans l'équation (II.5) et en remarquant que  $d$  doit être pris égal à la largeur du massif à son embase diminuée de  $0.7S$ , nous tirons la valeur de  $Y$ .

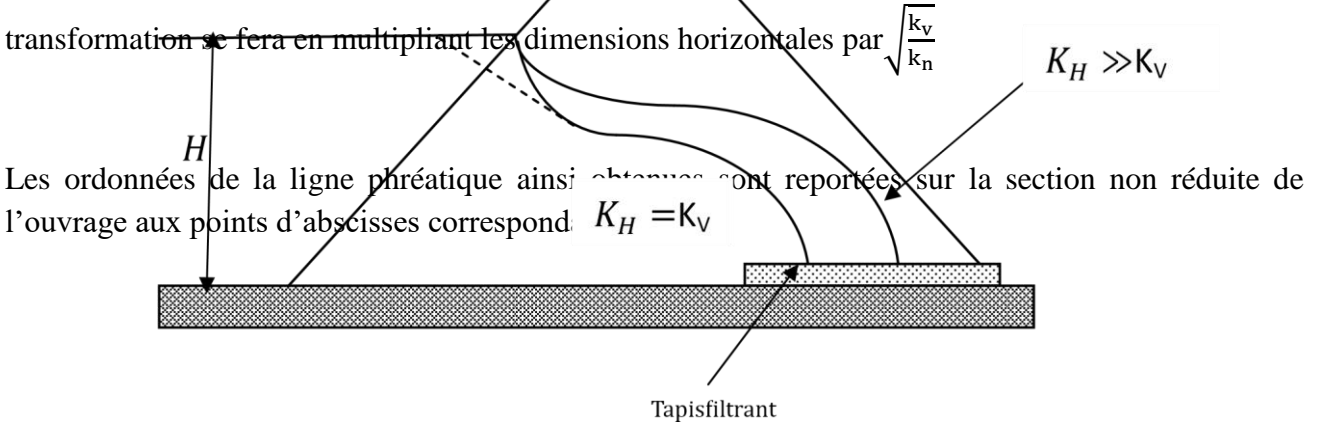
**Cas anisotrope :**

En fait, le massif du barrage ne forme pas un ensemble isotrope et les perméabilités sont différentes. Ceci est du au compactage par couches successives qui entraîne en générale une anisotropie du remblai.

Dans ces conditions, la méthode de détermination de la ligne de saturation que nous venons d'exposer et qui supposait les matériaux parfaitement homogènes et isotropie se trouve en défaut.

Il sera cependant, possible de l'appliquer en opérant une transformation au profil de l'ouvrage.

Si l'on désigne par  $k_v$  et  $k_h$  les perméabilités dans les directions verticales et horizontales, cette transformation se fera en multipliant les dimensions horizontales par  $\sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$



**Figure. (II.6) :** Effet de l'anisotropie sur la ligne de saturation.

**II.3.3 Méthodes expérimentales :**

Les méthodes expérimentales sont considérées comme utiles pour simuler l'écoulement de l'eau par des modèles en laboratoire. Il y a deux types de modèles, le modèle électrique, qui analogues de l'écoulement de l'eau par un flux de modèles actuels et physiques comme modèle de bassin de perméabilité et le modèle de l'écoulement visqueux (modèle Hèle-Shaw). Ces méthodes ont des

inconvenients tels que la construction complexe et l'exploitation. Dans le modèle de Hèle-Shaw, la viscosité du fluide varie avec la température, et le modèle de bassin de perméabilité souffre de la difficulté de représenter la perméabilité correcte du sol.

### II.3.3.1 Modèle de bassin de perméabilité :

En principe, les expériences de bassin de perméabilité représentent des reproductions à petite échelle des systèmes d'écoulement à grande échelle. En substance, on construit une maquette (généralement du sable) du prototype dans un bassin équipé de l'avant perforé et permet le passage de l'eau, lorsque l'état d'équilibre des flux est atteint, un colorant est introduit à divers endroits le long de la limite amont à proximité de la paroi transparente pour former les traces des lignes de courant.

Nous avons utilisé un modèle de bassin de perméabilité, afin d'évaluer la longueur du drain horizontal dans les barrages en terre homogène, repose sur une base perméable.

### II.3.3.2 Modèle hèle-Shaw (hydraulique) :

Pour l'écoulement des fluides visqueux, incompressibles en régime permanent, les équations de Navier-Stokes sont les équations les plus générales qui régissent l'écoulement du fluide, réduites sous forme d'énoncés généraux de la loi de Darcy. Essentiellement, le modèle se compose de deux plaques de plexiglas contenant rapprochées complètement la forme de la structure Figure.(II.7). Un fluide visqueux comme l'huile est ensuite permettre de circuler entre les niveaux d'entrée et de sortie jusqu'à état stable de flux est atteinte.

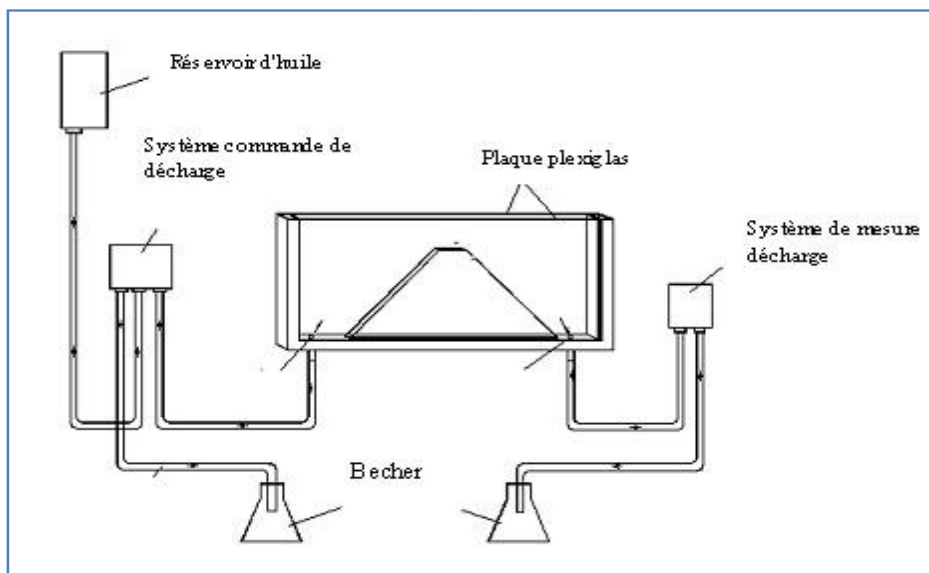


Figure .(II.7) : Modèle Hèle-Shaw (Modèle écoulement visqueux).

### II.3.3.3. Modèle électrique :

Une des méthodes les plus perspectives et largement utilisées, surtout pour la résolution des problèmes de l'écoulement souterrain, pour des sols hétérogènes de corps et de fondation des barrages

en matériaux locaux est celle des analogies électriques (électro-hydrodynamiques). Ce procédé est basé sur le fait que le courant électrique dans un milieu conducteur et le mouvement de l'écoulement souterrain laminaire sont décrits par les équations mathématique formellement analogues (équation de surface).

Il est bien connu que le mouvement de l'écoulement souterrain est soumis à la loi de Darcy :

$$V_x = -k \frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\partial \varphi}{\partial x}; \quad V_y = -k \frac{\partial H}{\partial y} = \frac{\partial \varphi}{\partial y}; \quad V_z = -k \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{\partial \varphi}{\partial z}$$

On sait aussi que la loi d'Ohm s'exprime par les formules :

$$i_x = -c \frac{\partial U}{\partial x}; \quad i_y = -c \frac{\partial U}{\partial y}; \quad i_z = -c \frac{\partial U}{\partial z}$$

La charge H, le potentiel de vitesse  $\sim$  et celui de courant électrique sont décrits par les équations suivantes en dérivées partielle

$$\nabla^2 H = \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0; \quad (\text{II.10})$$

$$\nabla^2 U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0; \quad (\text{II.11})$$

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0; \quad (\text{II.12})$$

Où  $\nabla^2$  : opérateur Laplacien.

Les variables H ;  $\varphi$  et U sont les fonctions harmoniques des coordonnées qui ayant la similitude géométrique des zones de filtration et de courant électrique et assurant les conditions convenables aux

limites permettant d'obtenir les caractéristiques correspondantes de l'écoulement souterrain en mesurant les paramètres du champ électrique.

Par exemple les lignes des courants et les lignes d'équipotentiels de l'écoulement souterrain correspondent aux lignes de courant et aux lignes équipotentiels du champ électrique. L'analogie des paramètres de l'écoulement souterrain et aux du courant électrique est représentée dans le tableau suivant :

**Tableau(II.1) :** L'analogie des paramètres de l'écoulement souterrain et aux du courant électrique .

Courant électrique	Ecoulement souterrain
-potentiel électrique U	-charge piézométrique H
-conductibilité électrique C	-coefficient de filtration k
-loi d'OHM $i = -C \frac{\partial U}{\partial l}$	-loi de Darcy $v = -k \frac{\partial H}{\partial l}$
-densité de courant i	-vitesse de filtration V
-intensité de courant I	-débit de filtration Q
-intensité de champ électrique $E = \frac{U_1 - U_2}{L}$	-gradient d'infiltration $\nabla = \frac{h_1 - h_2}{l}$
-conditions frontières,	-conditions frontières,
U=Cte-surface équipotentielle ;	H=Cte-surface de charge égale,
$\frac{\partial U}{\partial n} = 0$ surface isolée	$\frac{\partial H}{\partial l} = 0$ surface imperméable

#### II.3.4. Méthodes numériques :

L'écoulement à travers les milieux poreux se produit habituellement dans des formes qui font de domaine la possibilité d'obtenir une solution analytique hautement improbable. Le non homogénéité du sol, de la complexité des frontières et des conditions aux limites qui rend la situation encore plus difficile.

La solution numérique des problèmes aux limites est un sujet très ancien. Dans le passé, la difficulté résidait dans le nombre énorme de l'obtenir simultanément des équations algébriques, qui doivent être résolus pour atteindre la solution.

L'utilisation de méthodes numériques ont commencé à être très populaire plus d'un demi-siècle auparavant. La large diffusion de son utilisation peut être attribuée à deux types de raisons:

- Le développement des méthodes numériques forte qui peut être appliquée à presque tous les types de problèmes d'écoulement en milieux poreux. Cela a conduit à utiliser un logiciel qui peut résoudre des problèmes complexes et de présenter les résultats dans la plupart des formes pratiques.
- La production de matériel informatique relativement bon marché qui fournit à l'utilisateur la capacité de stockage énorme, système d'exploitation simple.









Les deux méthodes numériques les plus largement utilisés au traitement des problèmes d'infiltration sont :

- 1 –Méthode des différences finies (MDF).
- 2 -Méthode des éléments finis (MEF).

### III.3.4.1 Présentation du Logiciel :

**Geostudio** est un logiciel de calcul géotechnique qui permet de traiter les différents problèmes du sol comme le glissement des terrains, le tassement, la consolidation, les infiltrations des eaux dans le corps de la digue d'un barrage et d'autres problèmes liés à la géotechnique.

Il comporte huit modules à savoir SLOPE/W, SEEP/W, SIGMA/W, QUAKE/W, TEMP/W, CRAN/W, AIR/W et VADOSE/W, comme schématisé sur la figure (II.10) ci-dessous :

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

**Figure (II.8) :** Les modules du logiciel Geostudio 2012.

### Objectif des principaux modules :

**SEEP/W :** Permet de calculer les infiltrations des eaux (par la méthode des éléments finis).

**SIGMA/W :** Permet d'analyser les problèmes de la relation contraintes –déformations (par la méthode des éléments finis).

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

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

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

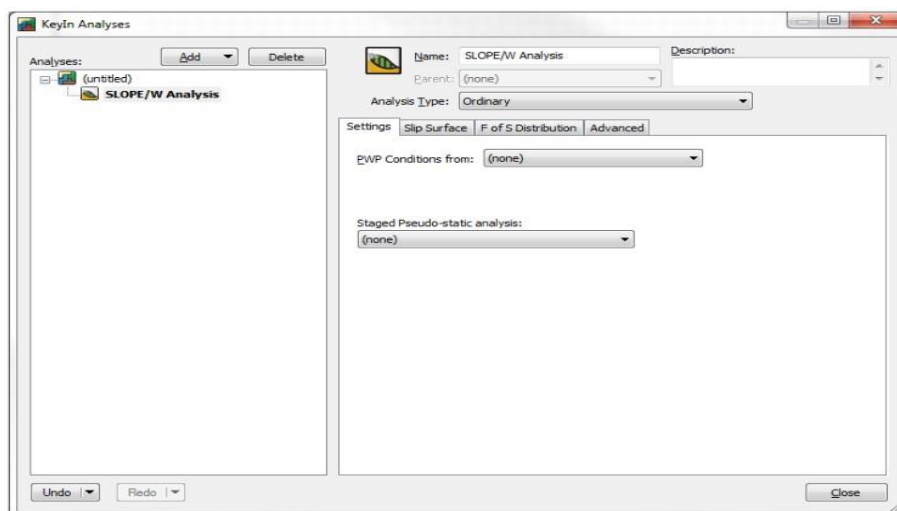
- **Le Fonctionnement du Logiciel :**

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

- ✓ **DEFINE:**

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

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



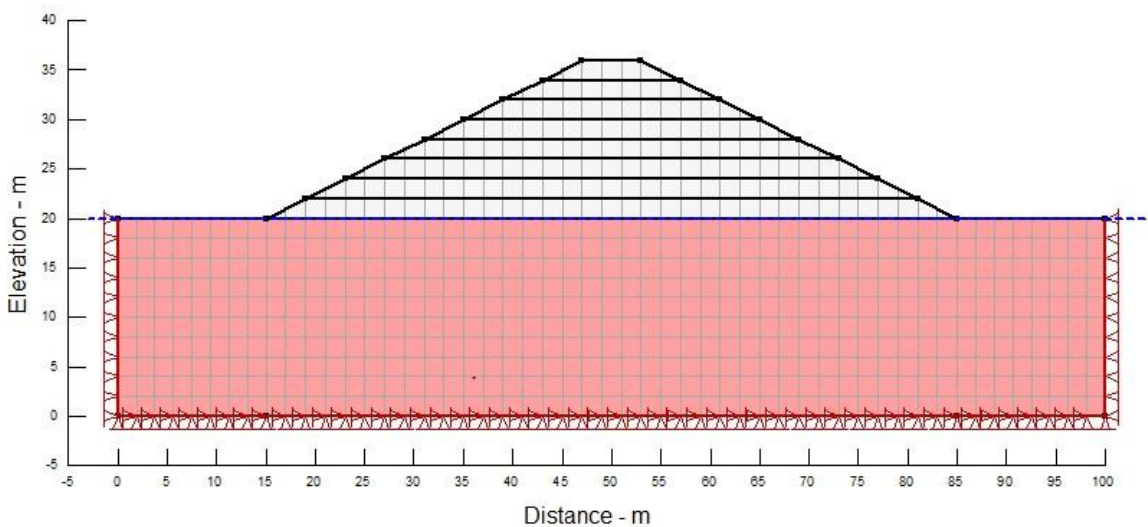
**Figure (II.9) :** Fenêtre d'analyse du module SLOPE/W

- ✓ **SET :**

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

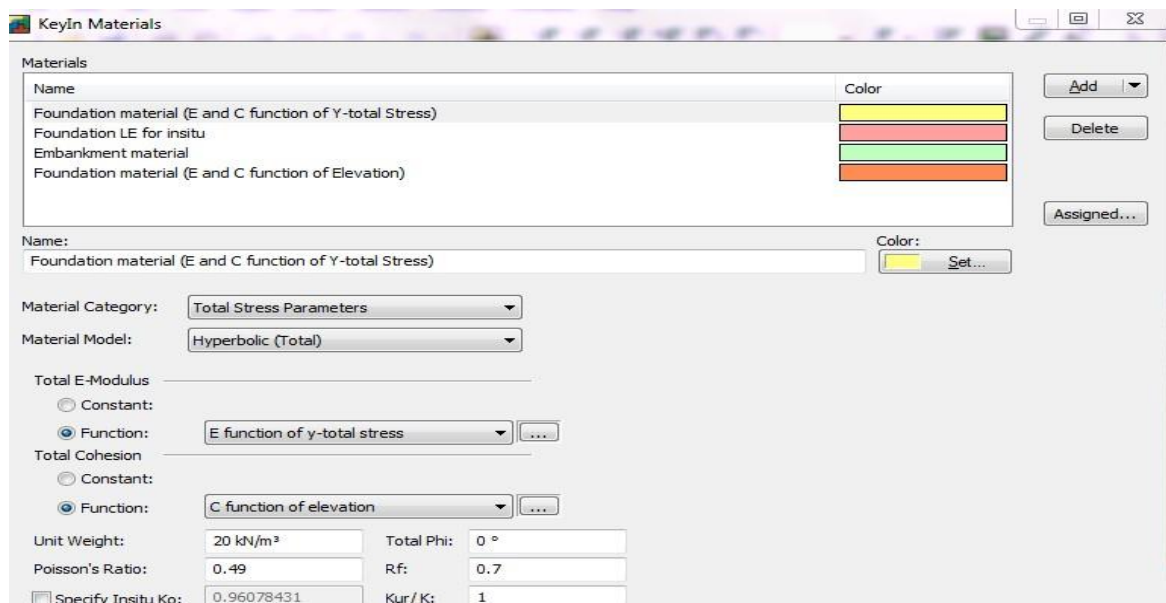
- ✓ **KEYIN :**

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



**Figure(II.10):** Dessin des régions et le niveau de la nappe phréatique

Permet d'introduire automatiquement à l'aide des tableaux les paramètres géométriques de la pente (coordonnées et couches), les caractéristiques mécaniques des différentes couches constituant le talus, des conditions complémentaires nécessaires pour le calcul, le niveau de la nappe, de sélectionner les différentes méthodes de calcul, les surcharges, l'effort sismique confortements.



**Figure (II.11):** Introduction des propriétés des matériaux.

✓ **DRAW :**

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

**Modify :**

Cette instruction permet aux utilisateurs de rajouter, éliminer, supprimer et modifier des objets dans le problème.

### Sketch :

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

### ✓ SOLVE :

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

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

### ✓ RESULTATS :

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

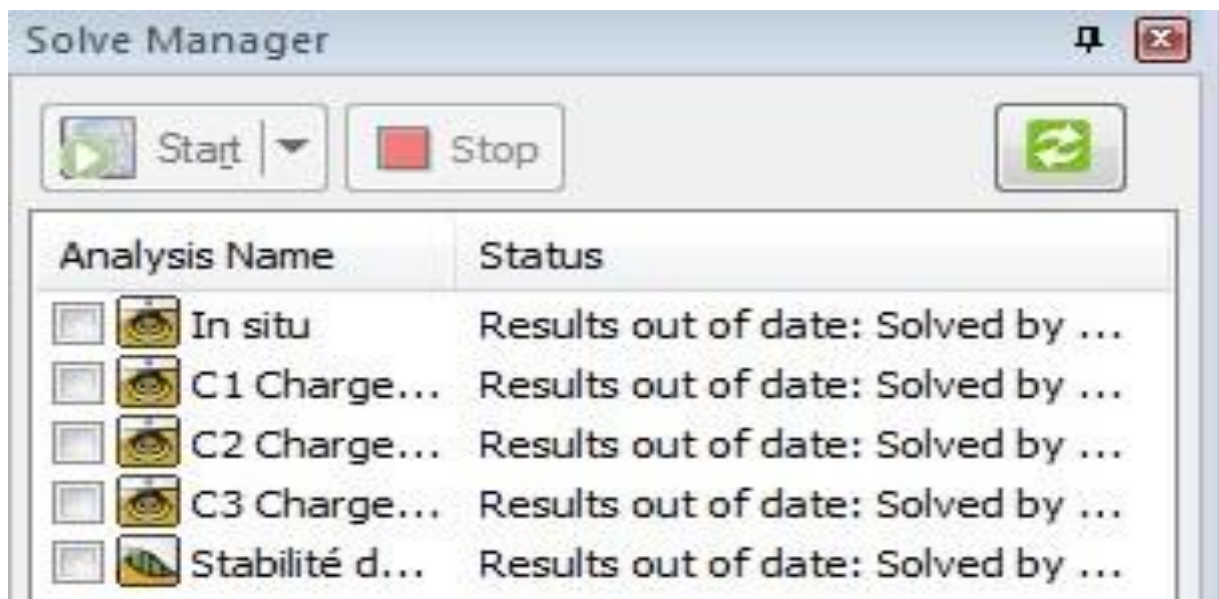


Figure (II.12) : Fenêtre du gestionnaire des solutions.

### III.3.4.2. Le module d'analyse d'infiltration des eaux souterraines SEEP/W :



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

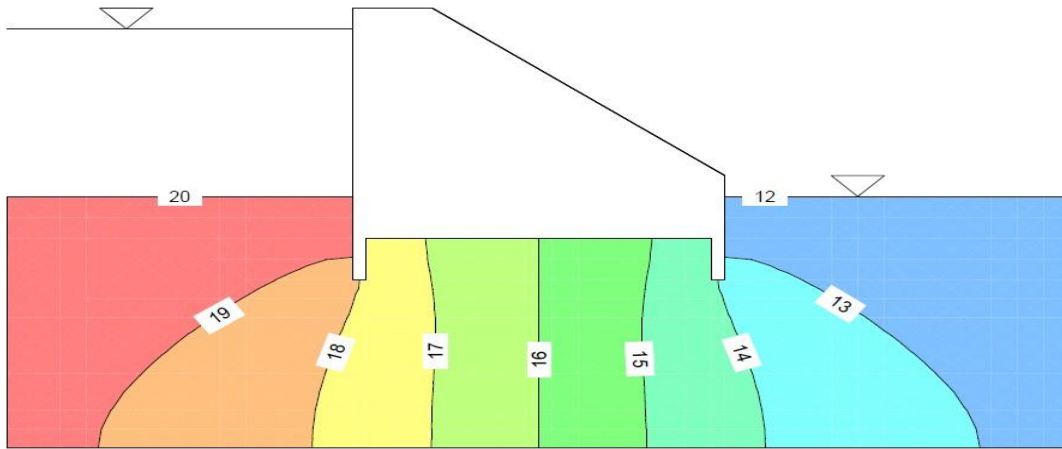


Figure (II.13) : Tracé des équipotentiels.

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

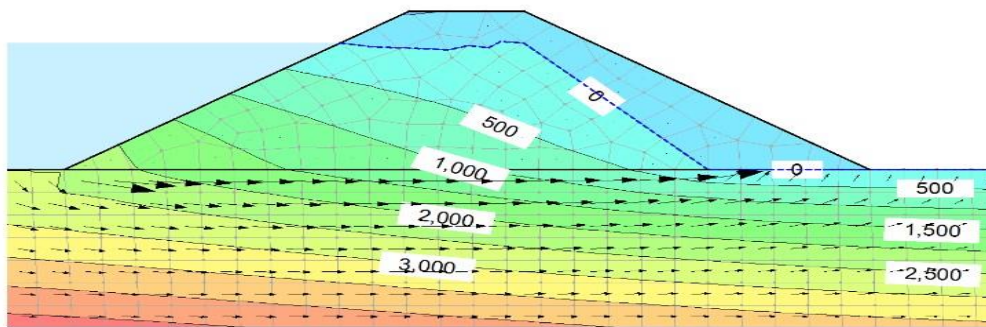


Figure. (II.14): Distribution de la pression interstitielle après les drains.

### III.3.4.3 Le module d'analyse de stabilité de pente SLOPE/W :



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

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

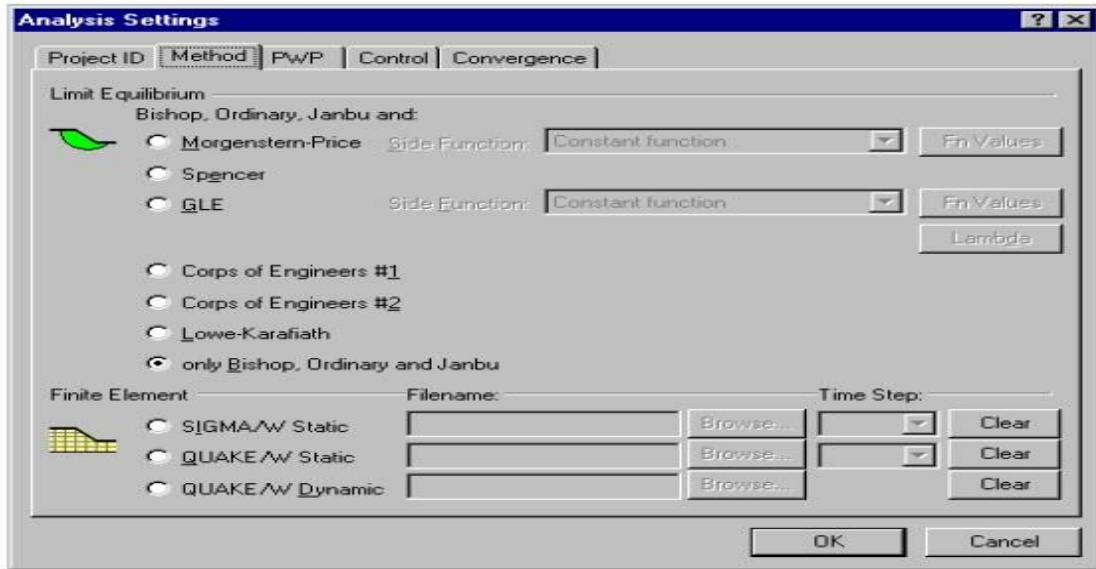


Figure (II.15) : Choix de la méthode d'analyse.

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

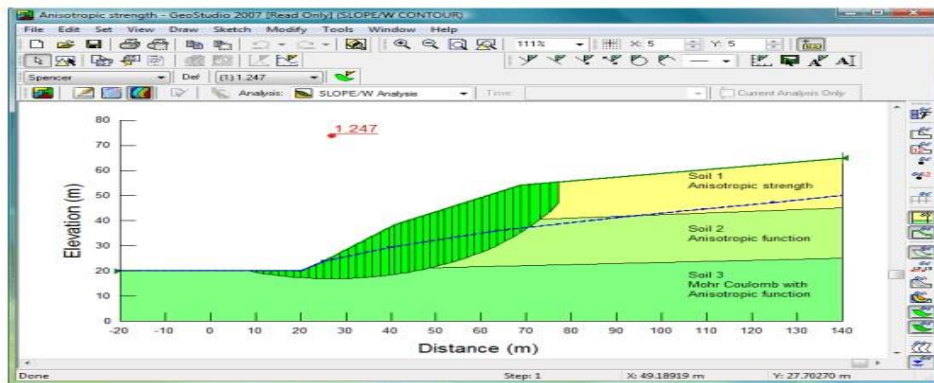


Figure (II.16) : Visualisation des résultats de calcul de la stabilité.

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

### III.4 Conclusion :

En conclusion, nous avons opté dans notre travail, de choisir le modèle numérique à l'aide des logiciels SEEP/W et SLOPE/W pour étudier et analyser l'effet des infiltrations sur la stabilité des barrages en terre (cas du barrage Harreza) un barrage à drain vertical avec un tapis horizontal.



## Chapitre III : Simulation de l'effet des infiltrations sur la stabilité du barrage Harreza

---

### III.1. Introduction :

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

Ces modèles, reposant sur des approches élastiques non-linéaires ou sur des approches élastoplastiques, permettent de décrire assez correctement le comportement des sols.

Quant aux algorithmes de résolution, leur fiabilité et leur performance dépendent surtout de la méthode de calcul utilisée et des critères de convergence fixés.

Les deux logiciels GEOSTUDIO de calcul utilisés dans cette étude et présentés ci-après sont fondés sur ces principes et sont connus pour avoir donné par ailleurs des résultats satisfaisants.

Le but de ce chapitre est de faire une simulation numérique de l'effet des infiltrations sur la stabilité d'un barrage en terre avec un drain vertical et tapis horizontal (cas du barrage harreza) avec les deux modules SEEP/W et SLOPE/W du logiciel GEOSTUDIO.

### III.2. Étude de l'infiltration du barrage harreza

#### III.2.1 Calcul les infiltrations de barrage harreza :

➤ **Régime permanent :**

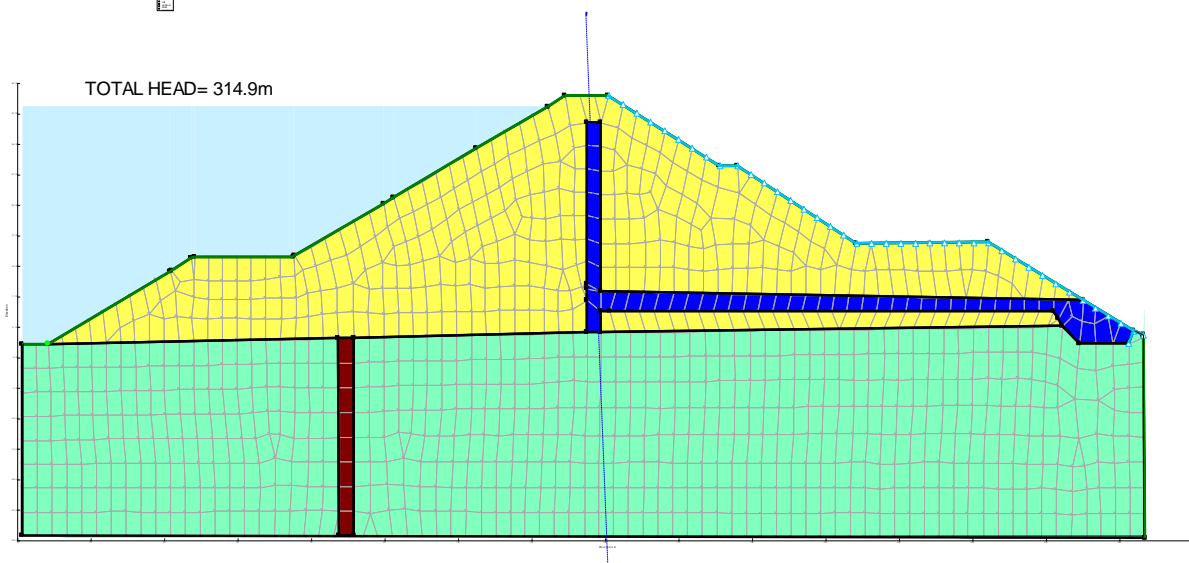
**Caractéristiques géotechnique des matériaux :**

Outre la géométrie, qui a été définie plus haut, les données d'entrée à l'étude de stabilité statique sont les caractéristiques des matériaux de la fondation et du barrage, qui sont présentées respectivement dans les tableau( III.1)

Tableau(III.1): Paramètres du barrage Harreza

Les matériaux	$K_n$ (m/s)	$K_v/k_h$	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\theta$ (°)	C
Drains	0.0032	1	21	35	0
limon-argileux	$2.1 \cdot 10^{-8}$	0.1	22.7	18	25
Foundation	$1 \cdot 10^{-9}$	0.1	22.9	16	15
viol	$1 \cdot 10^{-12}$	0.1	-	-	-

On a introduit les données nécessaires, SEEP/W génère un maillage MEF, afin d'effectuer une meilleure exécution du modèle. Les conditions aux limites amont et aval sont attribuées, pour tous les niveaux de remplissage, après l'affectation des propriétés des matériaux de construction du barrage. Lorsque le modèle est complètement développé, il va être vérifié par SEEP/W, et après acceptation du modèle, ainsi, il est prêt pour l'exécution Figure( III.1)



Figure( III.1) : Maillage de SEEP/W modèle Harreza

SEEP/W vérifié le développement du maillage, et fourni un rapport indiquant, que le maillage vertical, et horizontal est suffisamment puissant et qu'il n'y a pas d'erreur.

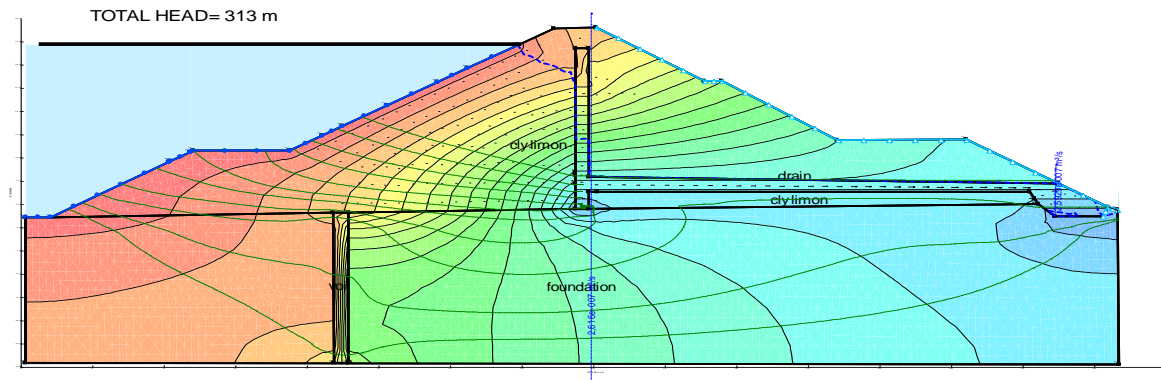
Les simulations ont été effectuées pour les deux différents niveaux de remplissage, à savoir :

-Cote de Retenue Normale =313 m NGA.

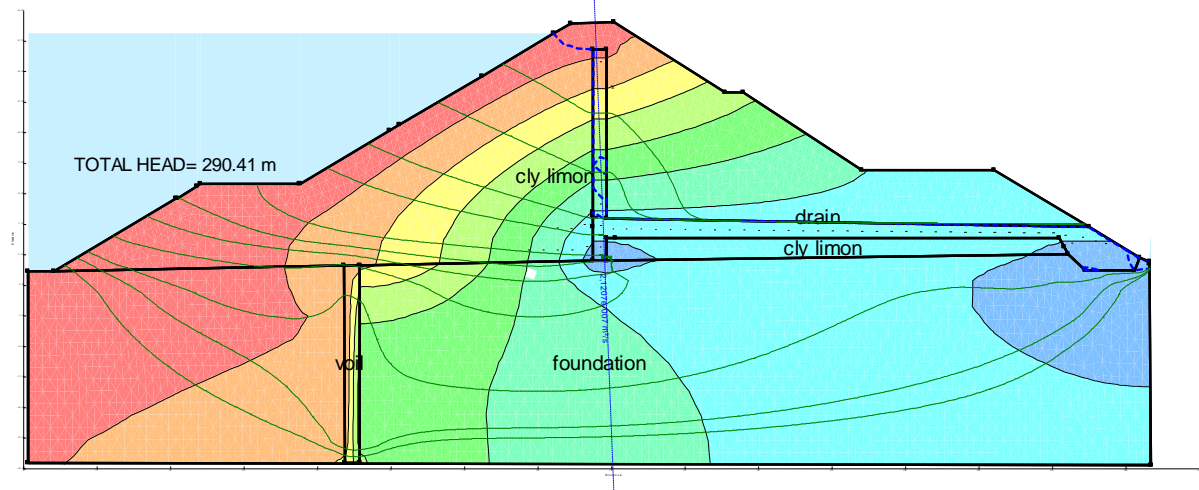
-Cote des Plus Hautes Eaux =314.90 m NGA.

### III.2.2. Résultats et validation de modèle SEEP/W

Le réseau d'écoulement a été dessiné pour et les deux niveaux de remplissage, les figures III.2 et III.3, illustrant les résultats de simulation du comportement d'infiltration de barrage Harreza, elles comprennent les lignes de courant, les lignes équipotentielles, et la ligne de saturation.



**Figure ( III.2):** Simulation par SEEP/W de barrage Harreza CRN=313m



**Figure ( III.3):** Simulation par SEEP/W de barrage Harreza CPHE =314.9m

Les résultats montrant que les lignes de courant, et les lignes équipotentielles ne sont pas normales, les uns aux autres, en raison de l'emplacement du drain vertical dans le corps du barrage, et d'un voile étanche dans la base.

À l'aide du logiciel SEEP/W, nous avons observé les débits de fuite, et les niveaux piézométriques, en amont du drain vertical, pour tous les deux niveaux de remplissage. Le

tableau (III.2 ) ci-dessous, présente les débits de fuite calculés par SEEP/W, les valeurs des hauteurs piézométriques observées sur terrain H

**Tableau (III.2):** Résultats des débits de fuite de barrage Harreza

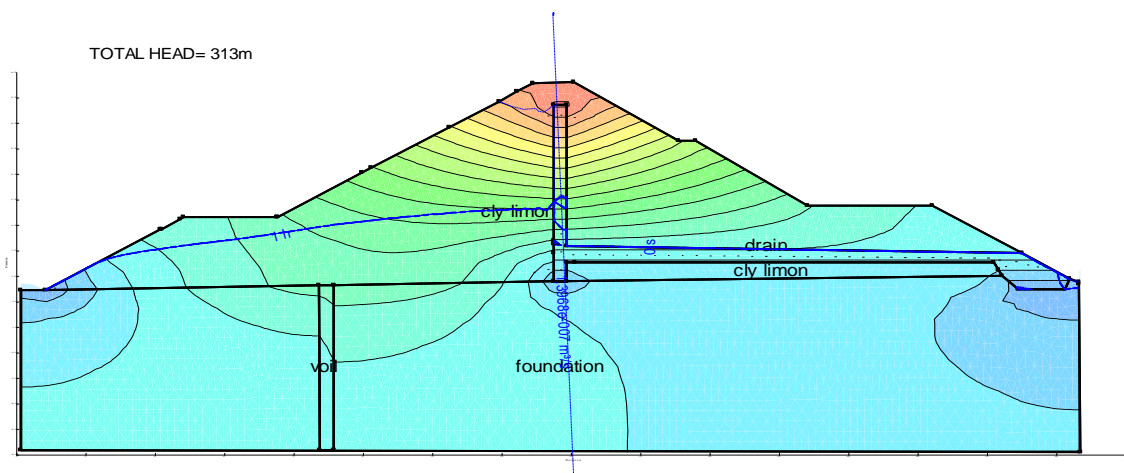
Niveau de remplissage du barrage (m NGA)	Hauteur piézométrique (m)	Débit de fuite de SEEP/W (m <sup>3</sup> /s)
313	37	2.066 10 <sup>-7</sup>
314.9	38.9	2.12070 <sup>-7</sup>

D'après le tableau III.2, nous remarquons que le débit de fuite augmente avec l'augmentation de niveau de remplissage.

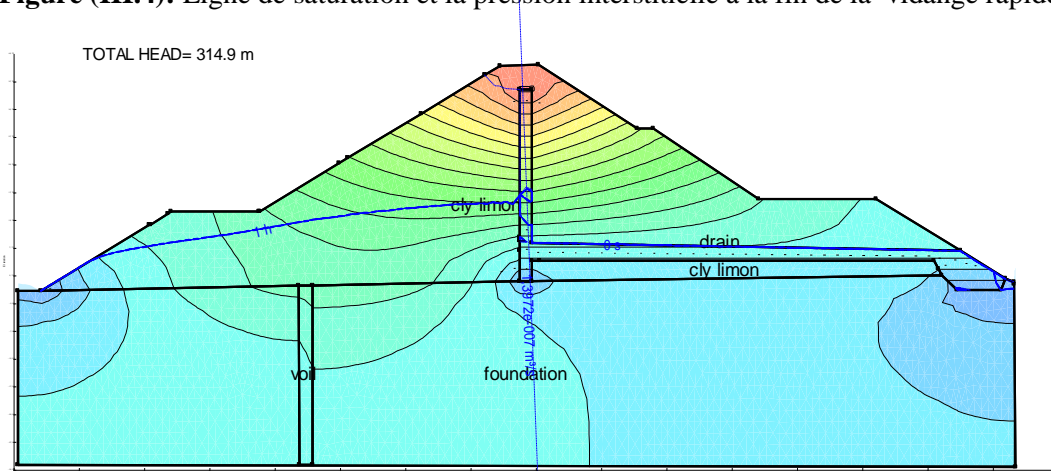
✓ Régime transitoire :

**III.2.3 Simulation Vidange rapide**

Une simulation de vidange rapide pour une période de 30 jours a été faite. Elle donne la variation de la ligne de saturation à chaque pas de temps.



**Figure (III.4):** Ligne de saturation et la pression interstitielle à la fin de la vidange rapide.



**Figure( III.5):** Ligne de saturation et la pression interstitielle à la fin de la vidange rapide.

### III.3. Étude de la stabilité du barrage Harreza :

#### III.3.1. Définition :

La stabilité d'un barrage en remblai réside dans la stabilité aux glissements de ses talus pour toute sollicitation pouvant survenir. La détermination des conditions de stabilité fait appel aux méthodes de mécanique des sols basées sur l'étude de l'équilibre limite. La stabilité des pentes peut être augmentée en choisissant des matériaux plus performants qui permettent d'éviter la rupture des talus mais aussi assurer la stabilité de la fondation et éviter les déformations excessives.

En général, on se donne des pentes qui paraissent optimales, compte tenu de la nature des matériaux, et on vérifie par une étude de stabilité que le barrage présente une sécurité suffisante avec ces pentes.

#### III.3.2 Principe d'analyse :

##### III.3.2.1 Notion de facteur de sécurité :

Il existe de nombreuses méthodes pour le calcul de la stabilité des talus. Elles sont décrites dans la bibliographie spécialisée. Certaines se prêtent au calcul manuel, d'autres nécessitent l'utilisation d'outils informatiques.

D'une manière générale, ces méthodes se basent toutes 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 qui résistent. La sécurité est assurée si, dans aucun endroit, les premières forces ne dépasseront pas les secondes. La marge de sécurité est exprimée par le rapport des forces de résistances sur les forces motrices.

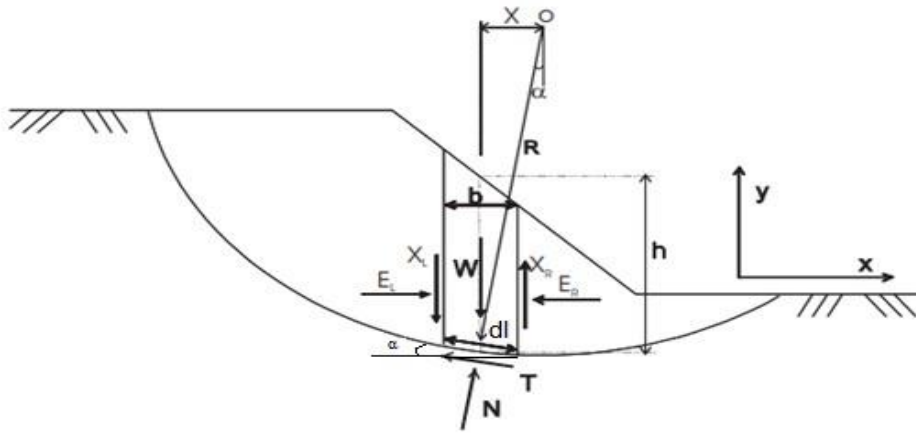
Ce coefficient de sécurité est défini par des rapports de forces, de contraintes, de moments ou même en termes de hauteurs de talus.

##### III.3.2.2 Etude de l'équilibre d'un talus de barrage par la méthode de Fellenius

Le principe de base de cette méthode consiste à découper le volume du sol étudié en un certain nombre de tranches juxtaposées (Figure III. 6), d'appliquer les différentes forces sur ces tranches et d'étudier l'équilibre de l'ensemble. Les hypothèses de calcul sont (Le Delliou 2003):

- La rupture se fait dans un plan (analyse bidimensionnelle) ;
- La rupture se fait selon une courbe dans l'allure est connue et circulaire ;
- Les forces extérieures d'entraînement sont le poids du sol et les surcharges ;
- Le problème est statique ;
- Les lois de la mécanique des milieux continus s'appliquent au sol ;
- le comportement du sol est régi par la loi de Coulomb ;
- Le coefficient de sécurité « FS » est constant le long de la courbe de rupture.

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



**Figure (III.6):** Découpage en tranche.

Pour chaque tranche verticale (i), on détermine les efforts suivants :

- Poids total  $W_i$  de la tranche de largeur  $b$  et de hauteur  $h$  ;
- La composante normale du poids sur la surface de glissement est  $W_i \cos \alpha_i$  ;
- La composante tangentielle du poids est  $W_i \sin \alpha_i$  ;
- La résultante des forces de pression sur la base de la tranche.

On note :

- $X, E$  = composantes verticale et horizontale des forces inter tranches ;
- $b$  : épaisseur de la tranche ;
- $\alpha$  : angle que fait la base de la tranche avec l'horizontale ;
- $R$  : rayon du cercle de rupture de centre  $O$  ;
- $dl$  : longueur du plan de glissement de la tranche ;
- $x$  : bras de levier du poids des terres .

Sachant que  $T = \tau \cdot dl$  et  $\tau$  est donnée par l'équation de Mohr- Coulomb:

$$\tau = C + (\sigma - u)tg\varphi$$

Avec:

$C$ : est la cohésion du sol, elle s'exprime en unité de contrainte ;  
 $\sigma$  est la contrainte normale ;  
 $u$  est la pression interstitielle ;  
 $\varphi$  est l'angle de frottement interne.

Finalement, sur la tranche (i) :

- La force motrice est la composante tangentielle du poids, elle est égale à  $w_i \sin \alpha_i$
- La force résistante est la force de frottement au niveau du plan de glissement de la tranche, elle est égale à  $C \cdot dl + (W_i \cos \alpha_i - u \cdot dl) \tan \varphi$

La largeur de la tranche  $dl$  peut s'exprimer par (voir figure III 6):

$$dl = \frac{b}{\cos \alpha_i}$$

En négligeant les forces entre les tranches verticales et horizontales, le facteur de sécurité est défini comme étant le rapport du moment résistant sur le moment moteur. Pour un cercle de glissement donné qui découpe le volume de sol en  $n$  tranches, il vaut :

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n [c \cdot dl + (w_i \cos \alpha_i - u \cdot dl) \tan \varphi]}{\sum_{i=1}^n w_i \sin \alpha_i}$$

### III.3.2.3 Prise en compte de la sismicité dans le calcul de stabilité

Prendre cet aspect en compte est très important en zone sismique (plusieurs ouvrages à travers le monde ont cédés suite à des tremblements de terre). Les méthodes employées pour apprécier la stabilité des ouvrages en séisme sont pseudo-statique ou dynamiques. Pour les petits ouvrages et un séisme faible ou modéré, on se contente généralement d'utiliser la méthode pseudo-statique. Lorsque l'ouvrage est plus sensible et le séisme plus important, il est recommandé d'utiliser des méthodes plus représentatives prenant en compte le comportement dynamique des sols.

#### - Méthode pseudo-statique

C'est la méthode la plus généralement utilisée dans le cas des petits et moyens barrages. L'effet du séisme est exprimé par une force horizontale équivalente. La magnitude de cette force est considérée comme une fraction du poids de l'ouvrage.

Dans le cas de l'application de la méthode des tranches de Fellenius, la force sismique  $P_s$  est calculée pour chaque tranche. Elle s'exprime sous la forme (Rolley, Kreitmann et al. 1977):

$$P_s = \beta \cdot K \cdot w$$

Où :–  $\beta$  est un coefficient qui dépend des caractéristiques dynamiques de l'ouvrage au séisme ( $\beta = 1.5$ )

–  $K$  : est un coefficient qui dépend du degré de séismicité de la zone et du degré d'importance de l'ouvrage ( $k \approx 0.025$ )

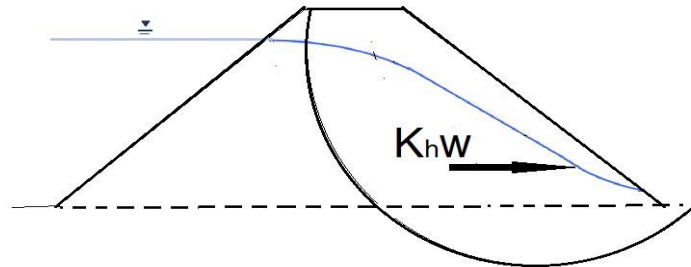


Figure (III.7): Sollicitation pseudo-statique

L'équation devient :

$$F_S = \frac{\sum_{i=1}^n [c \cdot dl + (w_i \cos \alpha_i - u \cdot dl) \operatorname{tg} \varphi]}{\sum_{i=1}^n w_i \sin \alpha_i + \beta \frac{k}{R} \sum_{i=1}^n w_i q_i}$$

$q$  : le bras de levier de la force sismique par rapport au centre du cercle O et de rayon R

### III.3.3 Conditions d'analyse

La stabilité des talus d'un barrage en remblai doit être vérifiée aux différentes phases de la construction et de la vie de l'ouvrage. On distingue généralement trois classes de conditions pour lesquelles la stabilité d'un barrage en remblai doit être vérifiée.

#### III.3.3.1 Fin de construction.

L'analyse de la stabilité pour cette condition sert à vérifier que le barrage peut être construit jusqu'à sa hauteur finale sans rupture. Il n'y a pas encore d'action de la retenue, mais les pressions interstitielles sont élevées car les surpressions dues à la construction ne se sont pas encore dissipées. La résistance est fonction de la contrainte effective  $\sigma'$  et elle devient de plus en plus faible avec l'augmentation de la pression interstitielle  $u$  ( $\sigma'$

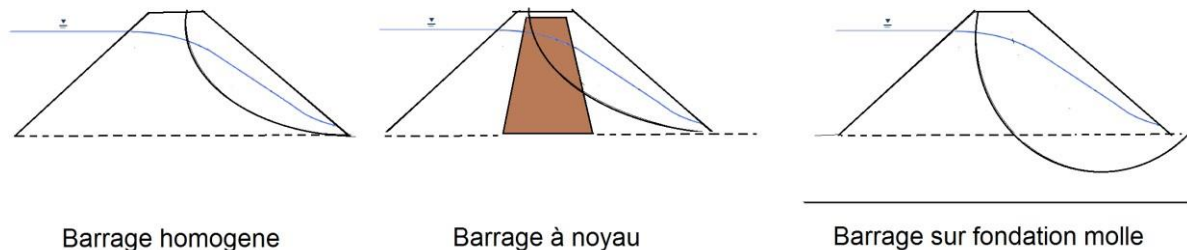
=  $\sigma - u$ ). Dans ce cas, il peut se produire un glissement du talus à cause de la diminution de la résistance au cisaillement. Il est recommandé d'analyser le talus en aval.

### III.3.3.2 Période d'exploitation

L'analyse de la stabilité sert dans ce cas à vérifier que le barrage est stable après remplissage du réservoir et une fois que le réseau d'écoulement s'est établi à travers le barrage.

Dans le secteur amont du barrage, la contrainte effective (et donc la résistance) est réduite à cause de la pression interstitielle. Cette diminution de la stabilité, associée à la réduction de  $\sigma'$  est cependant compensée par la pression du réservoir qui tend à s'opposer au glissement du talus amont.

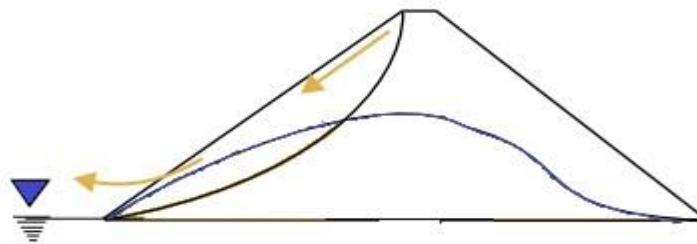
Dans le secteur aval du barrage, en raison de l'écoulement dans le massif une surface de suintement peut apparaître sur ce talus. La poussée d'écoulement qui s'exerce sur les grains solides a tendance à le déstabiliser, un drainage du talus aval est généralement prévu. Lorsque la retenue est pleine, l'écoulement est donc défavorable à la stabilité du talus aval. Les caractéristiques mécaniques du sol  $C$  et  $\Phi$ , quel que soit la condition de perméabilité du matériau de construction, peuvent être obtenus à partir de l'essai de résistance au cisaillement à long terme, surconsolidé, saturé et drainé.



**Figure(III.8):** Surface de rupture les plus critiques en fonction du type de barrage en terre

### III.3.3.3 Vidange rapide.

La condition 'vidange rapide' est rencontrée lorsque le niveau d'eau diminue brusquement au-dessous du niveau normal de la retenue (Figure III.9). Dans ce cas les pressions d'eau dans le corps de l'ouvrage ne sont pas dissipées, alors que la pression d'eau extérieure a disparu. Le talus amont se trouve dans une situation plus défavorable qu'en condition normale d'exploitation. C'est donc ce secteur amont du barrage qui est affecté par la condition 'vidange rapide', on conserve la pression et on enlève l'effet stabilisateur du réservoir.



**Figure (III.9):** Glissement du parement amont sous l'effet de vidange rapide

### III.3.4 Facteurs de sécurité minimaux :

Selon les normes DIN (Le Delliou 2003) les facteurs de sécurité minimaux utilisés dans les barrages en terre sont dans les:

- Conditions normaux (lac plein à niveau normal)  $F_s \geq 1.4$
- Conditions spéciaux sans séisme (lac plein à niveau exceptionnelles, vidange rapide)  $F_s \geq 1.3$
- Conditions exceptionnelles avec séisme (lac plein à niveau normal, vidange rapide, lac vide)  $F_s \geq 1.2$

On note qu'à l'aide d'outils informatiques performants les surfaces de glissements critiques sont trouvées rapidement. Un exemple est donné dans l'application suivante élaborée à l'aide du logiciel GEOSTUDIO.

### III.3.5 Stabilité de talus aval du barrage de Harreza :

La digue de Harreza est une digue homogène composée de limon-argileux, dont les caractéristiques sont données dans le **Tableau (III.1)** ;

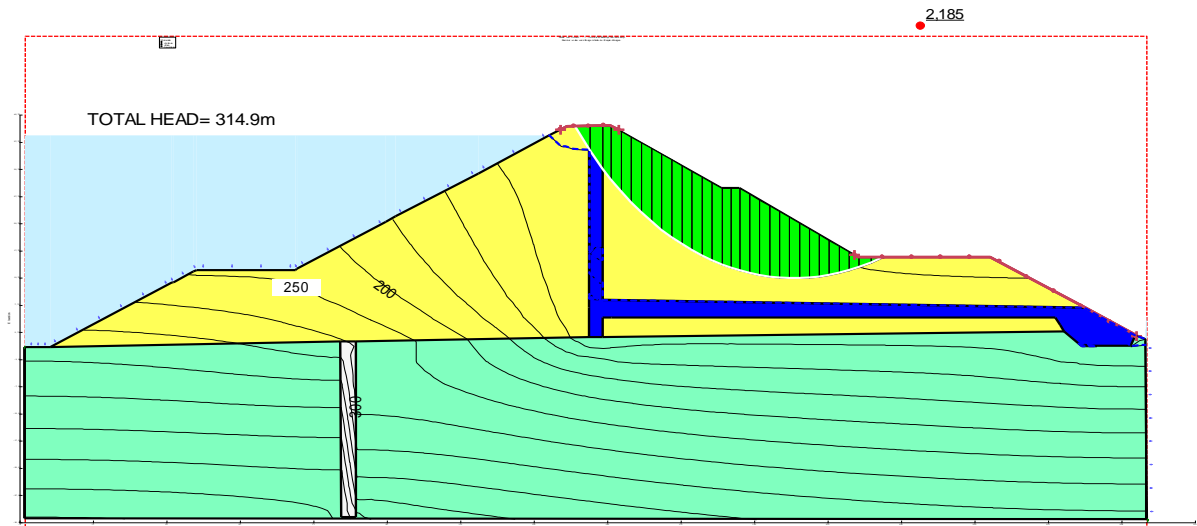
#### III.3.5.1 Stabilité mécanique du talus aval (RETENUE NORMALE) sans séisme :

Le calcul du facteur de sécurité se fait en deux étapes :

- Un état initial sous l'effet du poids propre et la charge hydraulique, modélisé par le module seep/w.

-une calcul du facteur de sécurité qui démarre à partir de l'état initial, modélisé par le module **slope/w**.

La valeur du facteur de sécurité minimal donnée par la méthode de SPENCER est  $FS=2.185$  comme le montre la figure III.10.



**Figure (III.10) :** Talus sans charge sismique (RETENUE NORMALE).

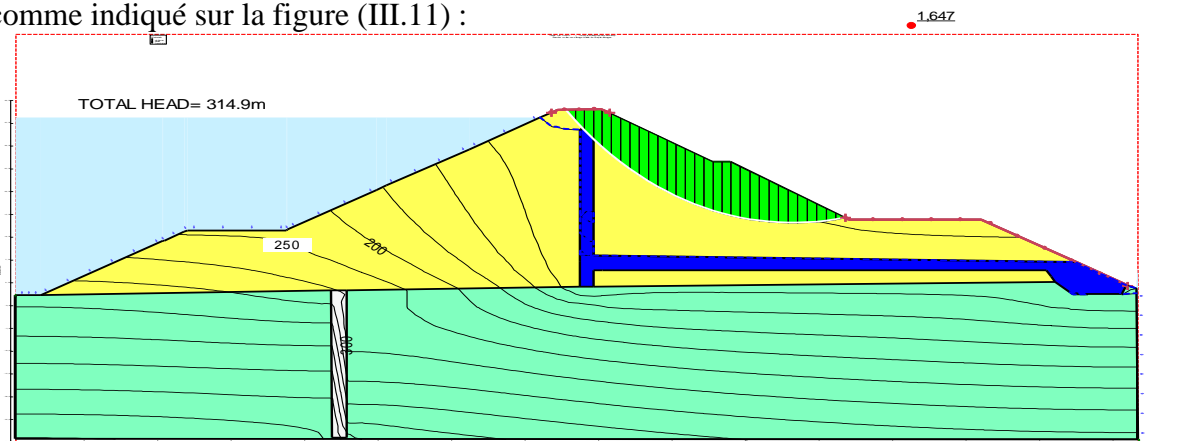
### III.3.5.2 Stabilité mécanique du talus aval (RETENUE NORMALE) avec séisme :

Le calcul du facteur de sécurité se fait en deux étapes :

- un état initial sous l'effet du poids propre et de la charge hydraulique, modélisé par le module seep/w.
- une calcul du facteur de sécurité qui démarre à partir de l'état initial, modélisé par le module slope/w.

Le coefficient d'accélération sismique horizontale pris en compte est de **0.1g**.

La valeur du facteur de sécurité minimal est donnée par la méthode de SPENCER est  $FS=1,647$  comme indiqué sur la figure (III.11) :



**Figure (III.11) :** Talus avec charge sismique.

L'étude de la stabilité du barrage harreza pour le cas de charge a donné les résultats suivants :

**Tableau.(III.3)** Résultats de la stabilité du barrage Harreza.

Cas étudiés	référence	Fs	Observation
Fin de construction aval sans charge sismique	$\geq 1,4$	2,185	Satisfaisante pour les barrages
Fin de construction aval avec charge sismique	$\geq 1,2$	1,647	Barrage stable

### III.3.5.3 Stabilité lors de la vidange rapide :

#### a- Une vidange instantanée :

La charge hydraulique passe du niveau maximal  $h=37\text{m}$  vers une charge hydraulique  $h=0\text{m}$  instantanément.

#### Conditions aux limites :

Pour ce cas d'étude on définit 3 conditions aux limites :

- Face amont instantanée : débit total nul le long de la ligne mouillée inclinée de  $H$  à  $0\text{m}$ .
- Niveau rabattement  $0\text{ m}$  amont : Le premier Point du talus amont  $(0,0)$ .
- Drain en aval: charge hydraulique nulle dans la région du drain horizontal.

**Le calcul se fait à l'état transitoire.**

#### ✓ Résultats des calculs :

Le logiciel permet de calculer le coefficient de stabilité à chaque intervalle de temps lors de la vidange rapide .

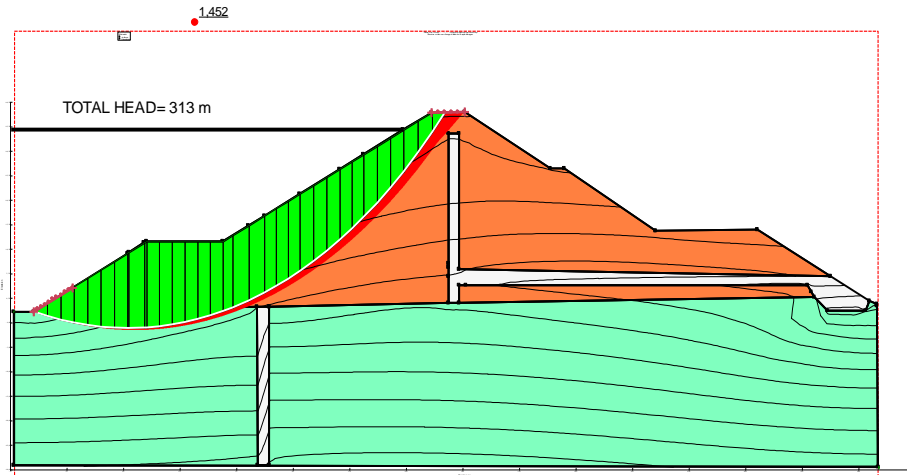


Figure (III.12) : Stabilité lors de la vidange rapide CRN=313m

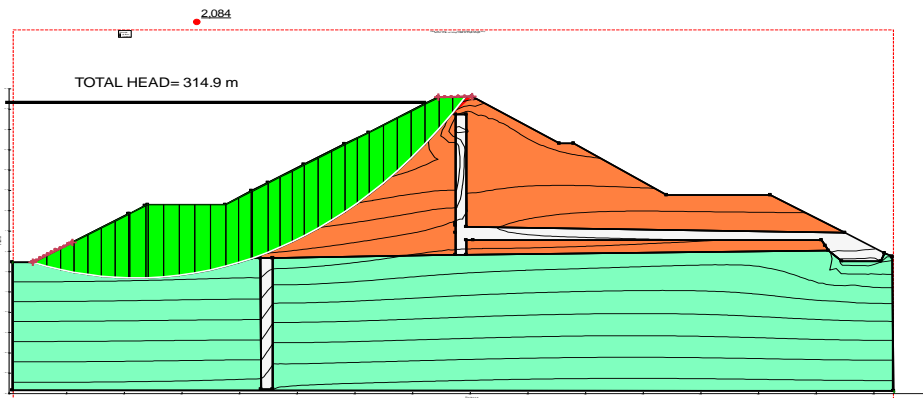
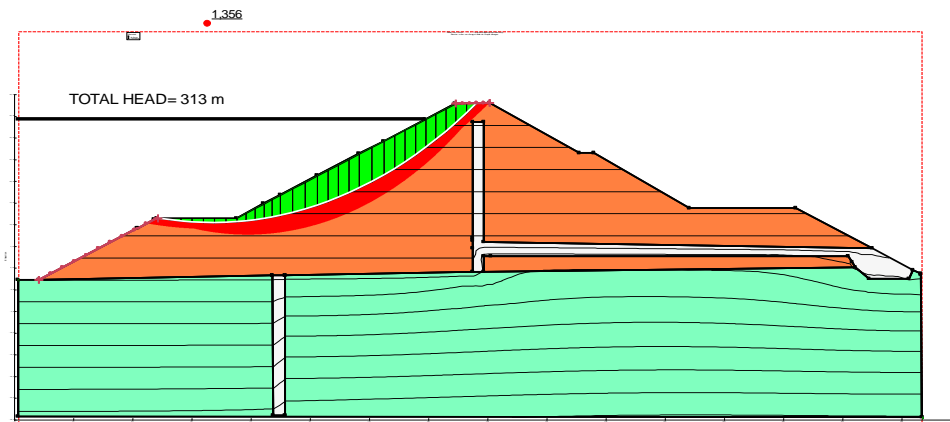


Figure (III.13) : Stabilité lors de la vidange rapide CPHE =314.9m

Tableu(III.4) Résultats de stabilité de la vidange rapide sans charge sismique.

Cas étudiés	référence	Fs	Observation
Vidange rapide amont sans charge sismique CRN=313m	$\geq 1,3$	1.452	Lors de la vidange rapide le coefficient varie dans le temps et reste admissible.
Vidange rapide amont sans charge sismique CPHE=314.9	$\geq 1,3$	2.084	Lors de la vidange rapide le coefficient varie dans le temps et reste admissible.

III.3.5.4 Stabilité lors de la vidange rapide avec charge sismique :



Figure(III.14) : Stabilité lors de la vidange rapide avec charge sismique CRN=313m

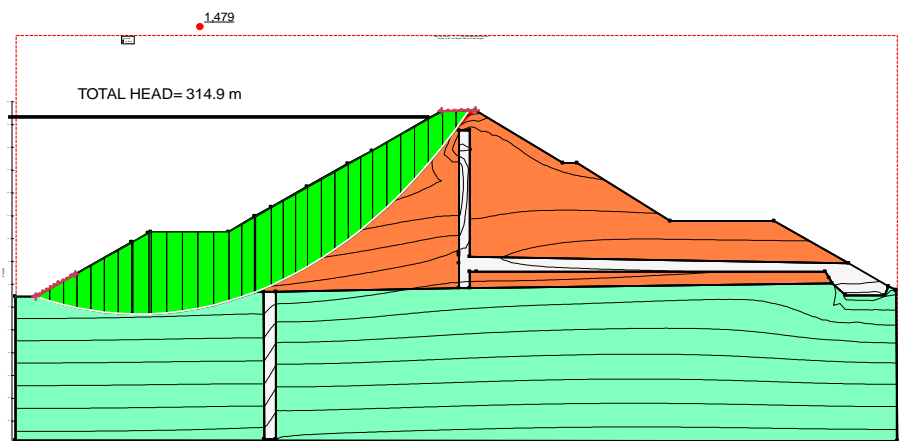


Figure (III.15) : Stabilité lors de la vidange rapide avec charge sismique CPHE=314.9m

La valeur du facteur de sécurité minimal est donnée par la méthode de SPENCER est FS=1.356 et FS=1.479 comme indiqué dans le tableau suivant :

Tableu(III.5) Résultats de stabilité de la vidange rapide avec charge sismique.

Cas étudiés	Référence	Fs	Observation
Vidange rapide avec charge sismique CRN=313m	$\geq 1,2$	1.356	Barrage stable
Vidange rapide avec charge sismique CPHE =314.9	$\geq 1,2$	1,479	Barrage stable

**En résumé :**

<b>Sans séisme</b>	Référence	Talus Amont Fs	Talus Aval Fs	Observation
Régime permanent	$\geq 1,4$	-	2.185	Satisfaisante pour les barrages
Régime transitoire	$\geq 1,3$	2.084	-	Lors de la vidange rapide le coefficient varie dans le temps et reste admissible.
<b>Avec séisme</b>		Talus Amont	Talus Aval	Observation
Régime permanent	$\geq 1,2$	-	1.647	Barrage stable
Régime transitoire	$\geq 1,2$	1.479	-	Barrage stable

**III.4. Conclusion :**

Dans ce chapitre, cette étude a permis de maîtriser deux modules d'un outil numérique performants dédiés à ce type d'études : le logiciel GEOSLOPE, le premier module « SEEP/W » pour l'analyse des infiltrations hydraulique, le deuxième module « SLOPE/W » pour l'analyse de la stabilité mécanique des talus. D'après les résultats obtenus, nous constatons que le barrage Harreza est stable dans toutes les conditions appliquées, c'est-à-dire pendant l'exploitation normale et exceptionnelle sans séisme ou avec séisme.

## Conclusion Générale

Pour conclure notre travail de recherche, il est à souligner que la construction des barrages en terre et en enrochements nécessite une étude d'autant plus détaillée et approfondie sur tous si le terrain de fondation est médiocre. Il est nécessaire de bien connaître les matériaux qui constitueront le barrage proprement dit pour effectuer le calcul de stabilité et déterminer le profil de l'ouvrage ; nous insistons sur le fait que les matériaux doivent toujours assurer leur double rôle de stabilité et d'étanchéité ; le barrage doit être protégé contre les effets dangereux des infiltrations. L'analyse des infiltrations d'un barrage en terre est essentielle, afin d'évaluer sa sécurité et sa stabilité, notamment à l'aide des méthodes graphiques, expérimentales, numériques. Nous avons adopté l'approche de la méthode des éléments finis, à l'aide de logiciel SEEP/W et SLOPE/W, pour analyser l'effet des infiltrations sur la stabilité d'une digue en terre avec une étude du cas du barrage de harreza situé à (willaya de Ain defla).

Cette étude a permis dans une première étape d'exposer les différentes méthodes de détermination de la ligne de saturation, le débit de fuite, le calcul de la stabilité mécanique sous différents cas de chargement.

Dans une seconde étape, cette étude a permis de mettre en œuvre deux modules d'un outil numérique performants dédiés à ce type d'études : le logiciel GEOSLOPE, le premier module « SEEP/W » pour l'analyse des infiltrations, le deuxième module « SLOPE/W » pour l'analyse de la stabilité. D'après le résultat des calculs de stabilité obtenu, on en déduit que le barrage de harreza se comporte bien aux sollicitations sismiques et dans les conditions normales.

## Références bibliographies

**ABD EL RAZEK M., 1995**-Height of the Trapezoidal Toe Filter in Earth Dams-, Journal of Al-Azhar Engineering Forth, International Conference.

**Ammari A, 2012** : vulnérabilité a l'envasement des barrages (cas du bassin-versant)

**ANBT, 2008** ; document interne.

**ANRH ,2014** ; document interne.

**BELAOUT, Fateh, MEKERTA, BelNacem, KALLOUM, Slimane, et al.** EROSION DISTRIBUTION IN THE DJORF-TORBA DAM AREA (SOUTHWEST OF ALGERIA: BECHAR). In : *6th International Symposium on Sediment Management San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, Mexico June 19-23, 2018*. 2018. p. 163.

**CASAGRANDE A., 1937**-Seepage through Dams-, Journal of the New England Water Works Assoc., Vol. 51.

**Chouireb, M. (2019)**. Simulation of seepage flow through an earthen dam with vertical drain and comparison of results with observations data (case study: Harreza dam-Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*, 12(13), 406.

**Fatiha, B., & Horiya, C. (2019)**. Contribution à l'aménagement hydro-agricole d'un bassin versant érodé duCheliff (Cas de Barrage Harraza-Ain Defla.

**FAUZIAH KASIM.,2002** – Numerical parametric simulations for seepage flow behaviour through an earthfill dam –jurnal kejuruteraan awam (journal of civil engineering) vol.14 no. 1

**HARR, M. E.; 1962**-Groundwater and Seepage-, McGrawHill Book Company, ISBN 0-48666881-9, New York.

**HARRY R. CEDERGREN. ,1989**-Seepage, Drainage, and Flow Nets-, 3<sup>rd</sup> ed., New York,.

**Houria, B., & Melha, A. Z. (2019)**. Estimation et cartographie de la recharge naturelle des eaux souterraine cas d'application différentes méthodes dans la plaine alluviale de khemis Miliana.

**HUG, M., 1975**-Mécanique des fluides appliqués-, Edition Eyrolles.

hydrographiques des côtières Algérois).

**KHALAF ALLAH S., 2005-** Seepage through Earth dams with Filters-, M. Sc thesis, Dept. Of Irrigation and Hydraulics Eng. Mansoura university , Egypt.

**MAURICE CASSAN., 1986-**Aide-mémoire d'hydraulique souterraine -, l'école nationale des Ponts et Chaussées, (ENPC) - 2ème Édition, France.

**MEGUENNI, K. et REMINI, B. Evaluation du débit solide dans le bassin versant de Harreza (Algérie).** *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*, 2008, no 7.\*

**VOLKOV, V., 1986-**Ouvrages hydrauliques-. Guide de Thèse, ENSH, Blida, Algérie,

**WILLIAM D. BROWN.1993,-**Seepage analysis and control for dams –Engineering and design, EM-1110-2-19.