



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



Université de Ghardaïa

Faculté des Sciences et Technologie

Département hydraulique et génie civil

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Hydraulique

Spécialité : Hydraulique urbaine

Thème

**Effet des drains sur la stabilité des barrages
en terre cas des barrages Boubrik et
El-haïmeur (wilaya de Ghardaïa)**

Présenté par : Hariz Yacine

Oudjana Hammou

Soutenu devant le jury :

Mr.	. MAA	Université de Ghardaïa	Président
Mr.	. MAA	Université de Ghardaïa	Examineur
Mr. Amieur.R	. MAA	Université de Ghardaïa	Encadreur

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciements

Je remercie avant tout mon dieu qui m'a donné la force, la volonté et le courage et la patience pour terminer ce travail de fin d'étude.

Ainsi je remercie du fond de mon cœur mes parents et toute ma famille pour leurs sacrifices, leurs encouragements, leur soutien jusqu'à termine ce travail.

Je remercie mon encadreur la responsable de mon travail pendant **Mme. Amieur Rekia** pour leurs remarques pertinentes.

Mes remerciements vont aux membres de jury d'avoir accepté d'examiner, D'évaluer et d'enrichir ce travail.

Enfin, mes sincères reconnaissances et gratitudes à toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ceux qui sont toujours Présents
dans mon Cœur

A ma très chère mère, A mon très cher père

A mes sœurs

A toute ma famille

A tous mes professeurs

A tous mes collègues et mes amis sans exception

A ma promotion (2021/2022).

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire a pour but d'analyser l'effet des drains verticaux sur l'infiltration et la stabilité des barrages en terre.

En premier temps on a présenté des généralités sur les barrages en terre, les effets des infiltrations sur leur stabilité et système de drainage et les méthodes d'analyse de la stabilité des barrages en terre.

En suite à l'aide du logiciel GEOSTUDIO module SEEP/W, on a analysé la stabilité hydraulique en déterminant de la ligne de saturation, les lignes équipotentielles et le débit de fuite au sein du massif et le dimensionnement du drain vertical et à l'aide du module SLOPE/W on a vérifié la stabilité mécanique des talus amont de la digue sous différents cas de position de drain.

On a terminé par une application pratique à l'étude de la stabilité hydraulique et mécanique de la digue du barrage en terre de Boubrik et El-haimeur (wilaya de Ghardaïa).

Mots clés : infiltrations - stabilité - barrage en terre - drain - débit de fuite

Summary

The work presented in this thesis aims to analyze the effect of vertical drains on the infiltration and stability of earth dams.

First, generalities were presented on earth dams, the effects of seepage on their stability and drainage system and methods for analyzing the stability of earth dams.

Then, using the GEOSTUDIO software SEEP/W module, the hydraulic stability was analyzed by determining the saturation line, the equipotential lines and the leakage rate within the massif and the dimensioning of the vertical drain and using the SLOPE/W module, we checked the mechanical stability of the embankments upstream of the dike under different cases of drain position.

We ended with a practical application to the study of the hydraulic and mechanical stability of the embankment of the earth dam of Boubrik and El-haimeur (wilaya of Ghardaïa).

Key words : infiltrations - stability - earth dam - drain - leakage rate

ملخص

يهدف العمل المقدم في هذا البحث إلى تحليل تأثير المصارف العمودية على التسرب واستقرار السدود الترابية. أولاً، تم عرض عموميات على السدود الترابية وتأثير التسربات على استقرارها ونظام الصرف وطرق تحليل استقرار السدود الترابية. بعد ذلك، باستخدام برنامج GEOSTUDIO وحدة SEEP / W، تم تحليل الإستقرار الهيدروليكي عن طريق تحديد خط التشبع، وخطوط الجهد المتساوي ومعدل التسرب داخل السد وأبعاد التصريف العمودي وباستخدام وحدة SLOPE / W، فحص الثبات الميكانيكي للسد تحت حالات مختلفة من وضع التصريف.

انتهينا بتطبيق عملي لدراسة الاستقرار الهيدروليكي والميكانيكي للسد الترابي بوبريك والحيمر (ولاية غرداية).

الكلمات المفتاحية : التسربات - الإستقرار - السد الترابي - مصرف - معدل التسرب .

Sommaire

REMERCIEMENTS

Dédicace

RÉSUMÉ

LISTE DES FIGURES

LISTE DES PHOTOS

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES NOTATIONS

Introduction générale	01
-----------------------------	----

CHAPITRE I : Généralités sur les barrages en terre

I.1 Introduction	04
I.2 Les barrages en Algérie	05
I.3 Classification des barrages	06
I.3.1 Barrages en béton	07
I.3.1.1 Les barrages poids	07
I.3.1.2 Les barrages voûtes	08
I.3.1.3 Les barrages à contreforts	09
I.3.2 Barrages en remblais	10
I.3.2.1 Les barrages en terre	10
I.3.2.2 Les barrages en enrochements	10
I.3.3 Barrages mobiles	11
I.4 Types de barrage en terre	13
I.4.1 Barrage en terre homogène avec drain	13
I.4.2 Barrage en terre à noyau étanche	13
I.4.3 Barrage en terre à masque amont	14
I.5 Dimensionnement géométrique des murs de barrages en terre	15
I.5.1 Dispositions générales	15
I.5.2 Hauteur du barrage	16
I.5.3 Largeur en crête du barrage	17
I.5.4 Pente des talus	18

CHAPITRE II : Etude des infiltrations et la stabilité dans les barrages en terre

II.1 Etude des infiltrations dans les barrages en terre	20
II.1.1 Introduction	20
II.1.2 Ligne de saturation	21
II.1.3 Pressions interstitielles	24
II.1.4 Débit de fuite	25
II.2 Rupture des barrages en terre	25
II.2.1 Causes de rupture	26
II.2.1.1 Causes techniques	26
II.2.1.2 Causes naturelles	26

II.2.1.3 Causes humaines	27
II.2.2 Types et modes de ruptures des barrages en terre	27
II.2.2.1 Rupture par instabilité externe (rupture d'ensemble)	27
II.2.2.2 Rupture par érosion interne (renard hydraulique)	29
II.2.2.3 Rupture par érosion externe	30
II.2.2.4 Rupture par liquéfaction de la digue ou des terrains de fondation	32
II.2.3 Maîtrise du risque de rupture des barrages	33
II.2.3.1 Contrôle du tassement	33
II.2.3.2 Contrôle des infiltrations	33
II.2.3.3 Entretien des talus	33
II.2.3.4 Entretien des structures annexes	34
II.3 Etude de stabilité du barrage en terre ; le facteur de sécurité	34
II.3.1 Définitions du facteur de sécurité	35
II.3.2 Choix des facteurs de sécurité	35
II.3.3 Méthodes des tranches	36
II.3.3.1 Méthode de Fellenius / Petterson (1955)	37
II.3.3.2 Méthode de Bishop (1955)	37
II.4 Drainage dans les barrages en terre	38
II.4.1 les filtres	38
II.4.1.1 Définition	38
II.4.1.2 Rôle des filtres	38
II.4.1.3 Composition des filtres	39
II.4.2 Les drains	39
II.4.2.1 Définition	39
II.4.2.2 Rôle des drains	39
II.4.2.3 Différents types de drainages	40

CHAPITRE III : Présentation de l’outil de simulation Géo-Slope

III.1 Introduction	45
III.2 Présentation du logiciel GEO-SLOPE	45
III.3 SEEP/W	46
III.3.1 Présentation	46
III.3.2 Domaine d’application	46
III.4 SLOPE/W	47
III.4.1 Présentation	47
III.4.2 Domaine d’application	47
III.5 Le Fonctionnement du Logiciel	47
III.6 Conclusion	51

CHAPITRE IV : Simulation de l’Effet des drains sur l’infiltration et la stabilité du barrage d’EL-Haimeur et Boubrik

IV.1 Introduction	53
IV.2 Situation géographique	53
IV.3 Climatologie	54

IV.3.1	Température	54
IV.3.2	Précipitations	54
IV.4	Géologie	55
IV.5	Barrage Boubrik	55
IV.5.1	Géométrie de l'ouvrage	55
IV.5.2	Profil étudié	57
IV.5.3	Matériaux de construction	57
IV.5.4	Analyse de la stabilité en modifiant la position du drain	59
IV.5.4.1	Stabilité à l'état normal	59
a)	Position de la ligne de saturation	59
b)	Lignes de contours des charges hydrauliques (équipotentielles)	61
c)	Débit de fuite	62
d)	Facteur de sécurité	64
IV.5.4.2	Stabilité à l'état de Vidange rapide en fonction du temps	66
a)	Vidange rapide en 30 jours	66
b)	Vidange rapide en 5 jours	68
IV.6	Barrage d'El-haimeur	70
IV.6.1	Géométrie de l'ouvrage	70
IV.6.2	Profil étudié	71
IV.6.3	Matériaux de construction	71
IV.6.4	Analyse de la stabilité en modifiant la position du drain	73
IV.6.4.1	Stabilité à l'état normal	73
a)	Position de la ligne de saturation	73
b)	Lignes de contours des charges hydrauliques (équipotentielles)	75
c)	Débit de fuite	76
d)	Facteur de sécurité	78
IV.6.4.2	Stabilité à l'état de Vidange rapide en fonction du temps	80
a)	Vidange rapide en 30 jours	80
b)	Vidange rapide en 5 jours	82
IV.7	Conclusion	84
	Conclusion générale	85
	Références bibliographiques	86

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : Généralités sur les barrages en terre

Figure I.1 : Coupe transversale d'un barrage en enrochement	11
Figure I.2 : Dessin schématique d'un barrage mobile (Ginocchio, 1959)	12
Figure I.3 : Barrage en terre homogène avec drain	13
Figure I.4 : Barrage en terre à noyau étanche	14
Figure I.5 : Barrage en terre à masque amont	15
Figure I.6 : Définition des côtes RN et PHE	16

CHAPITRE II : Etude des infiltrations et la stabilité dans les barrages en terre

Figure II.1 : Ligne de saturation pour barrage homogène sans drain sur sol imperméable.	22
Figure II.2 : Ligne de saturation pour un barrage homogène avec drain	23
Figure II.3 : Ligne de saturation d'un barrage à noyau	24
Figure II.4 : Rupture d'ensemble à partir du parement aval	28
Figure II.5 : Rupture d'ensemble à partir du parement amont	28
Figure II.6 : Rupture par renard hydraulique	29
Figure II.7 : Rupture par affouillement	30
Figure II.8 : Rupture par submersion (par surverse)	31
Figure II.9 : Rupture par liquéfaction	32
Figure II.10 : Schéma statique de la tranche	36
Figure II.11 : Prisme de drainage	40
Figure II.12 : Drainage de surface	40
Figure II.13 : Prisme de drainage avec drainage de surface	41
Figure II.14 : Drain tapis interne	41
Figure II.15 : Prisme de drainage avec drain tapis interne sur fondations imperméables...	42
Figure II.16 : Prisme de drainage avec drain tapis interne sur fondations perméables	42
Figure II.17 : Drainage à bande	43
Figure II.18 : Drain vertical	43

CHAPITRE IV : Simulation de l'Effet des drains sur l'infiltration et la stabilité du barrage d'EL-Haimeur et Boubrik

Figure IV.1 : Graphique climatique - Ghardaïa (année 2020)	54
Figure IV.2 : Profil géométrique de la digue Boubrik	57
Figure IV.3 : Conductivité hydraulique de sable limoneux en fonction de la succion (Barrage Boubrik)	58
Figure IV.4 : ligne de saturation - Position 1	59
Figure IV.5 : ligne de saturation - Position 2	59
Figure IV.6 : ligne de saturation - Position 3 (position initiale)	60

Figure IV.7 : ligne de saturation - Position 4	60
Figure IV.8 : ligne de saturation - Position 5	60
Figure IV.9 : Lignes de contours des charges hydrauliques - Position 1	61
Figure IV.10 : Lignes de contours des charges hydrauliques - Position 2	61
Figure IV.11 : Lignes de contours des charges hydrauliques - Position 3 (position initiale)	61
Figure IV.12 : Lignes de contours des charges hydrauliques - Position 4	62
Figure IV.13 : Lignes de contours des charges hydrauliques - Position 5	62
Figure IV.14 : Débit de fuite - Position 1	62
Figure IV.15 : Débit de fuite - Position 2	63
Figure IV.16 : Débit de fuite - Position 3 (position initiale)	63
Figure IV.17 : Débit de fuite - Position 4	63
Figure IV.18 : Débit de fuite - Position 5	64
Figure IV.19 : Graphe du débit en fonction de position du drain (l'état normal)	65
Figure IV.20 : Graphe du facteur de sécurité en fonction de position du drain (l'état normal)	65
Figure IV.21 : Variation de la charge hydraulique en vidange de 30 jours (Barrage Boubrik)	66
Figure IV.22 : Graphe du débit en fonction de position du drain (vidange de 30 jours).....	67
Figure IV.23 : Graphe du facteur de sécurité en fonction de position du drain (vidange de 30 jours)	67
Figure IV.24 : Variation de la charge hydraulique en vidange de 5 jours (Barrage Boubrik)	68
Figure IV.25 : Graphe du débit en fonction de position du drain (vidange de 5 jours).....	69
Figure IV.26 : Graphe du facteur de sécurité en fonction de position du drain (vidange de 5 jours)	69
Figure IV.27 : Profil géométrique de la digue El-Haimeur	71
Figure IV.28 : Conductivité hydraulique de sable limoneux en fonction de la succion (Barrage El-Haimeur)	72
Figure IV.29 : ligne de saturation - Position 1	73
Figure IV.30 : ligne de saturation - Position 2 (position initiale)	73
Figure IV.31 : ligne de saturation - Position 3	74
Figure IV.32 : ligne de saturation - Position 4	74
Figure IV.33 : ligne de saturation - Position 5	74
Figure IV.34 : Lignes de contours des charges hydrauliques - Position 1	75
Figure IV.35 : Lignes de contours des charges hydrauliques - Position 2 (position initiale)	75
Figure IV.36 : Lignes de contours des charges hydrauliques - Position 3	75
Figure IV.37 : Lignes de contours des charges hydrauliques - Position 4	76
Figure IV.38 : Lignes de contours des charges hydrauliques - Position 5	76
Figure IV.39 : Débit de fuite - Position 1	76
Figure IV.40 : Débit de fuite - Position 2 (position initiale)	77
Figure IV.41 : Débit de fuite - Position 3	77
Figure IV.42 : Débit de fuite - Position 4	77
Figure IV.43 : Débit de fuite - Position 5	78

Figure IV.44 : Graphe du débit en fonction de position du drain (l'état normal)	79
Figure IV.45 : Graphe du facteur de sécurité en fonction de position du drain (l'état normal)	79
Figure IV.46 :Variation de la charge hydraulique en vidange de 30 jours (Barrage El-Haimeur).....	80
Figure IV.47 : Graphe du débit en fonction de position du drain (vidange de 30 jours).....	81
Figure IV.48 : Graphe du facteur de sécurité en fonction de position du drain (vidange de 30 jours)	81
Figure IV.49 : Variation de la charge hydraulique en vidange de 5 jours (Barrage El-Haimeur)	82
Figure IV.50 : Graphe du débit en fonction de position du drain (vidange de 5 jours).....	83
Figure IV.51 : Graphe du facteur de sécurité en fonction de position du drain (vidange de 5 jours)	83

LISTE DES PHOTOS

CHAPITRE I : Généralités sur les barrages en terre

Photo I.1 Barrage de Béni Haroun, Wilaya de Mila - Algérie	6
Photo I.2 : Barrage poids	7
Photo I.3 : Barrage voûte	8
Photo I.4 : Barrage à contreforts	9

CHAPITRE III : Présentation de l’outil de simulation Géo-Slope

Photo III.1 : barre d'outil principale dans logiciel de SEEP/W	47
Photo III.2 : Fenêtre d’analyse du module SLOPE/W	48
Photo III.3 : Dessin des régions	49
Photo III.4 : Introduction des propriétés des matériaux	49
Photo III.5 : modifier des objets	50
Photo III.6 : Fenêtre du gestionnaire des solutions	50

CHAPITRE IV : Simulation de l’Effet des drains sur l’infiltration et la stabilité du barrage d’EL-Haimeur et Boubrik

Photo IV.1 : localisation des barrages El-haimeur et Bou brik (Ghardaïa)	53
Photo IV.2 : Photo du Barrage Boubrik	56
Photo IV.3 : photo du Barrage El-Haimeur	70

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : Généralités sur les barrages en terre

Tableau I.1: Pentés des talus des barrages en terre (norme ex URSS)	18
--	----

CHAPITRE II : Etude des infiltrations et la stabilité dans les barrages en terre

Tableau II.1: Valeurs de FS en fonction de l'importance de l'ouvrage	36
---	----

CHAPITRE IV : Simulation de l'Effet des drains sur l'infiltration et la stabilité du barrage d'EL-Haimeur et Boubrik

Tableau IV.1 : Précipitations moyennes - Ghardaïa (année 2020)	55
Tableau IV.2 : Caractéristiques géométriques de la section maximal de la digue Boubrik	56
Tableau IV.3 : présente la perméabilité et teneur en eau des matériaux de construction du barrage de Bou brik	58
Tableau IV.4 : Facteur de sécurité à l'état normal (Barrage Boubrik)	64
Tableau IV.5 : Facteur de sécurité à l'état de vidange rapide en 30 jours (Barrage Boubrik)	66
Tableau IV.6 : Facteur de sécurité à l'état de vidange rapide en 5 jours (Barrage Boubrik)	68
Tableau IV.7 : Caractéristiques géométriques de la section maximale de la digue El-haimeur	70
Tableau IV.8 : présente la perméabilité et teneur en eau des matériaux de construction du barrage d'El-haimeur	72
Tableau IV.9 : Facteur de sécurité à l'état normal (Barrage El-Haimeur)	78
Tableau IV.10 : Facteur de sécurité à l'état de vidange rapide en 30 jours (Barrage El-Haimeur)	80
Tableau IV.11 : Facteur de sécurité à l'état de vidange rapide en 5 jours (Barrage El-Haimeur)	82
Tableau IV.12 : Les valeurs imposés du facteur de sécurité	84

LISTE DES NOTATIONS

- v : Vitesse de propagation des vagues en (m/s)
 h_v : Hauteur des vagues en (m)
 V : Vitesse des vents en (km/h)
 F : Fetch en (km)
 H : la hauteur du barrage en (m)
 h : la charge hydraulique
 Z : la cote d'un point du barrage par rapport à un repère
 q : Débit de fuite en ($m^3/s/ml$)
 I : Gradient hydraulique adimensionnel
 S : Section mouillée sur le parement aval du barrage (m)
 K : Coefficient de perméabilité (m/s)
 L : largeur de la digue
 W_i : le poids de la tranche
 N_i : la composante normale
 u_i : la composante interstitielle due à l'eau
 c_i, φ_i : valeurs effectives des paramètres du sol
 α_i : inclinaison du segment de la surface de glissement
 b_i : Largeur horizontale de la tranche

Introduction générale

Les barrages en terre représentent quantitativement l'essentiel des barrages réalisés en Algérie. Leur nombre continue à se développer en raison du fort accroissement des besoins en eau. Ces ouvrages exigent toujours une grande fiabilité en matière de sécurité. De nombreux chercheurs se sont particulièrement penchés sur l'étude de la stabilité des structures en sols en générale, et les barrages en terre en particulier, dans le but de dégager des méthodes de calcul plus sophistiquées.[1]

La réalisation des barrages en terre a connue une grande évolution poussée par l'accroissement de la demande en eau. La conception d'un barrage est très complexe car peu répétitive et c'est en fonction des conditions du site, des fondations, des matériaux disponibles et du coût de réalisation que le type de barrage est adopté. [2]

La modélisation du comportement des sols est une étape importante qui conditionne la qualité des analyses des ouvrages.

Les progrès des ordinateurs et des méthodes d'analyse numérique ont permis de mettre au point des modèles rhéologiques et des algorithmes de résolution, conduisant à des modélisations qui prennent mieux en compte le comportement observé sur le terrain. [4]

Les programmes de calculs de stabilité des ouvrages en terre développés de nos jours facilitent la prise en compte de différents paramètres influant et conduisent à des solutions générales et plus réalistes de la stabilité des pentes. Ces programmes peuvent utiliser à la fois les formulations analytiques et les modèles numériques pour décrire correctement le comportement des sols. [1]

Le travail présenté dans ce mémoire consiste en une étude pour objectif d'analyser l'effet des drains sur l'infiltration et la stabilité d'une digue en terre avec une simulation sur le barrage de Boubrik et El-haimeur (wilaya de Ghardaïa).

Pour modéliser les infiltrations à travers les barrages en terre , on a utilisé le logiciel GEOSTUDIO version 2018.

Pour atteindre l'objectif visé, le travail est divisé en quatre chapitres :

Chapitre 1 : Généralités sur les barrages en terre

Chapitre 2 : Etude des infiltrations et la stabilité dans les barrages en terre

Chapitre 3 : Présentation de l'outil de simulation Géo-Slope

Chapitre 4 : Simulation de l'Effet des drains sur l'infiltration et la stabilité du barrage

d'EL-haimeur et Boubrik

CHAPITRE I

Généralités sur les barrages en terre

I.1 INTRODUCTION :

Les barrages sont des ouvrages hydrauliques implantés sur la largeur d'un cours d'eau créant une cuvette géologiquement étanche qui permet de stocker un volume d'eau pour les différents besoins et utilisation comme :

- Alimentation en eau potable.
- Irrigation des terres.
- Production de l'électricité.
- Protection contre les crues.
- Besoins industriels (refroidissement, lavage).
- Navigation et sports nautique. [2]

La géologie (nature des roches sur lesquelles sera édifié le barrage, agrégats extraits sur place) et la topographie (large de la vallée) construisent un ensemble indissociable pour la réalisation d'un barrage. A chaque site, un type de barrage, un dimensionnement adapté sur le plan technique qu'économique. [1]

Les barrages sont définis par des caractéristiques physiques (la hauteur, le volume de la retenue derrière le barrage), par un type de barrage selon sa forme ou les matériaux qui le constituent, par une utilisation principale ...

L'ensemble de ces critères donnent des clés d'entrée multiples pour classer les ouvrages . [3]

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

Le terme « terre » couvre donc toute une gamme de matériaux allant de l'argile pure très fine à des éléments très grossiers. Dans certains cas même, on utilise des roches altérées facilement compactables, tels que des latérites, des chistes et grés tendres etc.

Les volumes à mettre en œuvre pour la construction d'un barrage en terre sont en général importants : 5 à 15 fois plus que pour un barrage en béton du type poids susceptible d'être réalisé sur le même site. Pour des petits ouvrages, il est fréquent d'avoir à compacter de 20000 à 100000 m^3 en terre. Les grands barrages nécessitent des millions et même des dizaines de millions de m^3 . [6]

I.2 Les barrages en Algérie :

Selon l'agence nationale des barrages et transferts , L'Algérie compte 80 barrages Achevé (utilisant 75 barrages) sur tout le territoire national avec une capacité totale de stockage de 7 milliards de m^3 , Il y a 6 autres barrages en cours d'achèvement . [16]

Parmi les barrages cités , Le barrage de Béni Haroun à Mila est considéré comme le plus grand barrage en Algérie avec une capacité de stockage de 960 millions de mètres cube. équipé d'une grande station de pompage d'eau brute, dont sa puissance est de 180 MW. Le barrage alimente en eau potable plusieurs régions limitrophes de la wilaya de Mila, notamment les wilayas de Jijel, Constantine, Oum el Bouaghi , Batna et Khenchela . Le barrage fournit également une quantité importante d'eau d'irrigation pour quelques centaines d'hectares d'exploitations agricoles dans les régions voisines.

D'autres barrages en exploitation en Algérie, nous citons El Hamiz à Alger , Timgad , Taqsebt , Tichy-haf , Tilesdit , Koudiat Acerdoun ... etc.

Néanmoins, dans un contexte de croissance, les autorités poursuivent leurs projets de développement des infrastructures hydrauliques du pays , 80 sites supplémentaires ont été recensés pour la réalisation de nouveaux barrages, et 30 d'entre eux ont fait l'objet d'études de faisabilité.

L'Algérie entend faire passer à 139 le nombre total de barrages d'ici 2030, et, ce faisant, atteindre une capacité de stockage de près de 12 milliards de mètres cubes sur l'ensemble du pays. [7]



Photo I.1 Barrage de Béni Haroun, Wilaya de Mila – Algérie

I.3 Classification des barrages :

Les barrages forment avec le terrain sur lequel ils sont construits un ensemble indissociable : à chaque site, un type de barrage, un dimensionnement adapté tant sur le plan technique qu'économique. C'est pourquoi il n'existe pas de barrage type standard. De plus, certains sont formés par la juxtaposition de plusieurs structures différentes justifiées par des caractéristiques de sol de fondation particulières et aussi par des choix économiques.

En se contentant de définir quelques grandes catégories, on peut commencer par classer les barrages en fonction du matériau qui les constitue. Aux barrages construits en matériaux durs (la maçonnerie autrefois, aujourd'hui le béton), on oppose les barrages en matériaux meubles (la terre, les enrochements). [3]

I.3.1 Barrages en béton :

Ils regroupent les barrages poids, contreforts et voûte. La construction de ces barrages est presque toujours réalisée en utilisant le béton (la maçonnerie de moellons est de moins en moins employée). Le béton utilisé dans la construction des barrages rigides est constitué de gros éléments de dimensions inférieures à 250 mm. Le choix de gros éléments présente deux avantages : résistance à la rupture par compression plus grande et prix réduit des installations de concassage.[10]

I.3.1.1 Les barrages poids :

De forme massive et triangulaire, résistent à la poussée de l'eau grâce à leur poids.

Un barrage poids est un barrage dont la propre masse suffit à s'opposer à la pression exercée par l'eau. Ce sont des barrages souvent relativement épais, dont la forme est généralement simple « leur section s'apparente dans la plupart des cas à un triangle rectangle ».

Même si les barrages voûtes ou à contrefort nécessitent moins de matériaux que les barrages poids, ces derniers sont encore très utilisés de nos jours. Le barrage-poids en béton est choisi lorsque le rocher du site (vallée, rives) est suffisamment résistant pour supporter un tel ouvrage, et lorsque les conditions pour construire un barrage voûte ne sont pas réunies. Le choix de la technique est donc d'abord géologique : une assez bonne fondation rocheuse est nécessaire. Mais il faut également disposer des matériaux de construction (granulats, ciment) à proximité. [3]

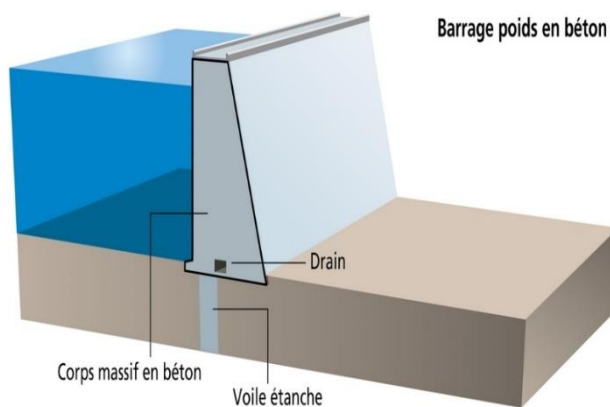


Photo I.2 : Barrage poids

I.3.1.2 Les barrages voûtes :

De forme arquée, profitent de leur forme pour reporter la poussée de l'eau vers le rocher des rives.

La poussée de l'eau est reportée sur les flancs de la vallée au moyen d'un mur de béton arqué horizontalement, et parfois verticalement « on la qualifie alors de voûte à double courbure ».

La technique de barrage voûte nécessite une vallée plutôt étroite (même si des barrages voûtes ont été parfois construits dans des vallées assez larges, poussant cette technologie à ses limites) et un bon rocher de fondation. Même lorsque ces conditions sont réunies, le barrage-voûte est aujourd'hui souvent concurrencé par les barrages poids en béton ou le barrage en enrochements, dont la mise en œuvre peut être davantage mécanisée.

En raison du relativement faible volume de matériaux nécessaires, c'est évidemment une technique très satisfaisante économiquement.

On rencontre aussi des barrages avec plusieurs voûtes comme le barrage de l'Hongrin en Suisse.[3]

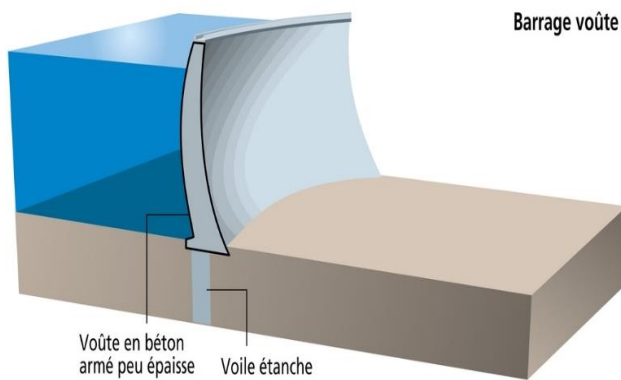


Photo I.3 : Barrage voûte

I.3.1.3 Les barrages à contreforts :

Ce sont des barrages poids évidés pour économiser du béton. Ils sont formés de membranes imperméables soutenues par des contreforts perpendiculaires à l'axe du barrage. Bien qu'il existe plusieurs types de contreforts, les deux plus importants sont les murs plats (flat-slab) et les voûtes multiples (multiple-arch). Dans les premiers, la membrane supportant l'eau est une plaque plane et continue en Béton Armé, s'étalant le long des contreforts (plots séparés dont la section horizontale a la forme d'une poutre en I ou en T). Dans les seconds, la membrane est faite d'une série de côtes elles aussi en béton armé .

Les barrages à contreforts en voûtes nécessitent moins d'armature en acier et peuvent couvrir des distances plus longues entre contreforts. Mais leurs travaux de coffrages sont plus coûteux.

La face amont du barrage à contreforts est en général inclinée de près de 45° . Le poids de l'eau sur cette face est nécessaire pour augmenter la stabilité de l'ouvrage au glissement et au renversement. [10]

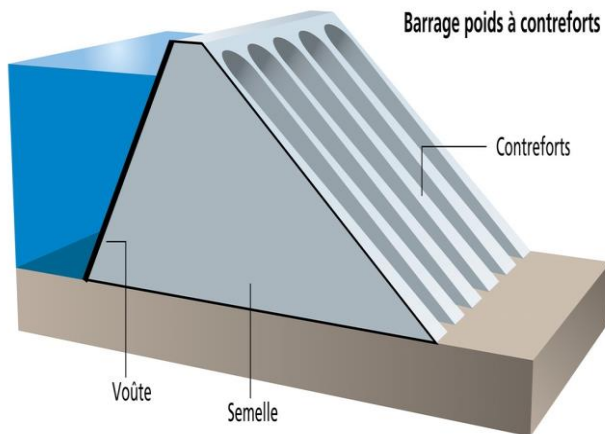


Photo I.4 : Barrage à contreforts

I.3.2 Barrages en remblais :

Les barrages en remblai sont des barrages constitués de matériaux meubles allant de l'argile fine à des éléments très grossiers (enrochements). Ils regroupent plusieurs catégories en fonction de la méthode employée pour assurer l'étanchéité. Ce type d'ouvrage très ancien est le plus communément utilisé, il représente près de 70% du parc mondial des barrages. [9]

Ils comprennent essentiellement deux parties distinctes : un masque d'étanchéité en matériaux imperméables, et un corps constitué par des massifs perméables (en alluvions ou en enrochements) qui assure la stabilité de l'ouvrage. [10]

I.3.2.1 Les barrages en terre :

Ces sont les plus anciens barrages au monde entier, on utilise pendant leur construction l'argile comme un noyau (centré ou incliné) pour assurer l'étanchéité, mais il y a d'autres familles appartenant aux barrages en terre qui utilisent un masque en béton armé, béton bitumineux, membrane mince, ou bien l'asphalte pour assurer leur étanchéité. [1]

I.3.2.2 Les barrages en enrochements :

Un barrage en enrochement n'est pas autre chose qu'un tas de cailloux à grande échelle, qui résiste par sa masse aux efforts auxquels il est soumis. Mais n'étant pas étanche par lui-même, il faut lui adjoindre un organe d'étanchéité qui constitue la partie la plus délicate, aussi bien au stade du projet qu'à celui de la réalisation. [1]

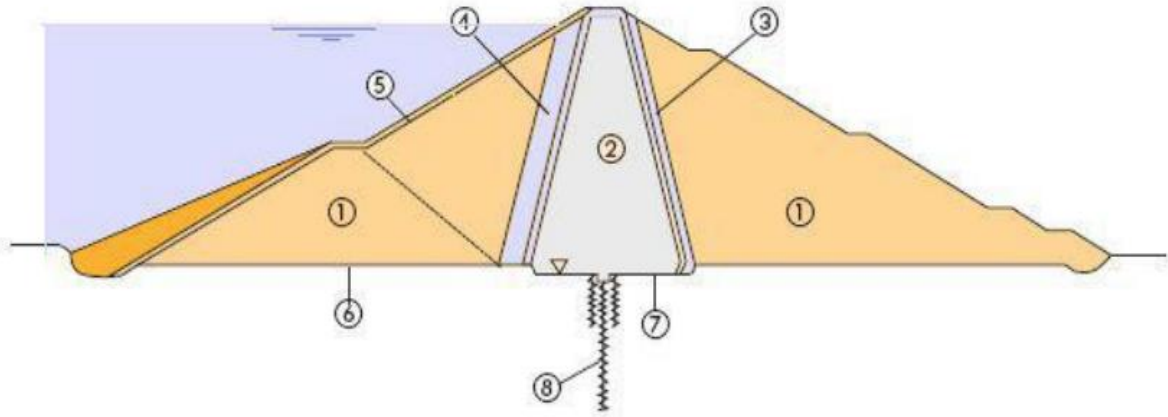


Figure I.1 : Coupe transversale d'un barrage en enrochement

Légende :

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

I.3.3 Barrages mobiles :

Lorsque le site ne se prête pas à l'établissement d'un barrage réservoir fixe, un barrage mobile peut être adopté. Les éléments mobiles assurent la régulation du niveau de la retenue en fonction des variations du débit pour assurer l'alimentation de prises d'eau.

Ces éléments peuvent être totalement retirés du cours d'eau, en période de crue, afin d'éviter la submersion des zones amont sensibles par les remous créés par ces ouvrages. C'est pourquoi, l'obstruction des barrages mobiles est toujours voisine de zéro et l'impact sur les remous est négligeable.

Un barrage mobile est constitué d'éléments mobiles et fixes . Les parties fixes, généralement en maçonnerie, comprennent essentiellement : le radier , un seuil , les piles et les culées , une passerelle de manœuvre , les fondations .

Les parties mobiles sont, en général, en charpente métallique. Ils comprennent les vannes levantes (batardeaux), segment, hausses et clapets et les vannes hydrauliques «toit» et «secteurs».[10]

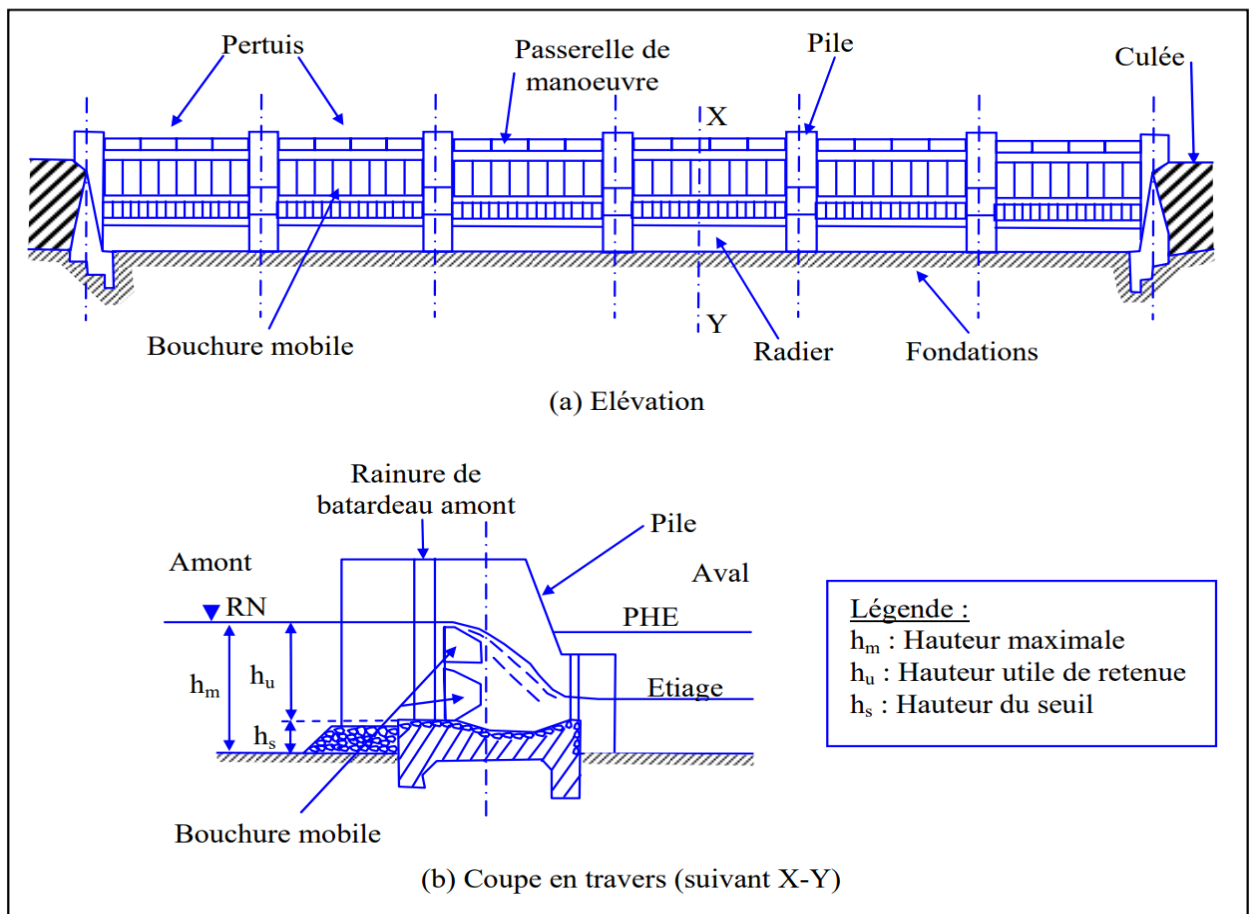


Figure I.2 : Dessin schématique d'un barrage mobile (Ginocchio, 1959)

I.4 Types de barrage en terre :

Les barrages en terre compactés peuvent être divisés en trois principaux types :

- le barrage homogène avec drain ;
- le barrage à noyau étanche ;
- le barrage à masque amont.

I.4.1 Barrage en terre homogène avec drain :

Le barrage est constitué d'un seul matériau suffisamment résistant et imperméable, accompagné de dispositifs de drainage contre la filtration . Pour assurer la stabilité des parements amont et aval on réalise des talus dont la pente dépend des qualités de stabilité et de perméabilité du matériau. L'étanchéité du massif est assurée par l'épaisseur du barrage et l'imperméabilité du matériau. Les quantités disponibles de matériaux présentant les qualités nécessaires à la réalisation du barrage homogène sont souvent faibles, ce type d'ouvrage est donc le plus souvent réservé aux ouvrages de faible importance. [1]

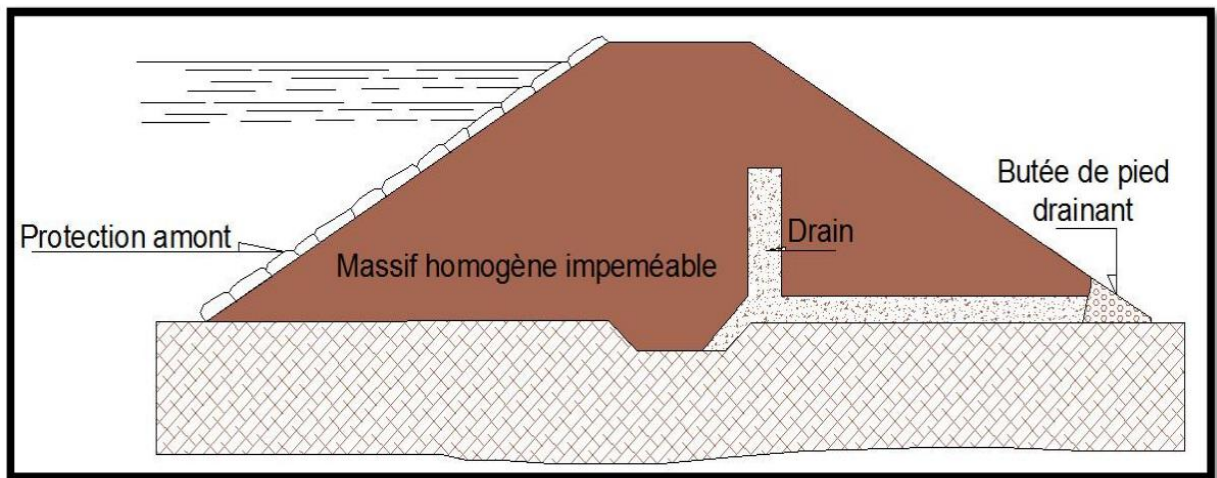


Figure I.3 : Barrage en terre homogène avec drain

I.4.2 Barrage en terre à noyau étanche :

Ces barrages sont constitués de zones de caractéristiques variables réalisées autour d'un noyau en matériau imperméable en argile. Le noyau est le plus souvent vertical mais il peut aussi être incliné. En général, les zones ont des perméabilités et des granulométries de plus en plus élevées à

partir du noyau ce qui leur confère le rôle de filtres et de drains. De plus cette disposition permet de réduire les effets des gradients hydrauliques sur la stabilité des talus et donc d'avoir de plus fortes pentes. [1]

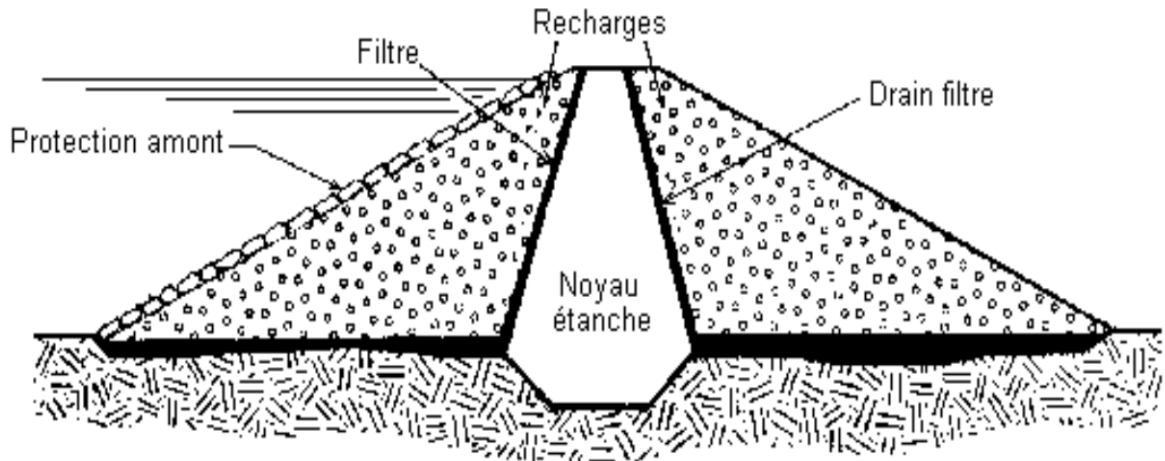


Figure I.4 : Barrage en terre à noyau étanche

I.4.3 Barrage en terre à masque amont :

L'étanchéité est placée sur le parement amont du barrage. Les matériaux utilisés pour la réalisation de l'étanchéité sont :

- Une dalle en béton armé avec très peu de joints (épaisseur 30 à 80 cm)
- Masque en béton bitumineux composés de deux à trois couches d'enrobés routiers plus riches en liant (7 à 9 %) pente 2/1.
- Géomembranes qui doivent être protégées par une couche superficielle (géotextile, petits enrochements, dalles, etc.) [1]

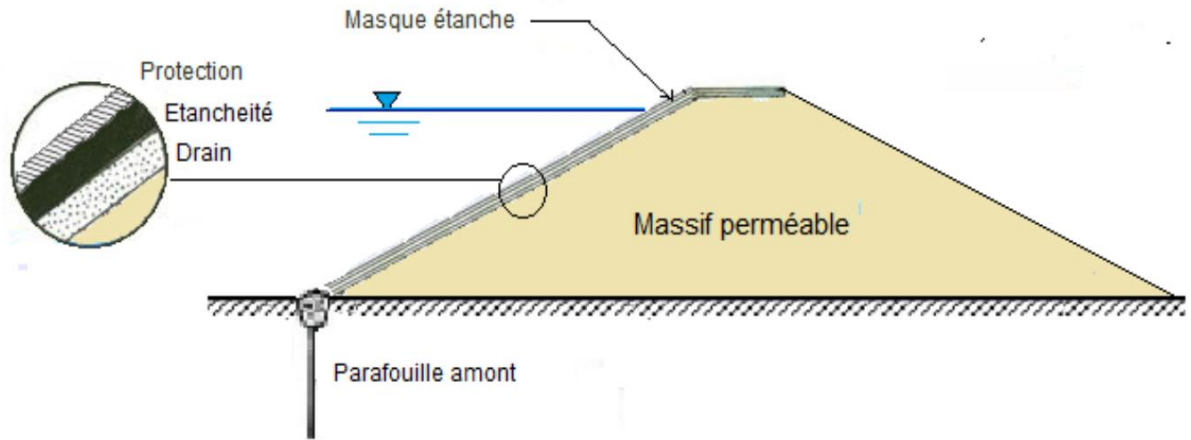


Figure I.5 : Barrage en terre à masque amont

I.5 Dimensionnement géométrique des murs de barrages en terre :

I.5.1 Dispositions générales :

Pour l'élaboration d'un barrage en terre, on doit respecter les mesures suivantes :

- le massif doit être protégé contre l'envasement ;
- les contraintes doivent être minimisées sur les fondations et les terrains des rives ;
- les pentes des talus amont et aval doivent assurer la stabilité ;
- la ligne de saturation doit se trouver ultérieurement à l'intérieur du massif ;
- le terrain d'assise ne doit avoir aucun passage préférentiel, permettant aux eaux de cheminer de l'amont à l'aval ;
- la face amont doit être protégée contre l'action des vagues et des corps flottants ;
- le massif doit être garanti contre le débordement dû aux vagues ;
- le talus du massif doit être stable pendant la construction et pour toutes les conditions du fonctionnement du barrage. [4]

I.5.2 Hauteur du barrage :

La hauteur totale du barrage est égale à la hauteur normale de retenue majorée par la charge maximale au dessus du seuil déversoir et la revanche. Pour calculer cette hauteur il est donc nécessaire de connaître (figure I.6) :

– **Niveau normale de retenue (NR) :**

Cette hauteur est calculée en fonction de la capacité utile à stocker, du volume mort prévu et du volume des pertes par infiltration et évaporation. Elle correspond au niveau d'arase du déversoir.

– **Niveau des plus hautes eaux (PHE) :**

Cette hauteur représente le niveau maximal du plan d'eau lors d'une crue. Elle correspond au niveau normal de retenue (RN) majorée de la charge (H) sur le déversoir de crue.

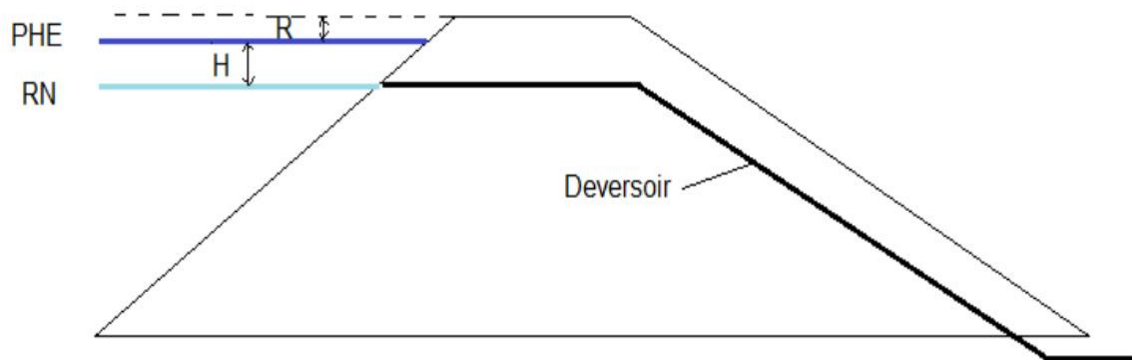


Figure I.6 : Définition des côtes RN et PHE

– **Revanche :**

La revanche R est la différence de côte entre les Plus Hautes Eaux (PHE) correspondant à la crue de projet et la crête pour éviter la submersion du remblai par les vagues. A partir de la connaissance de la vitesse (v) et de la hauteur (h) des vagues qui se forment, la formule empirique de Gaillard permet de calculer la hauteur de revanche sécuritaire des digues :

$$R_{min} = 0.75h_v + \frac{v^2}{2g} \quad (\text{m}) \quad (\text{Eq I.1})$$

- La vitesse de propagation des vagues est elle-même déduite de l'amplitude des vagues :

$$v = 1.5 + 2h_v \quad (\text{Eq I.2})$$

v : Vitesse de propagation des vagues en (m/s)

h_v : Hauteur des vagues en (m)

- La hauteur des vagues qui se forment du fait du vent peut être estimée à partir de la formule empirique de Molitor. Cette formule stipule que la hauteur des vagues dépend de la vitesse du vent horaire V et du fetch F (longueur du plan d'eau dans le sens des vents dominants).

$$\text{Si } F < 30 \text{ km} \quad h_v = 0.76 + 0.032\sqrt{V \cdot F} - 0.26 \sqrt[4]{F} \quad (\text{Eq I.3})$$

$$\text{Si } F > 30 \text{ km} \quad h_v = 0.032\sqrt{V \cdot F} \quad (\text{Eq I.4})$$

h_v : hauteur des vagues en (m)

V : Vitesse des vents en (km/h)

F : Fetch en (km)

La revanche doit en outre permettre de compenser le tassement du barrage après construction et qui est de l'ordre de 1% de la hauteur totale du barrage si l'ouvrage a été bien réalisé. Généralement une valeur minimale de 1.2m à 1.5 m est adoptée pour des digues de moins de 10 m de hauteur et une valeur supérieure à 1.5m pour les grands ouvrages. [9]

I.5.3 Largeur en crête du barrage :

La largeur en crête doit être au moins égale à 3m pour permettre le passage des engins de terrassement pendant la réalisation et ultérieurement pour son entretien. Parfois elle est calculée par les formules :

$$L = 1.65\sqrt{H} \quad (\text{m}) \quad (\text{Eq I.5})$$

$$L = 3.6 \sqrt[3]{H} - 3 \quad (\text{m}) \quad (\text{Eq I.6})$$

Où H est la hauteur du barrage en mètre. [9]

I.5.4 Pente des talus :

L'inclinaison des talus est exprimée par les termes "pente" ou "fruit". Dans le cas des barrages en remblai, le terme pente (inverse du fruit) est communément utilisé.

La pente du talus qui est le rapport de la hauteur du talus sur sa projection horizontale est fixée par le calcul de stabilité. [9]

Tableau I.1: Pentes des talus des barrages en terre (norme ex URSS) [7]

Hauteur du Barrage	Pentes des talus	
	Amont	Aval
$H \leq 5$	$\frac{1}{2}$ à $\frac{2}{5}$	$\frac{2}{3}$ à $\frac{4}{7}$
$5 < H \leq 10$	$\frac{2}{5}$ à $\frac{2}{5.5}$	$\frac{4}{7}$ à $\frac{4}{9}$
$10 < H \leq 15$	$\frac{2}{5.5}$ à $\frac{1}{3}$	$\frac{4}{9}$ à $\frac{2}{5}$
$15 < H \leq 50$	$\frac{1}{3}$ à $\frac{1}{4}$	$\frac{2}{5}$ à $\frac{1}{4}$
$H > 50$	$\frac{1}{4}$ à $\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$ à $\frac{2}{9}$

CHAPITRE II

Etude des infiltrations et la stabilité dans les barrages en terre

II.1 Etude des infiltrations dans les barrages en terre :

II.1.1 Introduction :

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 :

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

L'étude d'infiltration permet de déterminer les éléments suivants :

- La Ligne de saturation

La ligne de saturation est une ligne suivant laquelle la pression à l'intérieur du massif est égale à la pression atmosphérique, elle sépare la zone humide de la zone sèche.

- Les pressions interstitielles

Elles peuvent être déterminées à partir du tracé d'un réseau de lignes équipotentiels (les lignes équipotentiels sont des lignes fictives d'égale pression).

- Le Débit de fuite

Ce débit de percolation est un indice de fonctionnement de l'ouvrage, il doit être calculé et contrôlé en continu. [9]

L'étude de l'infiltration peut aussi se faire par :

- **Méthodes graphiques** : méthodes simplifiées telles que la méthode de Kozeny qui utilise des approximations et des propriétés graphiques du réseau d'écoulement .
- **Méthodes analogiques** : méthodes électriques et magnétiques (pour des cas simples).
- **Méthodes de simulation numérique** : (outil mathématique qui peut s'adapter avec des cas complexes). [6]

II.1.2 Ligne de saturation :

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

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

Le gros avantage de la méthode de Kozeny, c'est qu'elle permet de trouver les trois paramètres que nous avons cités, sans être réellement obligé de connaître la répartition de toutes les lignes de courant. Il est juste important de respecter quelques règles de distribution des lignes :

- Le parement amont est une équipotentielle.
- La ligne de saturation est une ligne de courant.
- La fondation est une ligne de courant (cas fondation imperméable).
- La pression hydraulique étant nulle sur la courbe de saturation, le potentiel en un point de cette ligne est due uniquement à la cote de ce point.
- Les équipotentielles sont perpendiculaires aux lignes de courant. [6]

II.1.2.1 Ligne de saturation pour barrage homogène sans drain sur sol imperméable :

Kozeny a montré que, dans un barrage en terre homogène et isotrope non drainé, 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 .

L'équation de cette parabole s'écrit :

$$Y^2 - Y_0^2 - 2XY_0 = 0 \quad \text{Avec :} \quad Y_0 = \sqrt{(h^2 + d^2)} - d$$

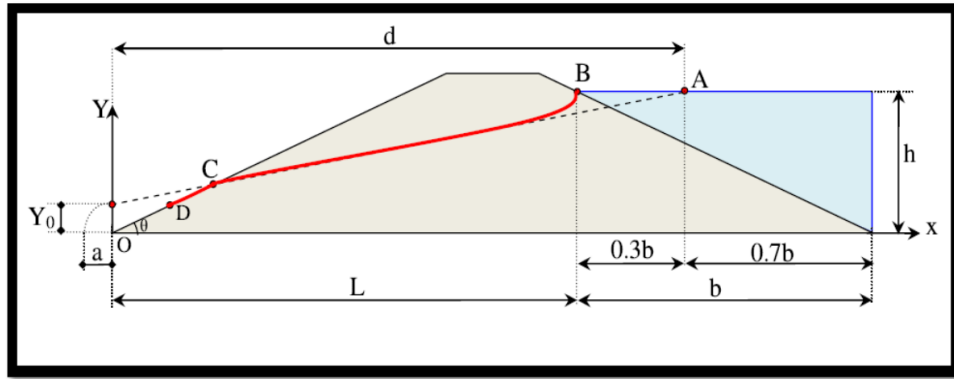


Figure II.1 : Ligne de saturation pour barrage homogène sans drain sur sol imperméable

Les étapes suivantes permettent la détermination graphique de la ligne de saturation pour un barrage homogène reposant sur une fondation imperméable sans drain :

- Dessinez la section du barrage en terre et le niveau d'eau en amont (h). Le point B est le point sur le talus amont qui coïncide avec le niveau d'eau ;
- Repérez le point A à une distance de 0,3b du point B sur la surface de l'eau ;
- Le foyer de la parabole de Kozeny se situe au pied aval du barrage, au point O. Choisissez O comme origine des axes X Y ;
- A l'aide de l'équation précédente , tracer la courbe de Kozeny 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 à partir de la parabole de Kozeny, on procède à une correction au droit du parement amont et du pied aval ;
- 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 : on fait aboutir la ligne de saturation en un point D tel que :

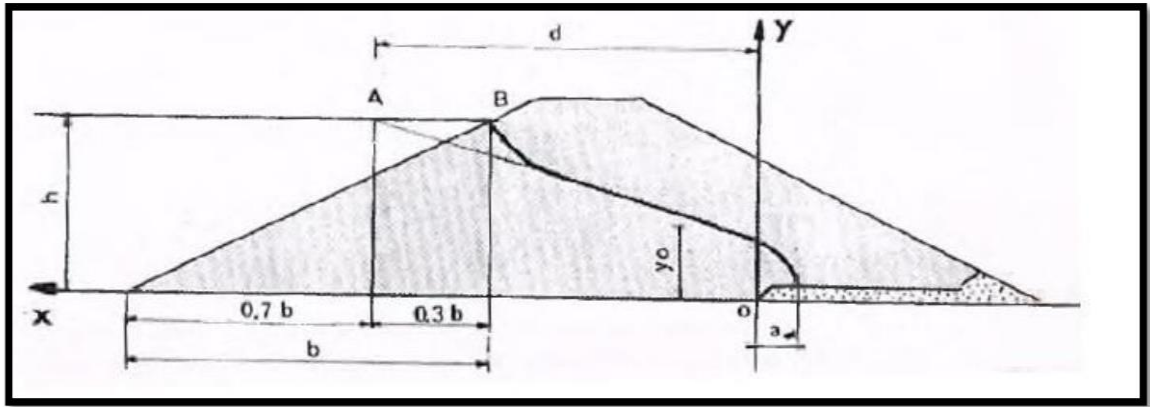
$$OD \approx \frac{2}{3} OC$$

On peut aussi trouver le point D avec la relation suivante :

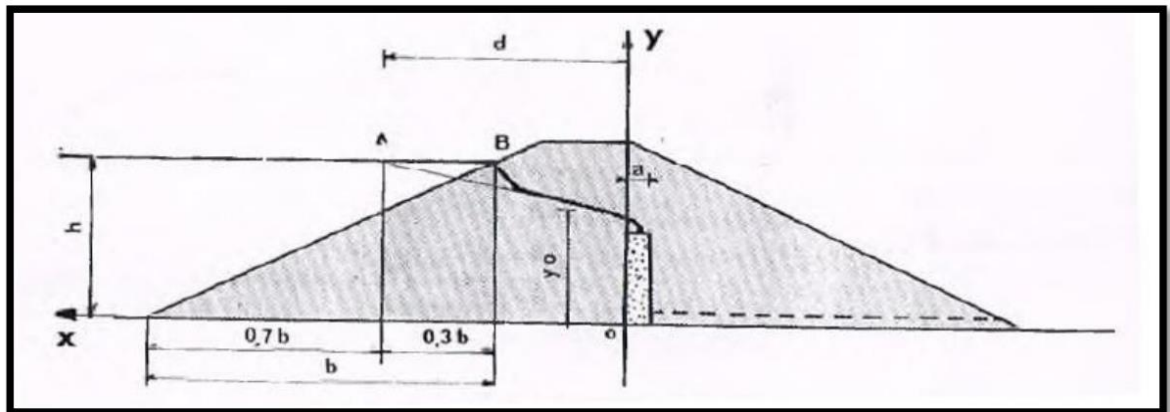
$$OD = \sqrt{h^2 + d^2} - \sqrt{d^2 - h^2 \cos^2 \theta} \quad [9] \quad (\text{Eq II.1})$$

II.1.2.2 Ligne de saturation pour un barrage homogène avec drain :

En général, les barrages en terre sont munis de drain pour rabattre la ligne de saturation à l'intérieur du barrage.



a) Cas d'un drain horizontal



b) Cas d'un drain vertical

Figure II.2 : Ligne de saturation pour un barrage homogène avec drain

II.1.2.3 Ligne de saturation pour un barrage à noyau sur fondation imperméable :

Cette ligne est une représentation approximative de la réalité, mais est suffisante pour notre étude. Quoi qu'il arrive après en sortie de noyau, la construction de drains est obligatoire sur chaque face. Ces filtres permettent de garder l'intégrité du noyau en interdisant le lessivage des matériaux.[6]

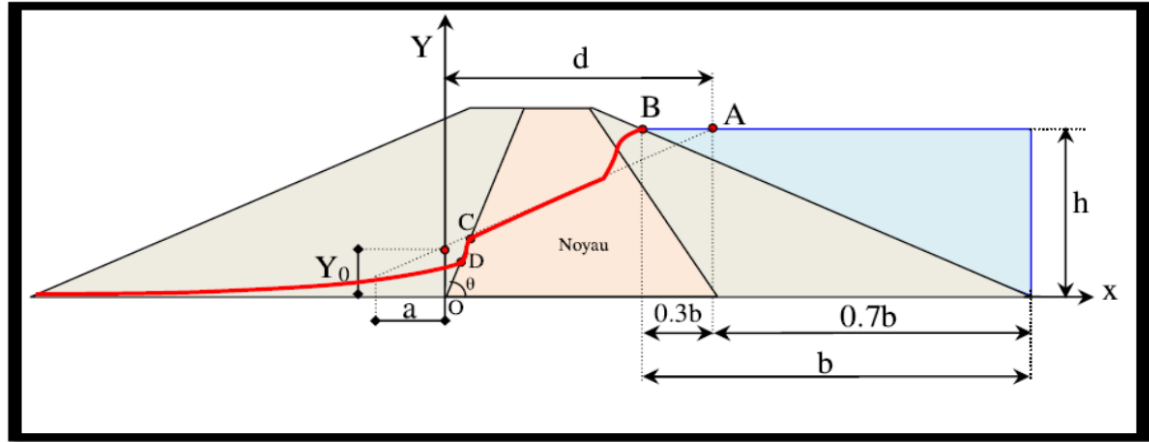


Figure II.3 : Ligne de saturation d'un barrage à noyau

II.1.2.4 Ligne de saturation pour barrage fondé sur sol perméable :

Dans le cas où le sol de fondation est perméable, de perméabilité égale à celle du massif les méthodes de détermination de la ligne de saturation restent applicables, mais les formules donnant le débit ne sont plus valables. [9]

II.1.3 Pressions interstitielles :

La pression interstitielle P représente la pression existant en un point du sol saturé. Sa forme générale est :

$$P = \rho_e \cdot g \cdot (h - Z) \quad (\text{Eq II.2})$$

h : la charge hydraulique.

Z : la cote d'un point du barrage par rapport à un repère.

Cette pression doit être minimisée pour des raisons de stabilité. En effet, si cette pression est trop élevée, cela signifie qu'il y a beaucoup d'eau, il y a alors un risque de présence du phénomène de renards, ce qui nécessite un bon drainage du corps de barrage, notamment dans la partie amont qui en générale la plus soumise à de forts gradients hydrauliques. [6]

II.1.4 Débit de fuite :

Le débit de fuite est estimé à partir de la loi de DARCY par la formule suivante :

$$q = K \cdot I \cdot S \quad (\text{Eq II.3})$$

Avec :

q : Débit de fuite en ($m^3/s/ml$).

I : Gradient hydraulique adimensionnel.

S : Section mouillée sur le parement aval du barrage (m).

K : Coefficient de perméabilité (m/s).

Dans le cas de l'écoulement parabolique, la section S est estimée par l'ordonnée y de la ligne phréatique et le gradient hydraulique I par sa pente $\frac{dy}{dx}$.

donc : $q = K \cdot y \cdot \frac{dy}{dx}$, cela nous donne :

$$q = K \cdot Y_0 \quad (\text{Eq II.4})$$

$$q = K \cdot (\sqrt{h^2 + d^2} - d) \quad (\text{Eq II.5})$$

Le débit total à travers le barrage est :

$$Q = q \cdot \frac{2}{3} \cdot L \quad (\text{Eq II.6})$$

L : largeur de la digue [6]

II.2 Rupture des barrages en terre :

On décrit une rupture de barrage en terre comme la destruction ou le mouvement d'une partie de l'ouvrage, de ses appuis ou de ses fondations le rendant inapte à retenir l'eau .

II.2.1 Causes de rupture :

Les causes de rupture des barrages peuvent être techniques, naturelles ou humaines.

Toute fois la proportion majeure des accidents de destruction des barrages est du au rupture par érosion que se soit interne (infiltrations) ou externe (submersion). [7]

II.2.1.1 Causes techniques :

Actuellement avec l'évolution des techniques de construction rend les barrages modernes beaucoup plus sécurisés.

Mais la prise en considération de ces problèmes techniques qui peuvent entrainer le rupture d'un barrage est obligatoire que se soit :

- Des défauts de conception de l'ouvrage telle que le sous dimensionnement des évacuateurs des crues.
- Insuffisance de drainage.
- Mauvaise choix des matériaux.
- Défaut fonctionnement des vannes.
- La nature des fondations ou encore l'âge de l'ouvrage. [7]

II.2.1.2 Causes naturelles :

Les causes naturelles peuvent être à l'origine de rupture de barrage :

- les crues exceptionnelles d'intensité supérieure à celle arrêtée pour le dimensionnement des évacuateurs de crues.
- Les séismes peuvent causer des dommages non négligeables sur les barrages (déformations, tassements, fissures, ...) et le risque sismique est systématiquement pris en compte lors de la conception des ouvrages, même s'il est peu élevé.
- Les glissements de terrains, qui peuvent toucher l'ouvrage lui-même. [7]

II.2.1.3 Causes humaines :

Les accidents dont l'origine sont humaines peuvent se résumer :

- Etudes préalables non approfondies.
- Contrôle d'exécution insuffisant non rigoureux.
- Erreurs d'exploitation (surcharge sur la crête , la non ouverture des vannes au moment opportune).
- Défaut de surveillance et d'entretien.
- Les actes de sabotage. [7]

II.2.2 Types et modes de ruptures des barrages en terre :

Quatre types de ruptures peuvent affecter les barrages, qu'ils soient naturels ou artificiels. Si ces mécanismes sont a priori faciles à individualiser, une rupture réelle est en principe le résultat d'une conjonction de divers d'entre eux.

II.2.2.1 Rupture par instabilité externe (rupture d'ensemble) :

Cette rupture peut être initiée soit à partir du parement amont, soit depuis le parement aval.

- Le cas de rupture d'ensemble à partir du parement aval sont liés à la charge hydraulique à l'intérieure de la digue. Ils sont favorisés par les facteurs suivants :
 - Lorsque le profil de la digue est étroit et que ses parements sont raides.
 - Lorsque l'hétérogénéité du barrage favorise une piézométrie élevée.
 - Lorsque les caractéristiques des matériaux constituant la digue sont mauvaises (faible compacité, présence de niveaux argileux sous-consolidés, ...).

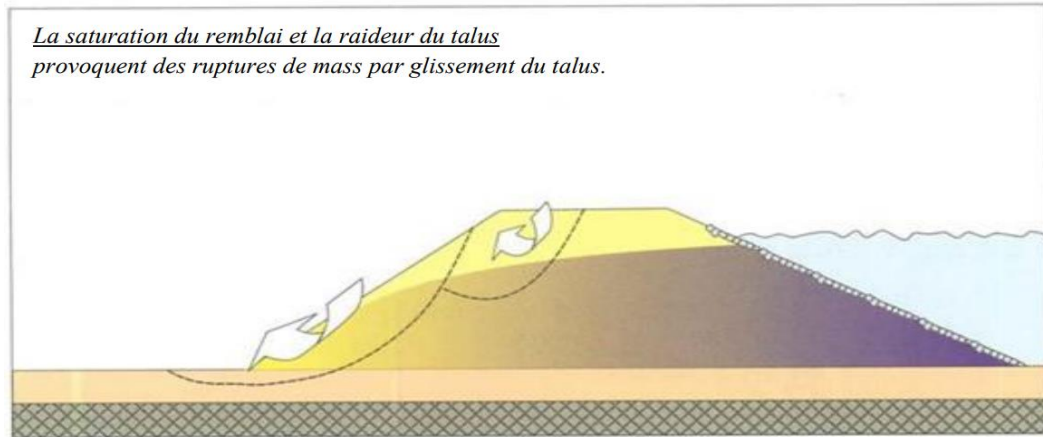


Figure II.4 : Rupture d'ensemble à partir du parement aval

- Le cas de rupture d'ensemble à partir du parement amont est en général lié à une décrue rapide. Lorsque le niveau de l'eau à l'arrière du barrage 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 alors plus stabilisé par la pression de l'eau et les terrains saturés, se met à glisser.[7]

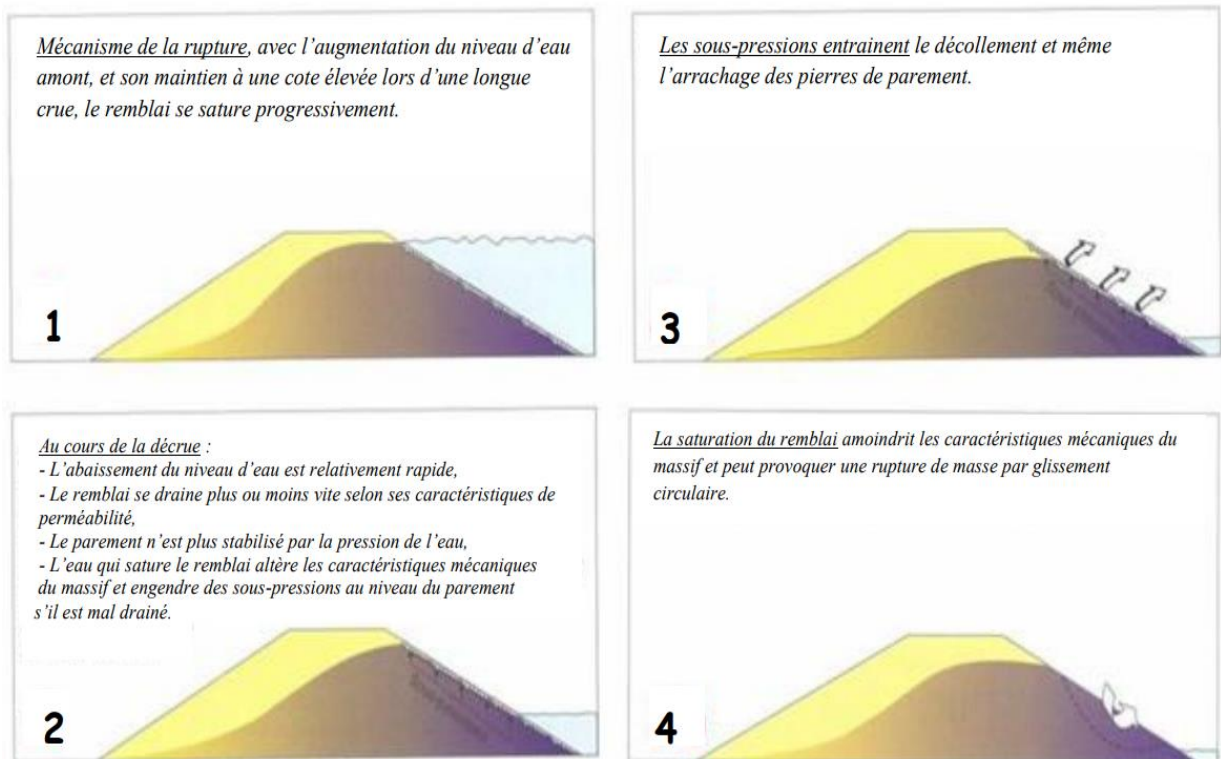


Figure II.5 : Rupture d'ensemble à partir du parement amont

II.2.2.2 Rupture par érosion interne (renard hydraulique) :

- L'absence des ouvrages de base ou complémentaire de sécurité tels que le drainage adéquat, la non dispatching convenablement des matériaux selon leurs perméabilités de l'amont vers l'aval.
- La non-conformité du compactage et l'hétérogénéité des matériaux tout ça peut être la cause préférentielle de l'eau à s'infiltrer que se soit à travers le corps de la digue ou travers ces fondations.
- Le gradient hydraulique provoqué dépend comme déjà cité de la disposition des matériaux selon leurs perméabilités et la charge hydraulique cas niveau normal de retenue conduire à une érosion interne du barrage en terre.

Cette érosion génère des cheminements perpendiculaires au long du barrage, les vitesses des eaux d'infiltrations augmentent en proportion avec le gradient hydraulique qui s'accroît de l'amont vers l'aval, ou il arrache et transporte en même temps les particules fins de matériaux de recharge.

Des véritables galeries peuvent être ainsi créées par l'évolution des renards qui peuvent former des brèches dans le barrage. [7]

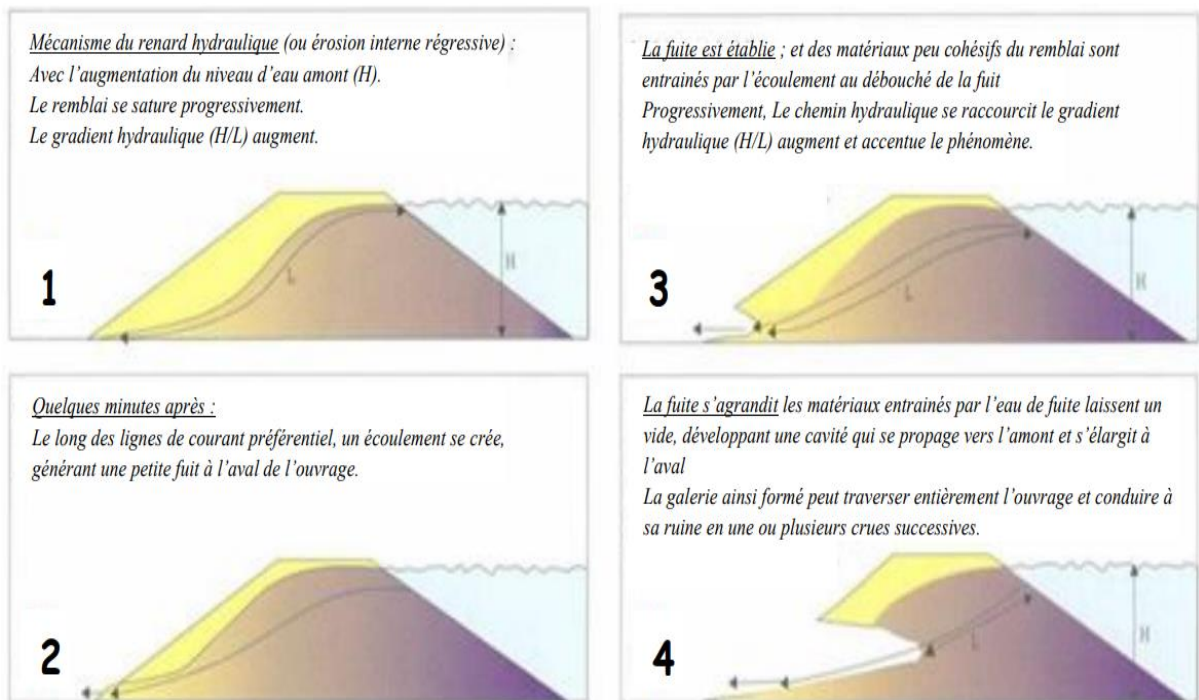


Figure II.6 : Rupture par renard hydraulique

II.2.2.3 Rupture par érosion externe :

Généralement il correspond à l'écoulement superficielle de l'eau avec l'arrachement des particules affleures du corps de la digue notamment à la crête et au talus aval par le ruissèlement des eaux suite au forte et long pluie , ce type de rupture externe générale se produise lors d'absence ou manque des matériaux de protection des parements de talus ou de butés des talus que se soit à l'amont ou à l'aval qui s'ajoute a la non prise des précautions d'étanchéités de la crête .

Mais ce type de rupture il s'est produit lors de la réalisation des premiers barrages dans le monde, actuellement les types d'érosion externes peuvent classé en deux :

- Affouillement
- Submersion

a) Par affouillement :

Le parement amont des barrages peut subir sous les effets des courants la dégradation progressive du pied, diminuant les caractéristiques mécaniques de la digue (principalement du fait de la saturation en eau des matériaux).

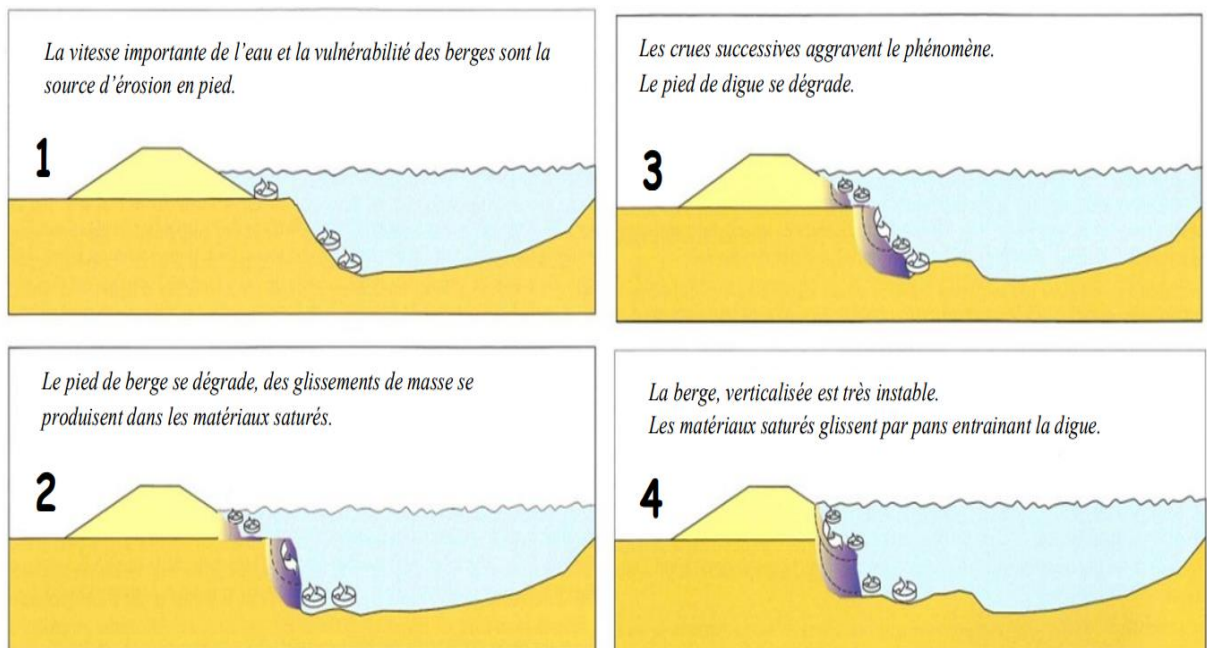


Figure II.7 : Rupture par affouillement

Plusieurs facteurs peuvent favoriser la rupture par affouillement :

- La vitesse importante de l'eau et les successions des crues.
- Emplacement du barrage dans un rétrécissement du cours d'eau ou à l'extérieur d'un virage formé par celui-ci sera d'avantage exposé.
- La présence d'éléments susceptibles de créer des tourbillons locaux, par exemple des arbres ou des gros blocs.
- Les caractéristiques mécaniques du parement amont du barrage.

b) Par submersion :

Nous avons vu que parmi la pathologie graves qui menace la stabilité d'un barrage en terre est l'effet de submersion.

L'eau déborde au dessus et sur le long de la crête du barrage, il inonde le parement aval qui commencera à s'éroder, les matériaux s'arrachent des fouilles se sont figurées au pied de barrage immergé de l'eau, le glissement se produise et les matériaux sont rapidement emportés en entrainant la ruine totale. [7]

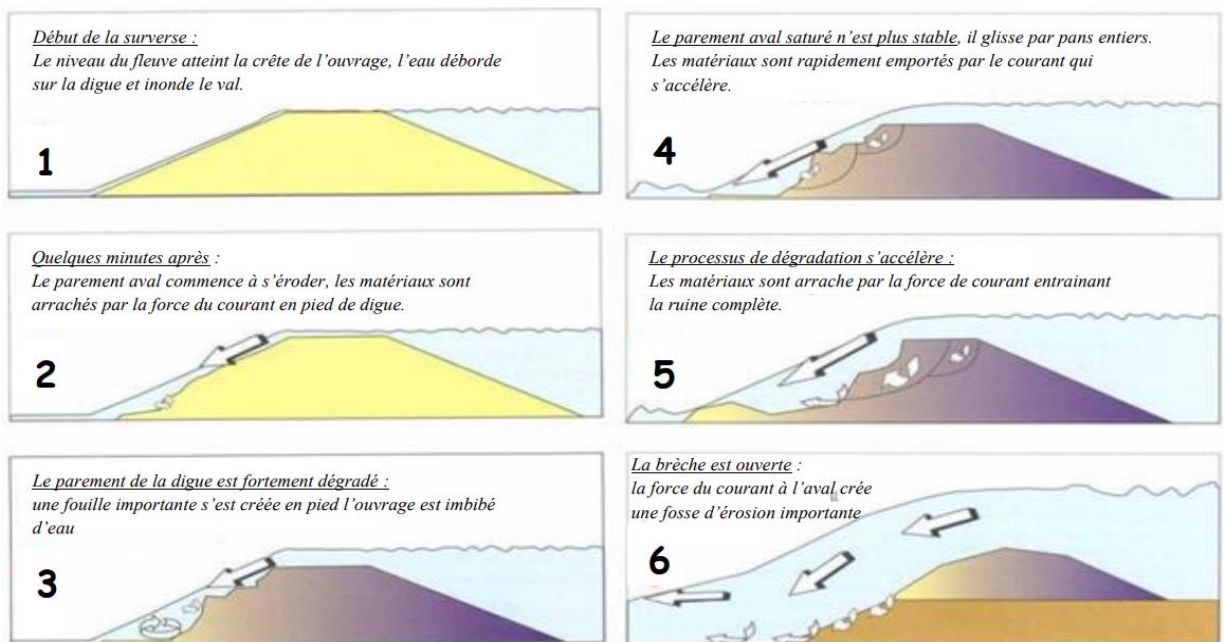


Figure II.8 : Rupture par submersion (par surverse)

II.2.2.4 Rupture par liquéfaction de la digue ou des terrains de fondation :

Les barrages contenant une portion importante de matériaux à faible granulométrie sont susceptibles de rupture par liquéfaction.

Lors de ce phénomène, la conjonction de la saturation du sol en eau et d'une contrainte cisailant (par exemple lors d'un séisme) peut provoquer une perte de cohésion du sol, et se transforme au comportement liquide.

La figure II.9 montre un exemple de rupture par liquéfaction lors du tremblement de terre de Kushiro-Oki en 1983. [7]

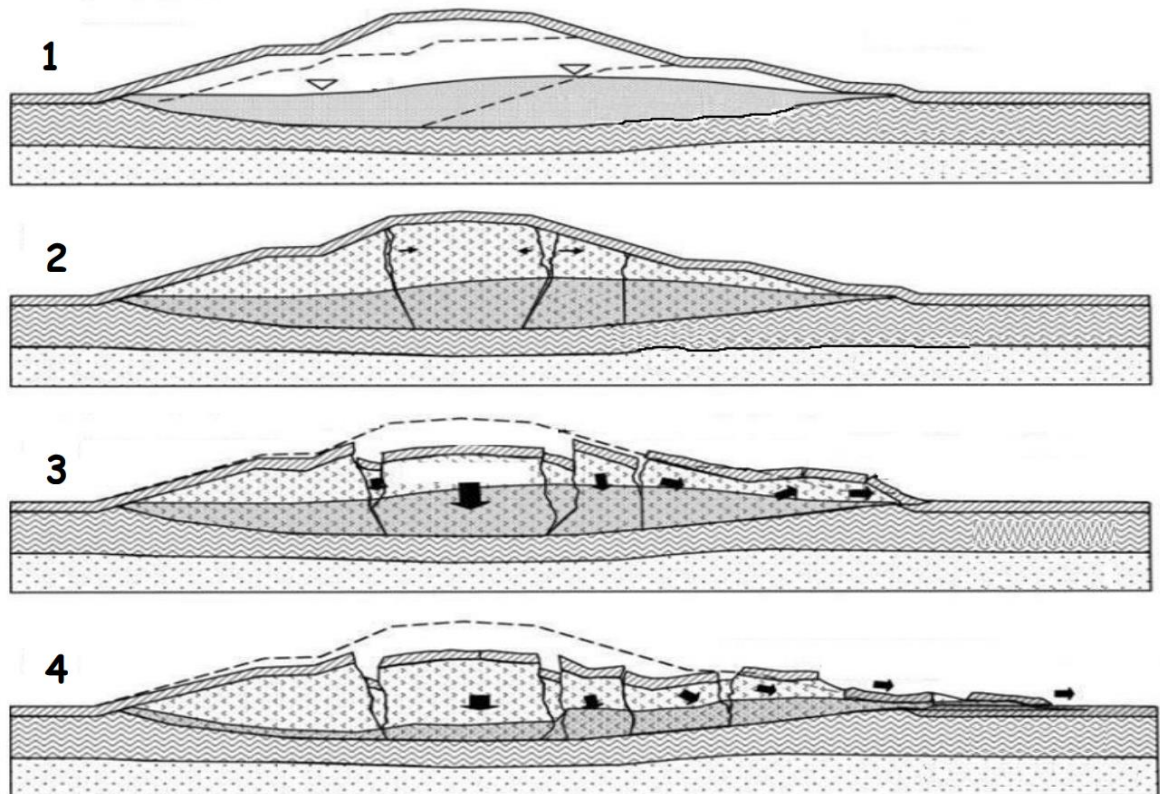


Figure II.9 : Rupture par liquéfaction

Les facteurs favorisant ce type de rupture sont principalement liés à la nature du barrage :

- La nature du sol (présence de particules à faible granulométrie).
- L'état de saturation du sol ainsi que sa résistance aux pressions interstitielles. [8]

II.2.3 Maîtrise du risque de rupture des barrages :

Comme pour les autres risques technologiques, le risque de rupture des barrages doit être maîtrisé à la source pour minimiser ce risque et atténuer ses effets dans le cas de sa production. Pour cela, les études et les méthodes de réalisations doivent être de plus en plus perfectionnés, une surveillance avec osculation de l'ouvrage doit être régulière et permanente. Des mesures d'organisation des secours, d'alerte et d'information des populations doivent être également mises en œuvre afin de limiter au maximum les conséquences d'un accident. [5]

II.2.3.1 Contrôle du tassement :

Les tassements proviennent des réarrangements des grains de matériaux des fondations ou des remblais ; ils se soldent par un affaissement des remblais visible en surface. La cote de la crête doit être contrôlée chaque année à l'aide d'un niveau et à partir des repères posés lors de la construction. Les tassements excessifs peuvent avoir pour effet le déversement par-dessus la digue, ce qui va endommager celui-ci. Si le tassement est trop important, il est nécessaire de surélever la digue pour retrouver sa cote en crête initiale. Les tassements peuvent se produire de façon inégale (tassement différentiel). Ceci est très dangereux car des fissures peuvent apparaître et constituer des voies propices pour les fuites. [5]

II.2.3.2 Contrôle des infiltrations :

Les infiltrations à travers et sous la digue peuvent provoquer le phénomène de renard hydraulique et entraîner la destruction du barrage.

Une surveillance attentive des suintements à la base du talus aval permettra de vérifier qu'il n'y a pas d'augmentation de débit ou de transport de matériaux.

On peut réduire les infiltrations en mettant en place un tapis étanche à l'amont. On peut aussi réaliser une tranchée de drainage à la base de la digue à l'aval afin d'assurer le bon drainage et éviter le transport de matériaux. [5]

II.2.3.3 Entretien des talus :

Il dépend du revêtement de protection mis en place :

- sur les talus enherbés, l'herbe doit être coupée chaque année après qu'elle a produit des graines ;

- sur les talus revêtus de pierre ou de moellons, vérifier que les moellons sont bien en place et faire les corrections nécessaires.
- les arbustes et les arbres doivent être déracinés sur les talus amont et aval. [5]

II.2.3.4 Entretien des structures annexes :

a) Prise d'eau

Il faut régulièrement nettoyer l'entrée de la prise d'eau pour éviter qu'elle soit obstruée par des branches, des objets flottants ou des sédiments.

b) Evacuateur de crues

Il faut régulièrement nettoyer l'entrée de l'évacuateur pour éviter qu'elle soit obstruée par des branches ou des objets flottants. Il faut aussi vérifier et réparer les éventuels affouillements à l'aval du déversoir et des seuils.

c) Comblement de la retenue par des sédiments

Sous l'effet de l'érosion du bassin, la retenue peut se combler de sédiments et perdre sa capacité de stockage. Il existe plusieurs méthodes pour faire face à ce problème :

- Le dragage de la retenue c'est-à-dire l'enlèvement des sédiments ; cette méthode qui implique l'utilisation d'engins de terrassements est onéreuse.
- le rehaussement de la digue qui est la méthode la plus économique. [5]

II.3 Etude de stabilité du barrage en terre ; le facteur de sécurité :

La stabilité des barrages en terre est abordée sous ses deux formes tout en précisant les méthodes de détermination du réseau d'écoulement. Sur le plan hydraulique, un barrage en terre ne doit pas subir une érosion interne sous l'effet des infiltrations de l'eau à travers son massif, pour cela il faut que le gradient hydraulique soit toujours admissible pour éviter le déclenchement du phénomène de renard.

Il faut aussi s'assurer que les talus du barrage en terre ne soient l'objet de glissements et donc il est indispensable de vérifier la stabilité au non glissement par une méthode appropriée.

La stabilité hydraulique précède la stabilité mécanique et elle consiste à :

- La détermination de la ligne de saturation ;
- La Construction du réseau d'écoulement ;
- L'évaluation du débit de percolation ;
- La vérification au renard. [4]

II.3.1 Définitions du facteur de sécurité :

Le principe de calcul de stabilité des talus consiste à déterminer le facteur (coefficient) de sécurité F_S . Il existe plusieurs définitions possibles du coefficient de sécurité ; chacune présente des avantages et des inconvénients. Nous indiquons ci-dessous un certain nombre de ces définitions :

$$1) F_S = \frac{\tau_{max}}{\tau} = \frac{\text{résistance au cisaillement maximale mobilisable}}{\text{résistance au cisaillement nécessaire à l'équilibre}} \quad (\text{définition de Bishop})$$

Il faut noter qu'avec cette définition la valeur du coefficient de sécurité est une valeur ponctuelle qui va donc dépendre de la position du point M considéré le long de la surface testée.

$$2) F_S = \frac{\text{effort résistant}}{\text{effort moteur}}$$

Cette définition suppose que la surface testée est plane.

$$3) F_S = \frac{\text{moment résistant}}{\text{moment moteur}} \quad (\text{définition de Frohlich})$$

Cette définition suppose que la surface testée est ou ellipsoïdale en 3D.

$$4) F_S = \frac{H_c}{H} = \frac{\text{hauteur critique}}{\text{hauteur réelle}}$$

Toutes ces définitions conduisent à des valeurs différentes pour une même géométrie, sauf dans le cas où l'on se trouve à la rupture ($F=1$). [1]

II.3.2 Choix des facteurs de sécurité :

Il est nécessaire, pour obtenir un coefficient de sécurité F_S supérieur à 1, que les forces « Résistantes » au niveau de la surface de rupture potentielle soient plus importantes que les forces motrices. Dans ces conditions, on admet généralement que l'équilibre est assuré. Cependant, en

raison de l'incertitude liée aux paramètres de calcul, en particulier mécaniques, cette valeur limite pourrait très bien ne pas être suffisante dans certains cas.

Le tableau ci-dessous, nous donne les valeurs de FS en fonction de l'importance de l'ouvrage et des conditions particulières qui l'entoure :

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

FS	Etat de l'ouvrage
<1	Danger
1.0 - 1.25	Sécurité contestable
1.25-1.4	Sécurité satisfaisante pour les ouvrages peu importants Sécurité contestable pour les barrages, ou bien quand la rupture serait catastrophique
>1.4	satisfaisante pour les barrages

La définition des seuils des facteurs de sécurité dépend de l'approche adoptée, des fréquences de sollicitations de l'ouvrage en question et du risque créé par la rupture. [1]

II.3.3 Méthodes des tranches :

Le découpage de la masse en mouvement en tranches verticales a permis le développement d'un très grand nombre de méthodes.

Toutes les méthodes d'équilibre limite supposent que le corps du sol au-dessus de la surface de glissement est subdivisé en blocs (les plans de division entre les blocs sont toujours verticaux).

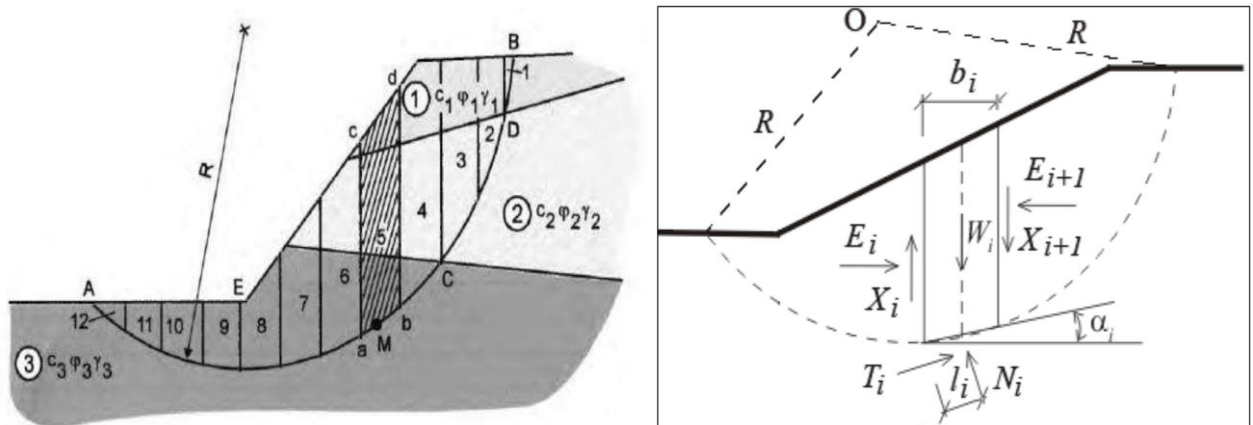


Figure II.10 : Schéma statique de la tranche

Ici, X_i et E_i sont les forces de cisaillement et les forces normales agissant entre les blocs individuels, T_i et N_i sont les forces de cisaillement et les forces normales sur les segments individuels de la surface de glissement, W_i sont des poids de blocs individuels.

Les méthodes de tranches diffèrent dans leurs hypothèses de satisfaire les équations de force d'équilibre et l'équation du moment d'équilibre par rapport au centre O. [1]

II.3.3.1 Méthode de Fellenius / Petterson (1955) :

La méthode la plus simple des tranches suppose seulement l'équation d'équilibre du moment global écrite par rapport au centre de la surface de glissement. Les forces de cisaillement et forces normales entre les blocs X_i et E_i sont négligées. Le facteur de sécurité F_S découle directement de l'expression suivante :

$$F_S = \frac{1}{\sum_i (W_i \cdot \sin \alpha_i)} \cdot \sum_i [c_i \cdot l_i + (N_i - u_i \cdot l_i) \cdot \tan \varphi_i] \quad (\text{Eq II.7})$$

Avec :

- W_i : le poids de la tranche
- N_i : la composante normale
- u_i : la composante interstitielle due à l'eau
- c_i, φ_i : valeurs effectives des paramètres du sol
- α_i : inclinaison du segment de la surface de glissement [1]

II.3.3.2 Méthode de Bishop (1955) :

La méthode de Bishop simplifiée suppose que les forces X_i entre les blocs sont nulles. La méthode est basée sur la satisfaction de l'équation d'équilibre des moments et de l'équation de l'équilibre des forces verticales. Le facteur de sécurité F_S se retrouve par une itération successive de l'expression suivante :

$$F_S = \frac{1}{\sum_i (W_i \cdot \sin \alpha_i)} \cdot \sum_i \left(\frac{c_i \cdot b_i + (W_i - u_i \cdot b_i) \cdot \tan \varphi_i}{\cos \alpha_i + \frac{\tan \varphi_i \cdot \sin \alpha_i}{F_S}} \right) \quad (\text{Eq II.8})$$

Avec :

- W_i : Le poids de la tranche.
- N_i : La composante normale.
- u_i : La composante interstitielle due à l'eau.

- c_i, φ_i : Valeurs effectives des paramètres du sol
- α_i : Inclinaison de l'arc de la tranche
- b_i : Largeur horizontale de la tranche [1]

II.4 Drainage dans les barrages en terre :

La présence d'une charge hydraulique à l'amont du remblai engendre une infiltration d'eau dans le barrage et ses fondations. Malgré l'attention accordée au dispositif d'étanchéité prévu, ces infiltrations peuvent être nuisibles à la stabilité tant hydraulique que mécanique de l'ouvrage. Pour y remédier on prévoit un dispositif de drainage souvent associé à des filtres. [8]

II.4.1 les filtres :

II.4.1.1 Définition :

Les filtres sont de minces couches successives de matériaux perméables dont la grosseur des éléments augmente dans la direction de l'écoulement. Ces filtres doivent assurer une transition entre une couche à granulométrie donnée vers une couche à granulométrie plus grossière. Si un filtre est constitué par plusieurs couches chacune doit jouer le rôle de filtre vis-à-vis de la précédente. [8]

II.4.1.2 Rôle des filtres :

Le rôle des filtres est très important dans le fonctionnement d'un barrage en terre, particulièrement sur le plan de la sécurité de l'ouvrage, ainsi ils peuvent jouer de nombreuses fonctions complémentaires les unes aux autres, parfois les filtres peuvent jouer le rôle de drains surtout dans les petits barrages.

Parmi leurs rôles on peut citer :

- Entreposés entre deux couches à granulométrie différentes, ils évitent que les grains fins de la première couche ne soient entraînés par les eaux d'infiltration à travers les matériaux de gros diamètres.
- Entreposés de part et d'autre d'un noyau d'étanchéité ou sous un écran d'étanchéité, ils jouent le rôle de couches drainantes en évacuant les eaux d'infiltration vers l'aval du barrage.

- Intercalés entre un massif de barrage et sa fondation, si elle est argileuse, contribue grandement à activer sa consolidation grâce à leur rôle drainant qui réduit les pressions internes. [8]

II.4.1.3 Composition des filtres :

Les filtres sont constitués de sables et de graviers dont les grains sont insolubles et non altérables en présence de l'eau. Ces dernières années les filtres granulaires sont de plus en plus remplacés par des géotextiles qui sont des produits industriels très économiques et faciles à mettre en œuvre.

Les filtres, pour être efficaces ne doivent pas se colmater ni se dégrader par entraînement de leurs propres grains. Ils doivent jouer le rôle pour lequel ils sont prévus à savoir éviter que les particules fines du matériau de base ne soient entraînées à travers les vides des couches perméables.[8]

II.4.2 Les drains :

II.4.2.1 Définition :

Le drain est un organe fortement perméable incorporé dans le barrage en terre. Il est généralement constitué de graviers et d'enrochements avec des caractéristiques de non altération au contact de l'eau et résistant aux grandes compressions. Il est admis que la présence de drain dans les barrages en terre est indispensable pour leur stabilité. Parfois le drain classique est remplacé par des tuyaux poreux ou perforés en matière souple ou rigide. On utilise également de plus en plus des géotextiles pour assurer le drainage des petits barrages. [8]

II.4.2.2 Rôle des drains :

Les drains dans les barrages en terre ont une multitude de fonctions très importantes.

- Interceptor les eaux d'infiltration et les évacuer à l'aval du barrage.
- Abaisser la ligne de saturation et éviter les résurgences sur le talus aval.
- Abaisser la ligne de saturation, pour garder une grande partie du remblai non saturé afin de conserver les caractéristiques géotechniques du matériau utilisé.
- La présence du drain dans un barrage en terre sert à minimiser le débit de fuite sur l'ouvrage.
- Il sert aussi à décompresser la fondation et donc à minimiser les pressions interstitielles.
- La présence du drain permet d'activer la consolidation du remblai. [8]

II.4.2.3 Différents types de drainages :

On rencontre plusieurs types de drainages qui diffèrent les uns des autres par leurs formes constructives, leur emplacement dans le barrage et le rôle pour lequel ils ont été prévus : [8]

a) Prisme de drainage :

Il est prévu lorsqu'il y a une présence d'eau à l'aval du barrage avec une variation du niveau, mais il nécessite pour sa construction un volume d'enrochement important ce qui rend son choix fonction de la disponibilité à proximité du site de l'ouvrage de zones d'emprunts où les enrochements sont disponibles en quantité suffisante et qualité acceptable.

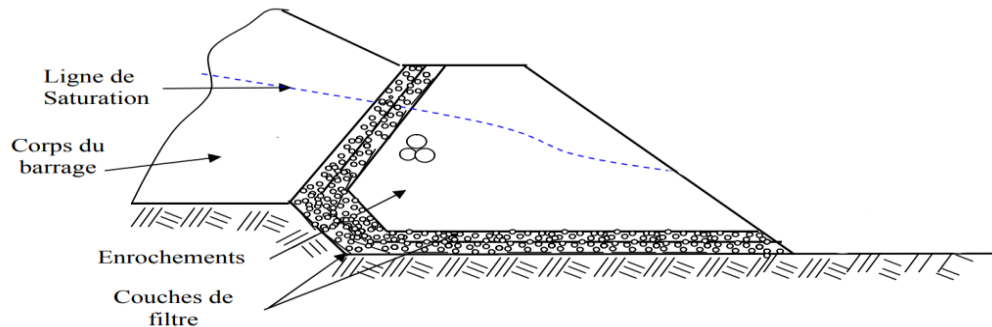


Figure II.11 : Prisme de drainage

b) Drainage de surface :

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

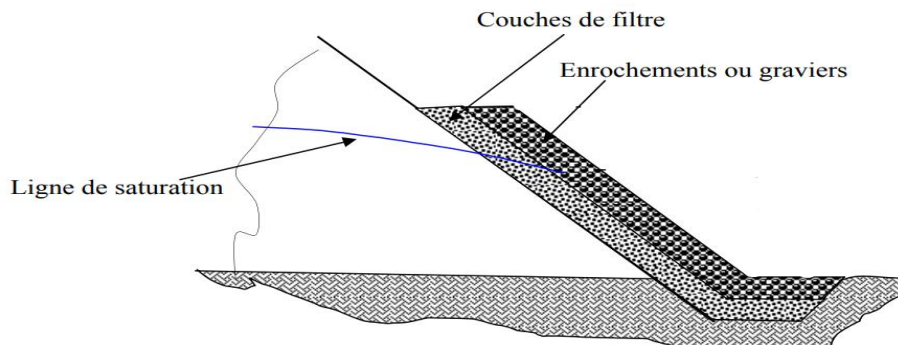


Figure II.12 : Drainage de surface

c) Prisme de drainage avec drainage de surface :

C'est une variante qui associe les deux variantes précédentes. Il est employé dans les cas où l'étude hydrologique fait ressortir la possibilité d'une élévation exceptionnelle du niveau d'eau à l'aval et qui risque de dépasser la crête du prisme de drainage.

La partie constituée par le prisme est dimensionnée de la même façon que pour le prisme seul. De même pour la partie, drainage de surface mais en prenant en considération la hauteur maximale du niveau aval.

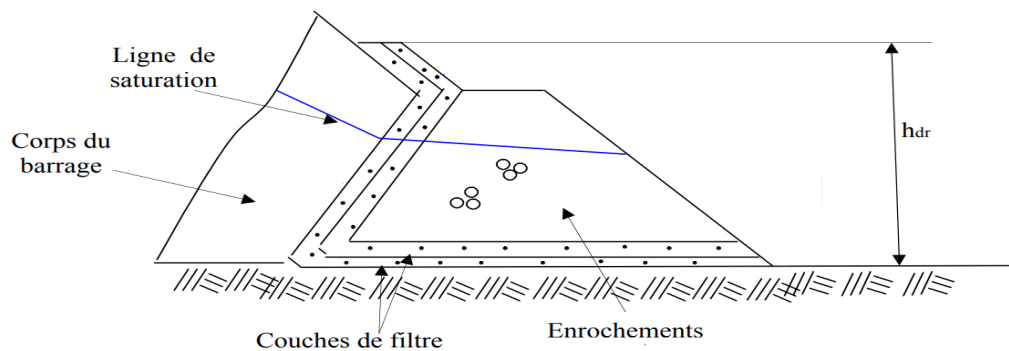


Figure II.13 : Prisme de drainage avec drainage de surface

d) Le drain tapis interne :

C'est une bande drainante disposée dans la partie aval du massif et au contact avec sa fondation. Ce type de drainage assure le drainage du massif et de sa fondation et il présente l'avantage de rabattre la ligne de saturation à l'intérieur du massif. Sa réalisation est très facile mais sa réparation en cas d'avarie est impossible.

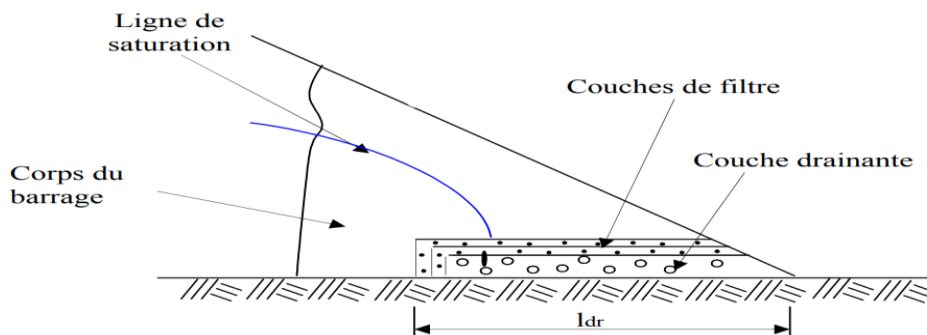


Figure II.14 : Drain tapis interne

e) Prisme de drainage avec drain tapis interne :

Le plus souvent et pour des raisons de sécurité de l'ouvrage, on associe les deux variantes du prisme de drainage et du tapis interne. Ainsi le prisme de drainage est prolongé à l'intérieur du massif par un drain tapis interne. on rencontre deux variantes suivant que les fondations sont perméables ou non.

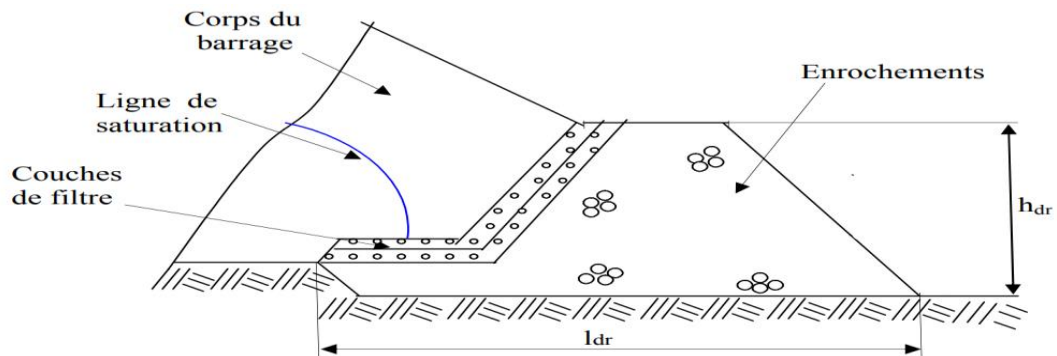


Figure II.15 : Prisme de drainage avec drain tapis interne sur fondations imperméables

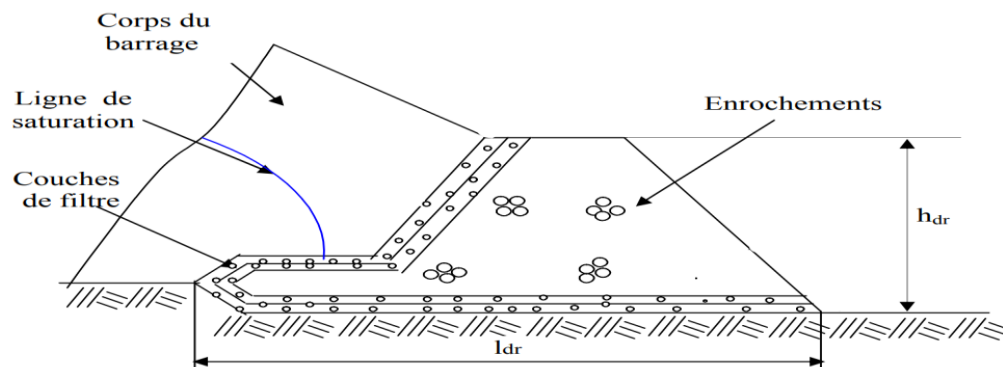


Figure II.16 : Prisme de drainage avec drain tapis interne sur fondations perméables

f) Drainage a bande :

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

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

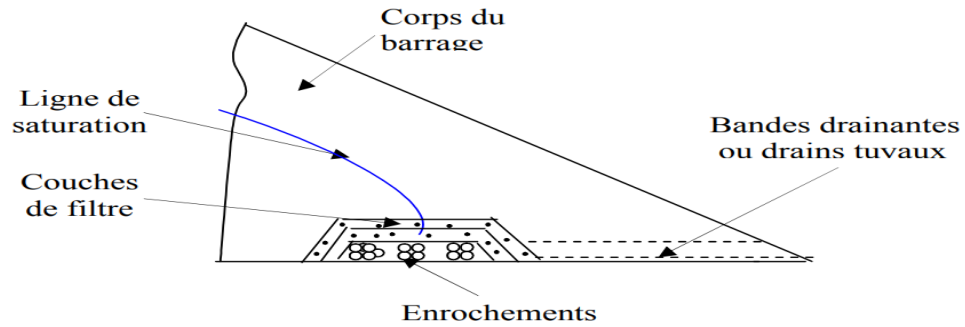


Figure II.17 : Drainage à bande

g) Le drain vertical :

Lorsqu'il y a de grands risques d'anisotropie, la seule solution valable est la projection d'un drainage vertical sous forme de bande d'enrochements ou de graviers protégée de part et d'autre par des filtres de transition.

L'eau d'infiltration est acheminée vers l'aval du barrage par un réseau de tuyaux parallèles ou par un drain tapis filtrant s'il faut drainer la fondation.

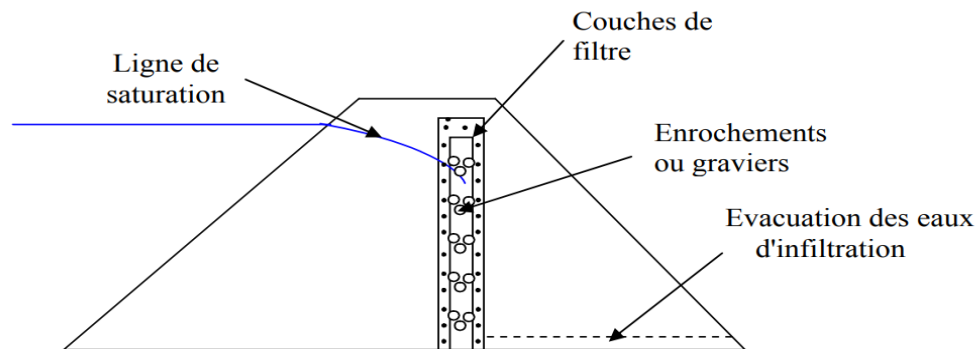


Figure II.18 : Drain vertical

h) Puits filtrants de décompression :

Généralement les puits filtrants de décompression sont creusés à l'aval du dispositif d'étanchéité des fondations sous le remblai et jusqu'à son aval. Ils sont conseillés lorsque les fondations sont relativement perméables mais très hétérogènes, ceci permet de drainer toutes les couches perméables alternées avec d'autres couches imperméables sous le barrage et donc diminuer les sous pressions dans la zone située sous le talus aval.

CHAPITRE III

Présentation de l'outil de simulation Géo-Slope

III.1 Introduction :

En général, le calcul de stabilité des pentes est déterminé à partir du calcul à la rupture selon l'approche du critère de Mohr-Coulomb qui suppose que le sol est rigide-plastique. Cette approche de base est modifiée ici par la prise en compte des paramètres tels la succion et le coefficient sismique.

Les logiciels informatiques développés de nos jours facilitent la prise en compte de ces paramètres et conduisent à des solutions générales et plus réalistes de la stabilité des pentes. Ces logiciels peuvent utiliser à la fois les formulations d'équilibre limite et les méthodes des éléments finis pour décrire correctement le comportement des sols. Dans ce travail, le logiciel de calcul GEO-SLOPE, développé par Geo-slope International Ltd, a été utilisé pour réaliser les calculs de stabilité statique, pseudostatique et par éléments finis. Ce logiciel nous a permis de modéliser le glissement en appliquant les résultats des analyses expérimentales et paramétriques des sols utilisés et la géométrie réelle de ce glissement.

Le choix de ce logiciel a été motivé par sa diversité du fait qu'il est constitué d'une suite de différents modules (SLOPE/W, SEEP/W, QUAKE/W, SIGMA/W, TEMP/W, CTRAN/W, AIR/W et VADOSE/W) qui peuvent être utilisés pour des problèmes variés (évaluation des barrages et des digues, infiltration, succion, séisme, liquéfaction...), par sa performance, sa souplesse, etc. [14]

III.2 Présentation du logiciel GEO-SLOPE :

GEO-SLOPE est un programme de calcul de stabilité des pentes qui permet de modéliser des problèmes de géotechnique et de géo-environnement. Ce programme de conception assistée par ordinateur permet d'utiliser la méthode des tranches pour déterminer le facteur de sécurité des massifs en pente constitués d'une ou de plusieurs couches de sol, avec ou sans présence de nappe, avec ou sans sollicitations sismiques, avec ou sans succion, etc. Dans son architecture globale,

ce programme est composé de sept modules distincts. Voici une brève présentation de ces différents modules :

- **SLOPE/W** : pour la stabilité de la pente ;
- **SEEP/W** : pour modéliser les infiltrations ;
- **SIGMA/W** : pour contrainte-déformation ;
- **QUAKE/W** : pour le tremblement de terre dynamique ;
- **TEMP/W** : pour la géothermie ;
- **CTRAN/W** : pour le transport des contaminants ;
- **AIR/W** : pour le flux d'air ;

Dans notre étude, on va se limiter aux deux programmes SEEP/W et SLOPE/W utilisés dans l'analyse du comportement des digues en terre. [14]

III.3 SEEP/W :

III.3.1 Présentation :

SEEP/W est un logiciel d'éléments finis qui peut être utilisé pour modéliser le mouvement et la distribution de pressions interstitielles dans un milieu poreux tel que le sol. Sa formulation complète permet d'analyser à la fois des problèmes d'infiltration simple et très complexe. SEEP/W est appliqué dans l'analyse et la conception des projets géotechnique, civil, hydrogéologique et minier. [13]

III.3.2 Domaine d'application :

SEEP/W est un programme général d'analyse des infiltrations qui modélise l'écoulement saturé et non saturé. Sa capacité à modéliser l'écoulement non saturé permet de traiter un grand nombre de problèmes réels.

L'introduction de l'écoulement non saturé dans la modélisation des eaux souterraines est importante pour obtenir des résultats réels. Dans les sols, la conductivité hydraulique et la teneur en eau, ou l'eau stockée, change en fonction de la pression interstitielle. SEEP/W modélise ces relations comme des fonctions continues. La plupart des autres logiciels d'analyse d'infiltration ne prennent pas ces relations en compte. [13]

III.4 SLOPE/W :

III.4.1 Présentation :

SLOPE/W est un logiciel qui utilise la théorie d'équilibre limite pour calculer le facteur de sécurité des pentes. La formulation complète de SLOPE/W permet d'analyser facilement les problèmes de stabilité des pentes simple et complexe en utilisant différentes méthodes de calcul du facteur de sécurité.

SLOPE/W a des applications dans l'analyse et conception des projets géotechnique, civil, hydrogéologique et minier. [13]

III.4.2 Domaine d'application :

SLOPE/W est un puissant programme d'analyse de stabilité des talus. Utilisant la méthode de l'équilibre limite, il est capable de modéliser les sols de types hétérogènes, de stratigraphie complexe avec différentes conditions de pression interstitielle. Des analyses peuvent être exécutées en utilisant des paramètres déterministes ou probabilistes d'entrée. En plus, les forces programmées en utilisant l'analyse des forces en éléments finis peuvent être utilisées dans la programmation en équilibre limite pour la plupart des analyses de stabilité des pentes. La combinaison de tous ces dispositifs signifie que SLOPE/W peut être employé pour analyser presque n'importe quel problème de stabilité de pente rencontré. [13]

III.5 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 :

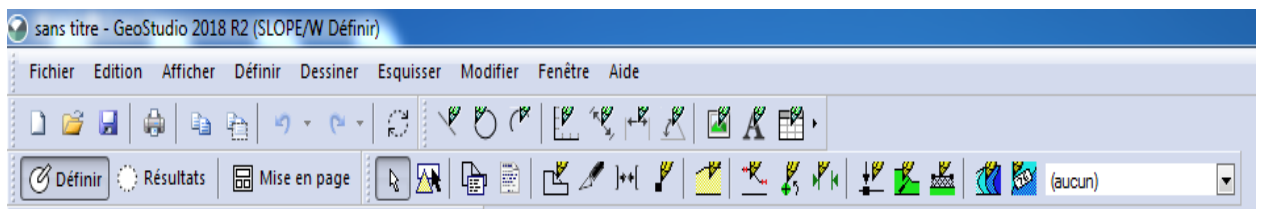


Photo III.1 : barre d'outil principale dans logiciel de SEEP/W

- **Définir (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 SEEP / W et configurez l'espace de travail du problème. Choisissez le type d'analyse, tel que la pression de l'eau interstitielle. [4]

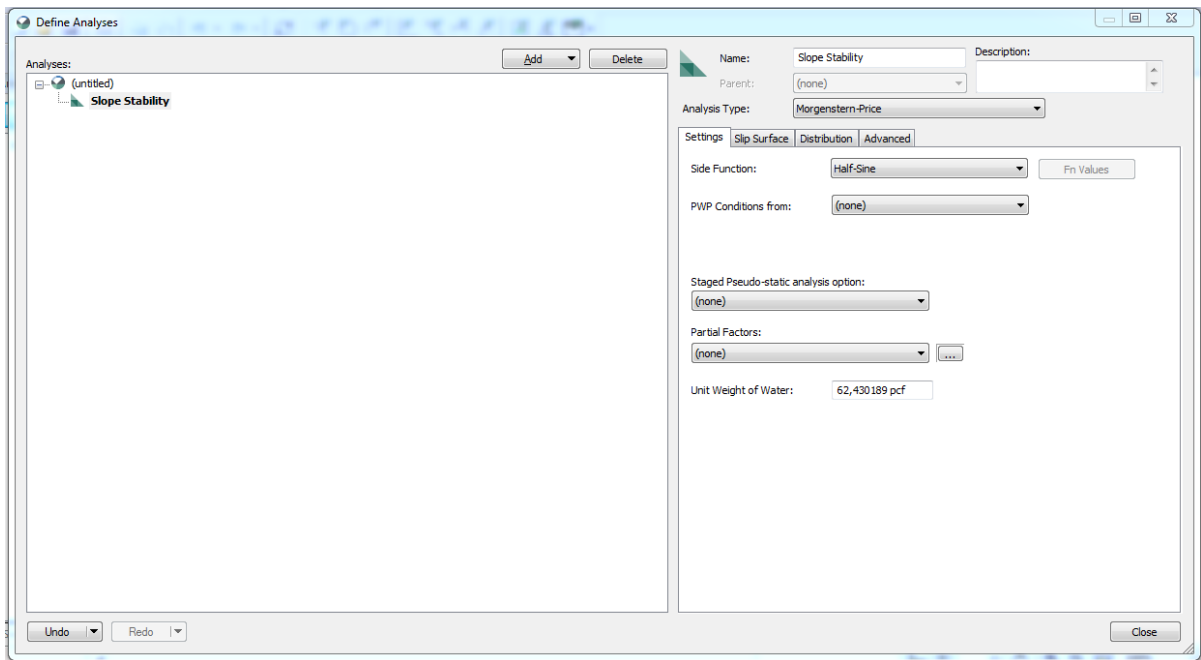


Photo III.2 : Fenêtre d'analyse du module SLOPE/W

- **Afficher (View) :**

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.

- **Esquisser (Sketch) :**

Permet le dessin des régions de domaine, y compris les polygones et les régions circulaires.



Photo III.3 : Dessin des régions

- **Dessiner (Draw) :**

- Le dessin des régions.
- Le dessin des points.

- **Définir (KeyIn) :**

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. [4]

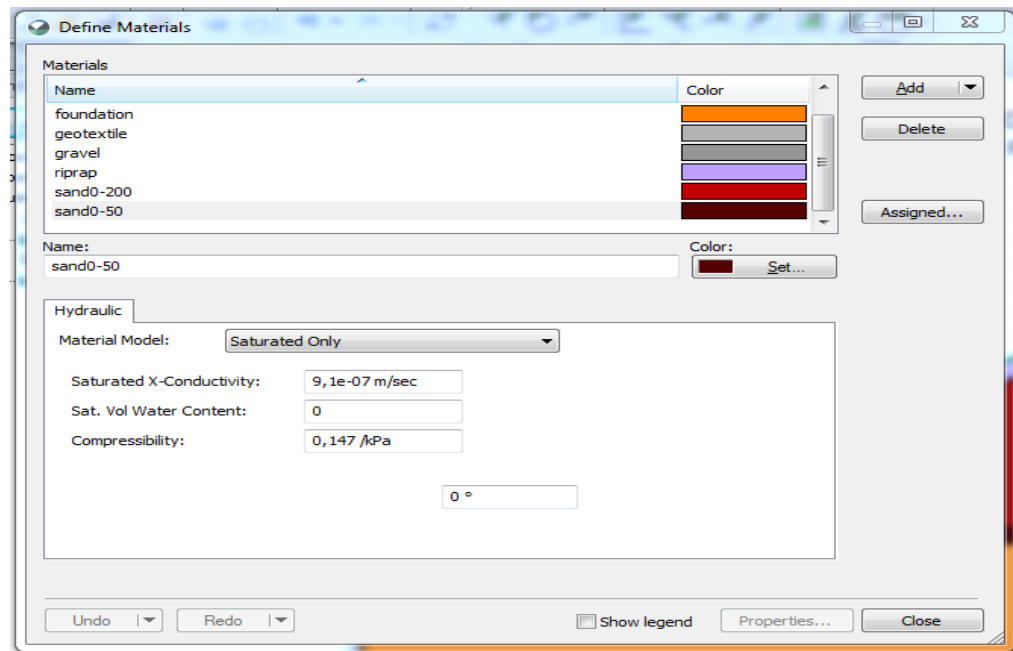


Photo III.4 : Introduction des propriétés des matériaux

Après d'entrée les données des matériaux, on a défini ces matériaux par la fenêtre : **draw materials**.

- **Modifier (Modify) :**

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

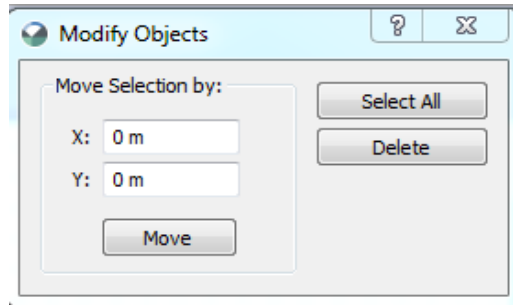


Photo III.5 : modifier des objets

- **Solutions (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 **Gestionnaire de Solutions (Solve Manager)**. Le gestionnaire de solvabilité affiche la progression de la solution, vous permettant d'annuler ou d'arrêter / redémarrer si nécessaire. [4]

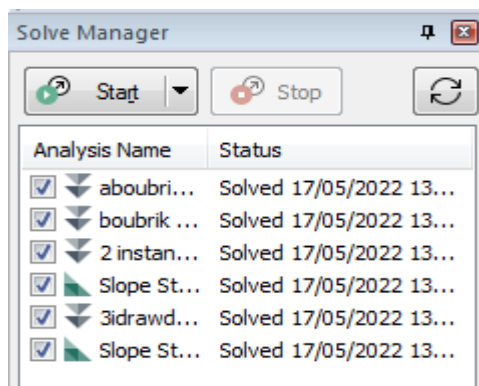


Photo III.6 : Fenêtre du gestionnaire des solutions

- **Résultats (Results) :**

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

III.6 Conclusion :

L'infiltration à travers barrage en terre est difficile à analyser en particulier des barrages avec des zones multiples par conséquent la méthode des éléments finies est le meilleur outil d'analyse des débits d'infiltration dans un barrage en terre.

En conclusion l'objectif de ce travail est d'étudier les infiltrations à travers les barrages en terre avec drain verticale, mesurer le débit de fuite à travers le corps du barrage et la fondation, et le coefficient de sécurité.

CHAPITRE IV

Simulation de l'Effet des drains sur l'infiltration et la stabilité du barrage d'EL-Haimeur et Boubrik

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre on va présenter les résultats obtenus par la simulation des infiltrations à travers les deux barrages en terre d'El-haimeur et Bou brik en prenant en compte l'influence des différents paramètres hydrauliques des matériaux constituant les digues et leurs fondations. Les résultats obtenus sont présentés sous formes des graphes et tableaux.

C'est dans l'optique de voir dans ce chapitre, une étude de stabilité a été entreprise ainsi que des études paramétriques ont été envisagées de l'influence des propriétés géométriques, mécaniques et du système de drainage.

L'analyse numérique a été faite à l'aide du logiciel Géo-Slope (Slope/W et Seep/W).

IV.2 Situation géographique :

Les barrages d'El-haimeur et Boubrik sont situés à environ 15 Km en amont de la vallée de M'zab, dans la commune de Daya ben dahoua – wilaya de Ghardaïa.



Photo IV.1 : localisation des barrages El-haimeur et Bou brik (Ghardaïa)

[Google earth 32 32'23.56"N 3°39'44.92"E]

IV.3 Climatologie :

Le climat de Ghardaïa est **subtropical désertique**, avec des hivers doux (durant lesquels il peut faire froid la nuit) et des étés très chauds et ensoleillés.

IV.3.1 Température :

À Ghardaïa, la **température moyenne** du mois le plus froid (janvier) est de 11,4 °C, celle du mois le plus chaud (juillet) est de 34,4 °C. Voici les températures moyennes. [17]

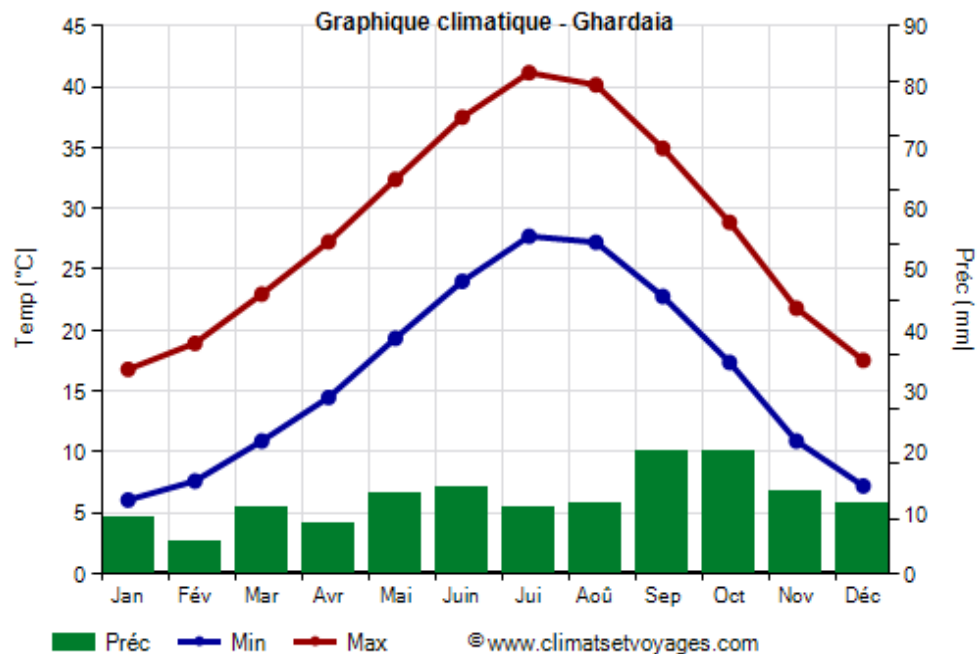


Figure IV.1 : Graphique climatique - Ghardaïa (année 2020)

IV.3.2 Précipitations :

À Ghardaïa, les **précipitations** totalisent 145 millimètres par an : elles sont donc au niveau désertique. Au mois le moins pluvieux (février) elles s'élèvent à 5 mm, dans les mois les plus pluvieux (septembre, octobre) elles s'élèvent à 20 mm. Voici la moyenne des précipitations. [17]

Tableau IV.1 : Précipitations moyennes - Ghardaïa (année 2020)

Ghardaia - Précipitations moyennes		
Mois	Quantité (mm)	Jours
Janvier	9	2
Février	5	2
Mars	11	2
Avril	8	2
Mai	13	2
Juin	14	1
Juillet	11	1
Août	12	2
Septembre	20	3
Octobre	20	2
Novembre	13	2
Décembre	11	2
An	145	23

IV.4 Géologie :

La géologie de Ghardaïa est située dans la formation calcaires massifs du turonien. Les principales formations lithologiques de la région d'étude sont :

- Les argiles du cénomanien.
- Les calcaires du turonien.
- Les alluvions grossières, souvent cimentées avec un aspect conglomératique.
- Les alluvions sablo-limoneuses. [11]

IV.5 Barrage Boubrik :

IV.5.1 Géométrie de l'ouvrage :

Le barrage de Boubrik est un barrage en terre situé sur oued El Ghrazil, d'une hauteur de 10 m et d'une longueur en crête de 878 m, il est destiné à réguler le débit de l'oued à 5 m³/s. Les dimensions de la section maximale. [12]

Tableau IV.2 : Caractéristiques géométriques de la section maximal de la digue Boubrik.

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
Cote Crête	555.4 m	Epaisseur des drains	1 m
Cote PHE	554.7 m	Epaisseur du tapis pseudo-étanche	1 m
Cote NNR	553.5 m	Epaisseur du Rip-Rap	0.8 m
Cote de terrain naturel	548.0 m	Epaisseur de la protection aval	0.5 m
Cote fond clé d'encage	544.0 m	Largeur de la berme aval	3.0 m
Largeur de crête	8.0 m	Fruit des talus de la clé d'étanchéité	1/1
Profondeur des fouilles	3.0 m		



Photo IV.2 : Photo du Barrage Boubrik

IV.5.2 Profil étudié :

La géométrie de la digue Boubrik étudiée est schématisée sur la figure IV.2 ci-dessous :

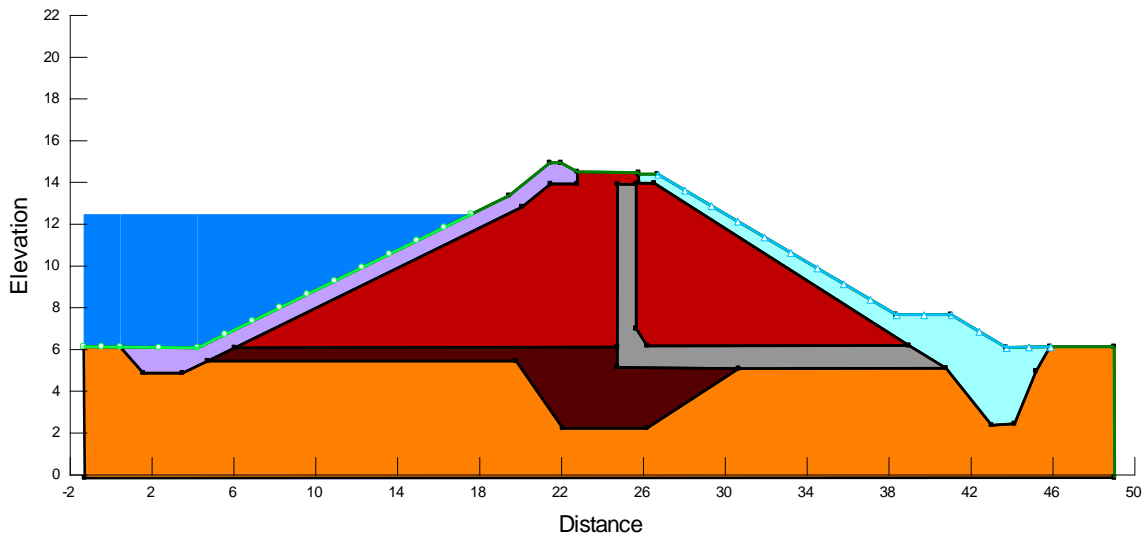


Figure IV.2 : Profil géométrique de la digue Boubrik

IV.5.3 Matériaux de construction :

Le barrage de Boubrik est constitué des 05 matériaux suivants :

- Alluvions de fondation
- Matériaux 0/50 qui constitue le tapis pseudo-étanche ainsi que la clé d'encrage
- Matériaux 0/200 qui constitue le corps de la digue
- Matériaux 3/60 qui constitue le drain vertical et le drain tapis, qui on pour rôle, l'acheminement des eaux infiltrées dans le corps de la digue vers l'extérieur
- Rip-rap et protection aval, qui on pour rôle, la protection des talus contre l'érosion. [12]

Tableau IV.3 : présente la perméabilité et teneur en eau des matériaux de construction du barrage de Bou brik

	K (m/s)	W(m ³ / m ³)	Matériau
Drain 3/8	0.01	0.16	Gravier
Remblai 0/50	9.1x10 ⁻⁷	0.147	Sable limoneux
Remblai 0/200	1.4x10 ⁻⁶	0.158	Sable limoneux
Rip-rap	0.5	0.01	Roche
Fondation	2.6x10 ⁻⁵	0.172	Sable limoneux

Les caractéristiques de ces matériaux sont les suivantes :

$$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3 , \quad c = 5 \text{ kN/m}^2 , \quad \phi = 27^\circ$$

Pour l'étude des infiltrations pour chaque matériau on doit définir la conductivité hydraulique, à titre d'exemple la conductivité de sable limoneux est introduite sous forme d'une fonction schématisée sur la figure IV.3 :

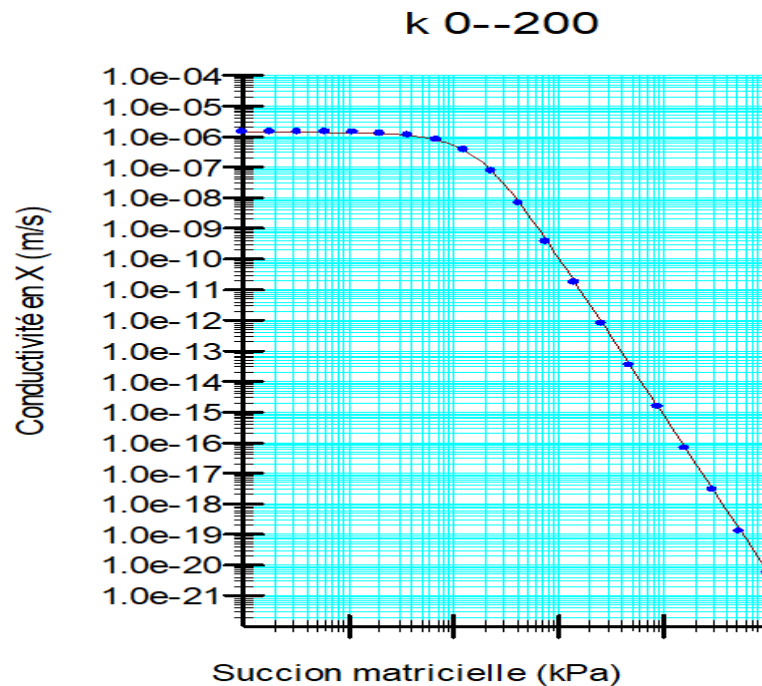


Figure IV.3 : Conductivité hydraulique de sable limoneux en fonction de la succion (Barrage Boubrik)

IV.5.4 Analyse de la stabilité en modifiant la position du drain :

IV.5.4.1 Stabilité à l'état normal :

Pour ce cas d'étude on définit une condition aux limites : Une charge hydraulique maximale sur le parement du talus amont de la retenue simulant que la retenue est pleine.

Les résultats des calculs de la stabilité hydraulique de la digue Boubrik déterminée par le module « Seep/w » du logiciel « GeoStudio » sont les suivantes :

a) Position de la ligne de saturation :

- Résultats de simulations de l'infiltration (Barrage Boubrik) :

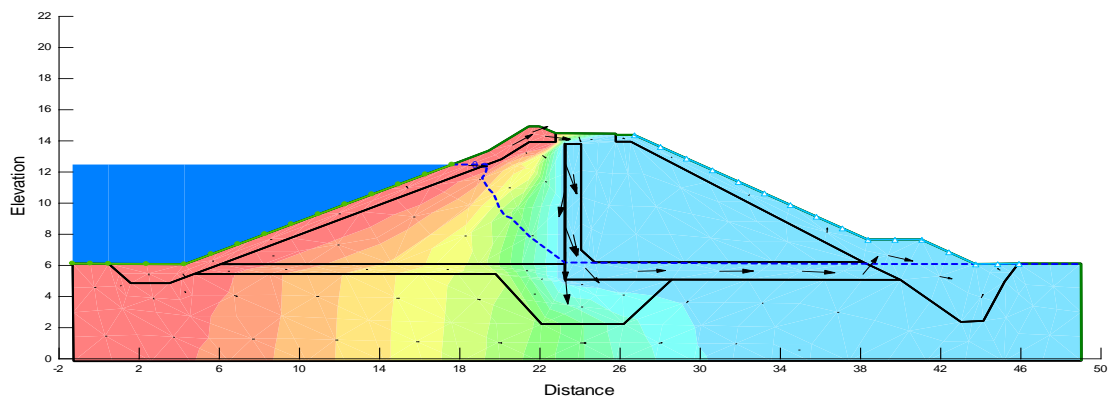


Figure IV.4 : ligne de saturation - Position 1

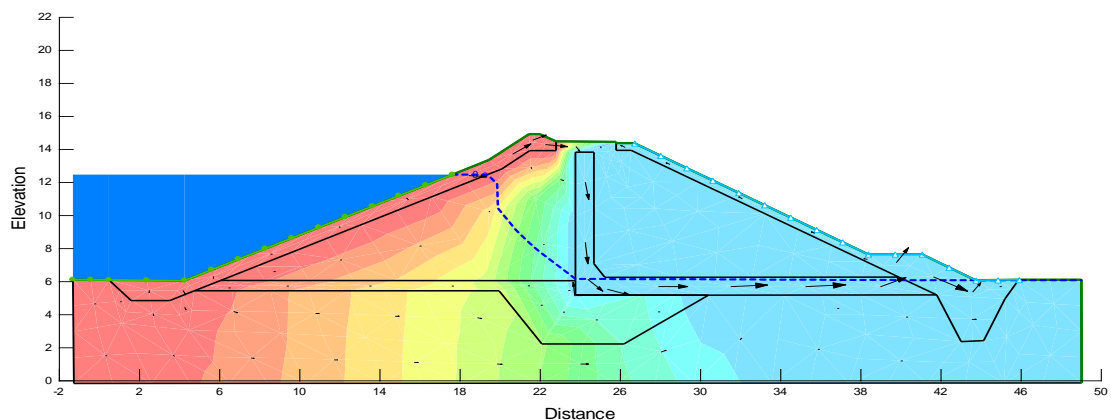


Figure IV.5 : ligne de saturation - Position 2

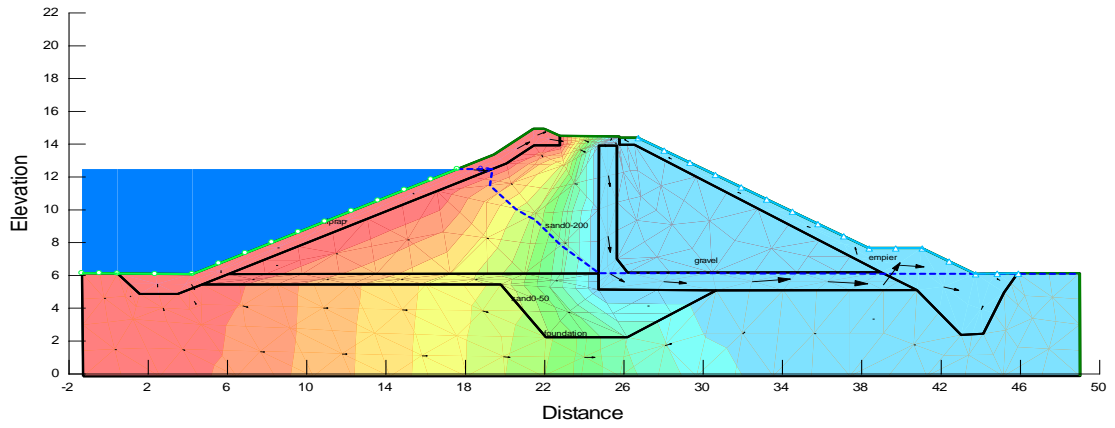


Figure IV.6 : ligne de saturation - Position 3 (position initiale)

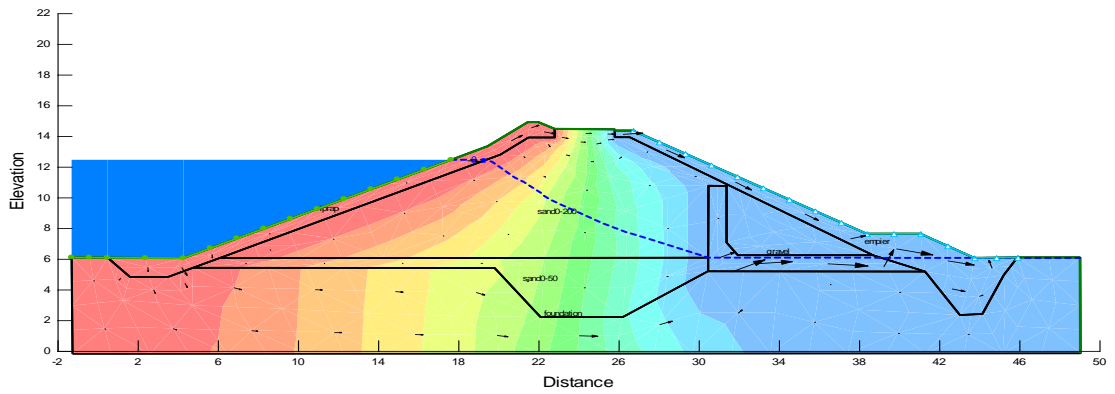


Figure IV.7 : ligne de saturation - Position 4

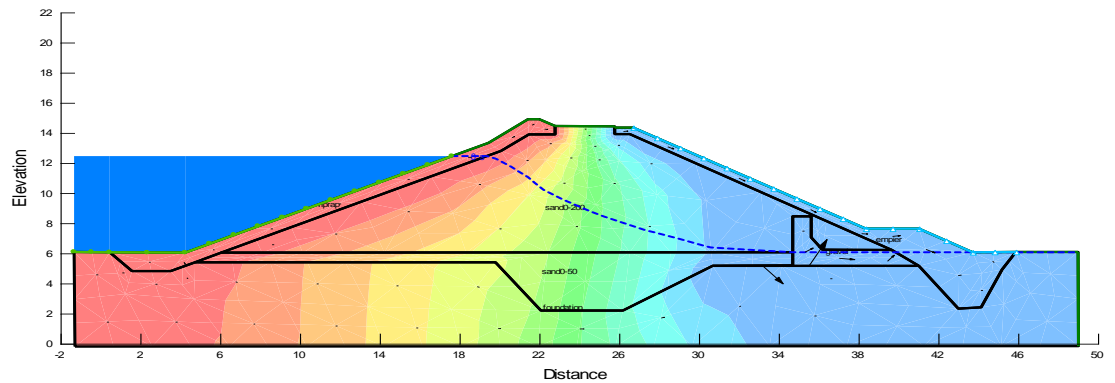


Figure IV.8 : ligne de saturation - Position 5

b) Lignes de contours des charges hydrauliques (équipotentiellles) :

- Résultats de simulations de l'infiltration (Barrage Boubrik) :

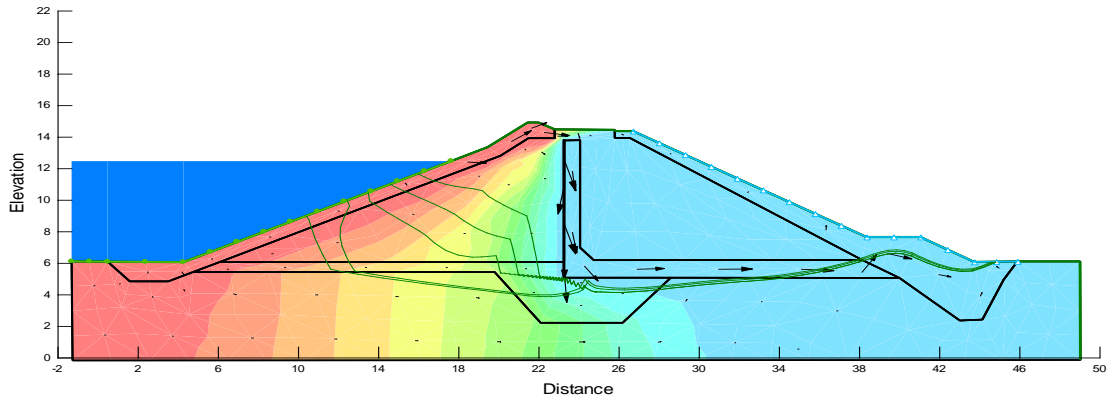


Figure IV.9 : Lignes de contours des charges hydrauliques - Position 1

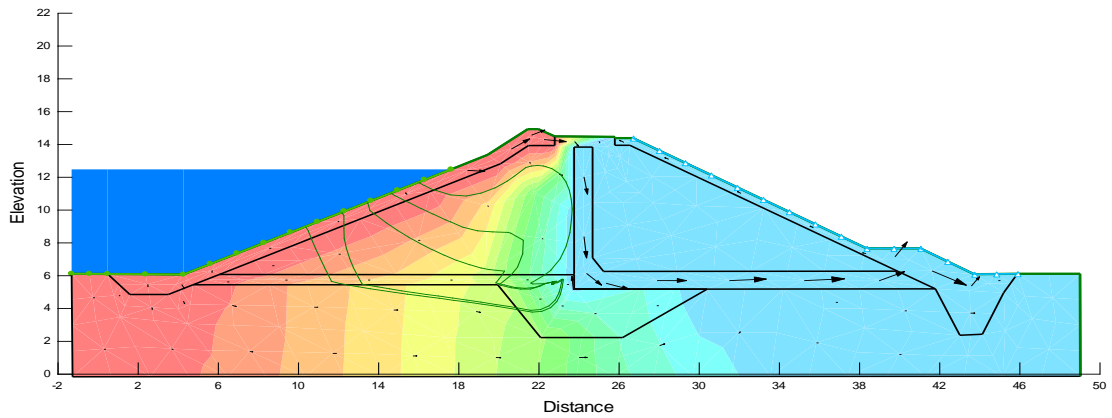


Figure IV.10 : Lignes de contours des charges hydrauliques - Position 2

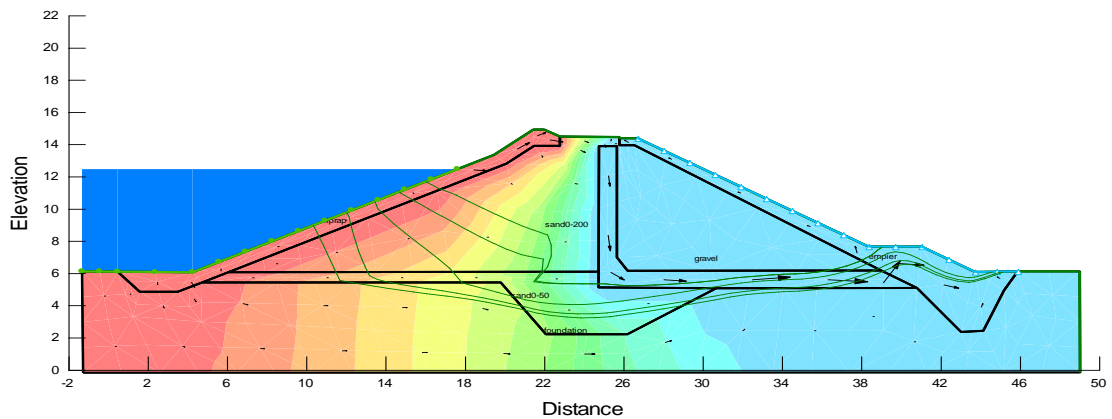


Figure IV.11 : Lignes de contours des charges hydrauliques - Position 3 (position initiale)

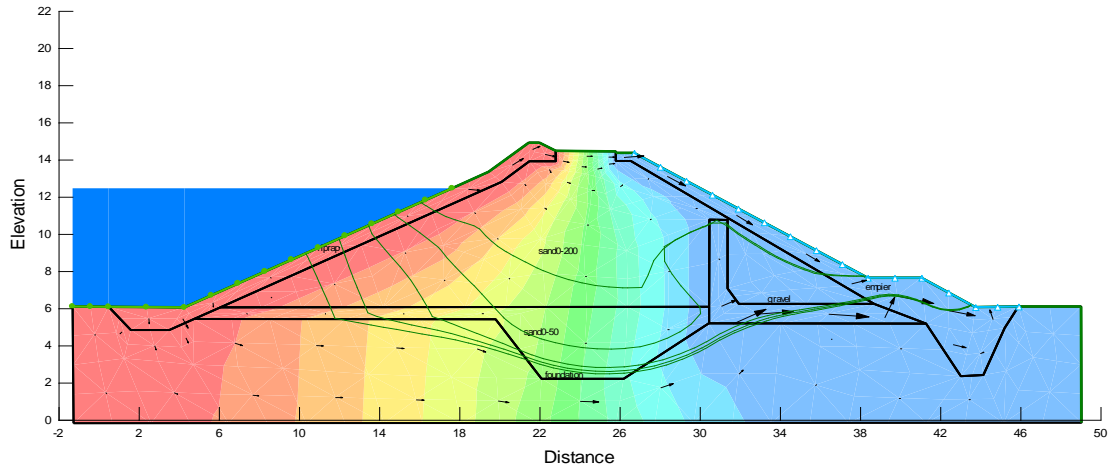


Figure IV.12 : Lignes de contours des charges hydrauliques - Position 4

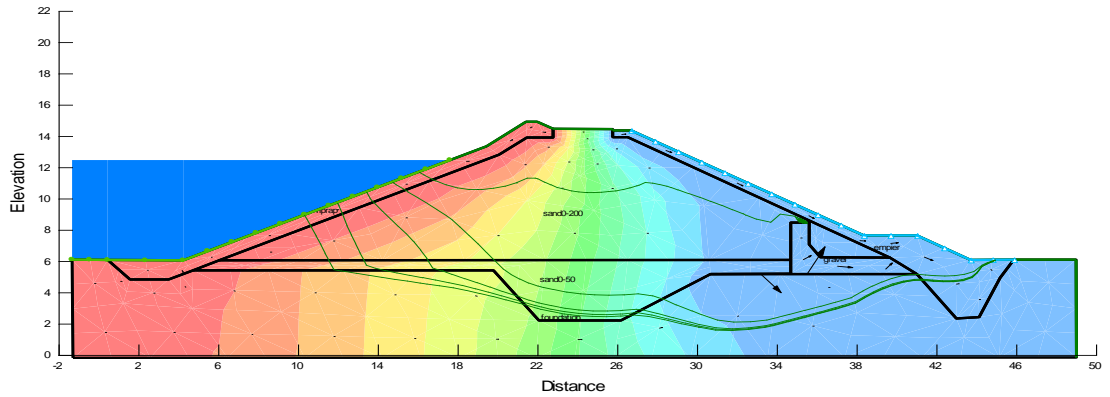


Figure IV.13 : Lignes de contours des charges hydrauliques - Position 5

c) Débit de fuite :

- Résultats de simulations de l'infiltration (Barrage Boubrik) :

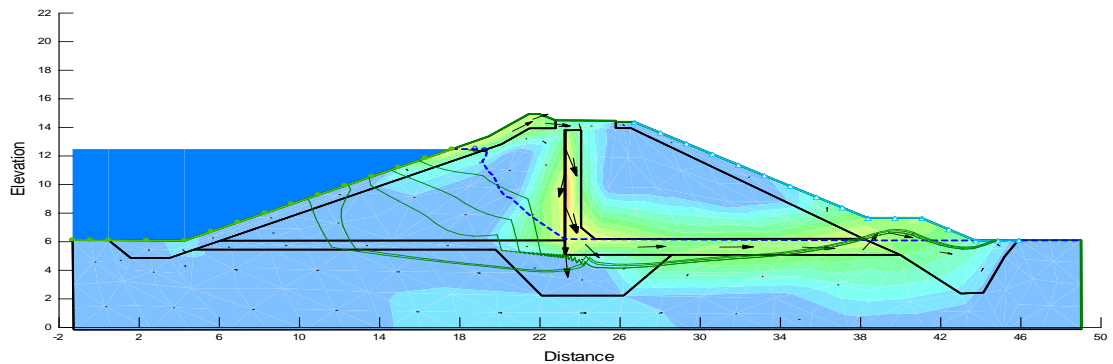


Figure IV.14 : Débit de fuite - Position 1

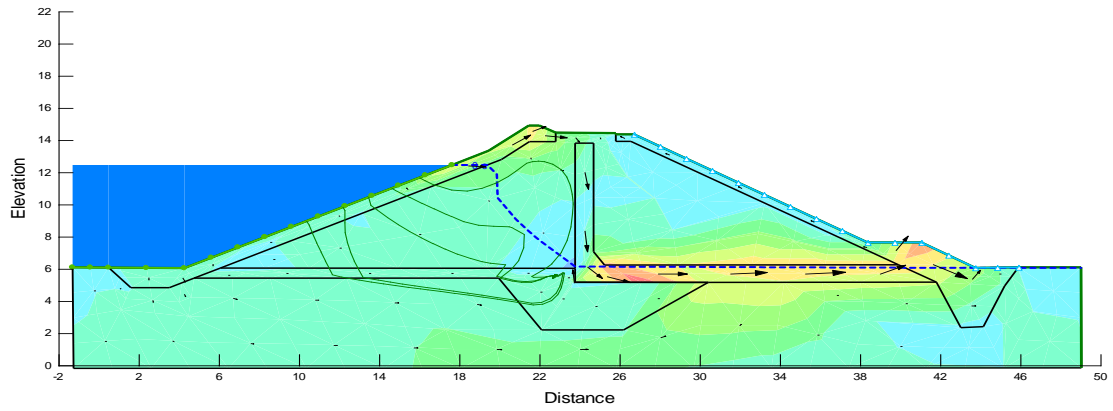


Figure IV.15 : Débit de fuite - Position 2

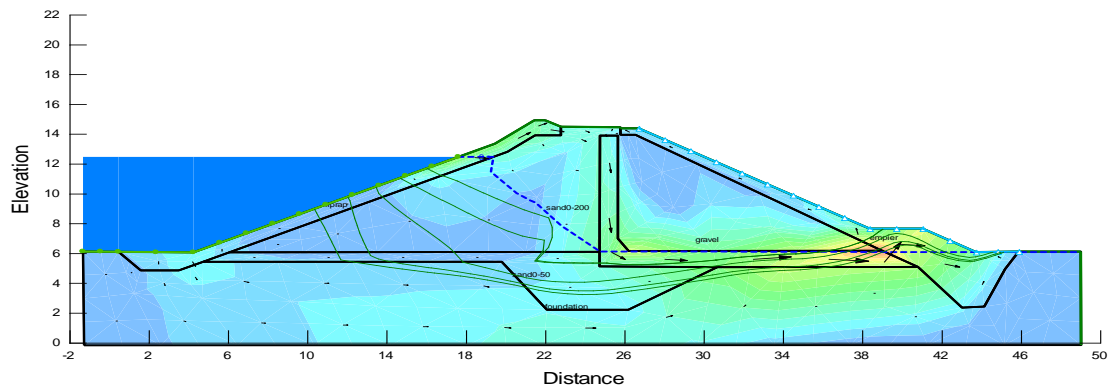


Figure IV.16 : Débit de fuite - Position 3 (position initiale)

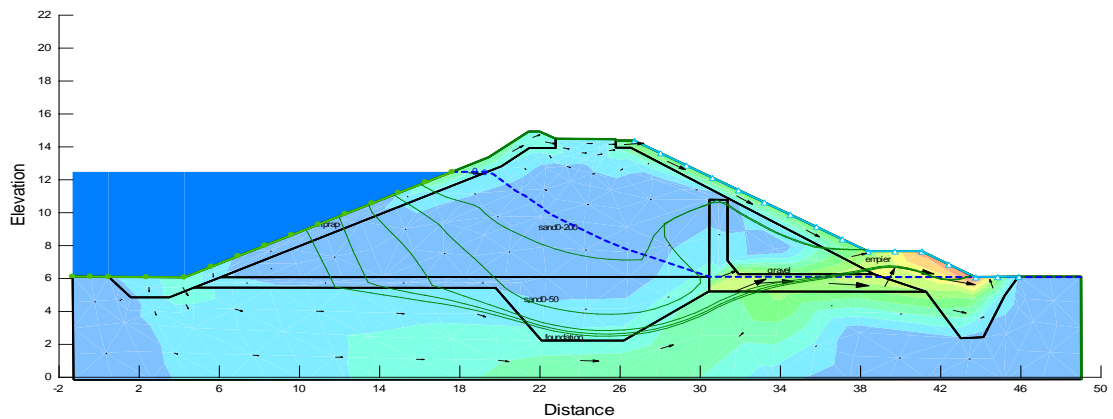


Figure IV.17 : Débit de fuite - Position 4

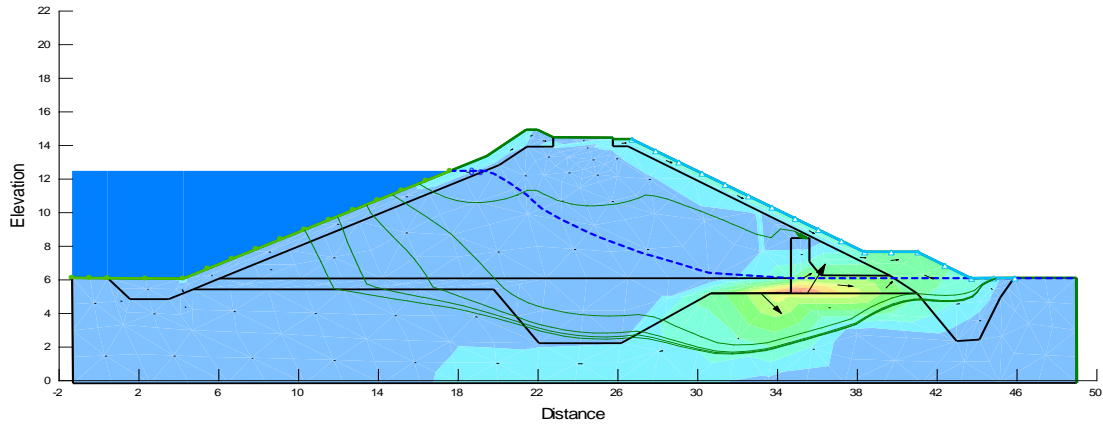


Figure IV.18 : Débit de fuite - Position 5

d) Facteur de sécurité :

Tableau IV.4 : Facteur de sécurité à l'état normal (Barrage Boubrik)

Position de drain	Longueur de tapis drain (m)	Q (m^3/s)	F _S
1	17.95	7.764×10^{-5}	2.341
2	17.07	6.718×10^{-5}	2.257
3 (position initial)	15.90	4.718×10^{-5}	2.252
4	10.82	3.602×10^{-5}	2.194
5	7.98	3.348×10^{-5}	2.108

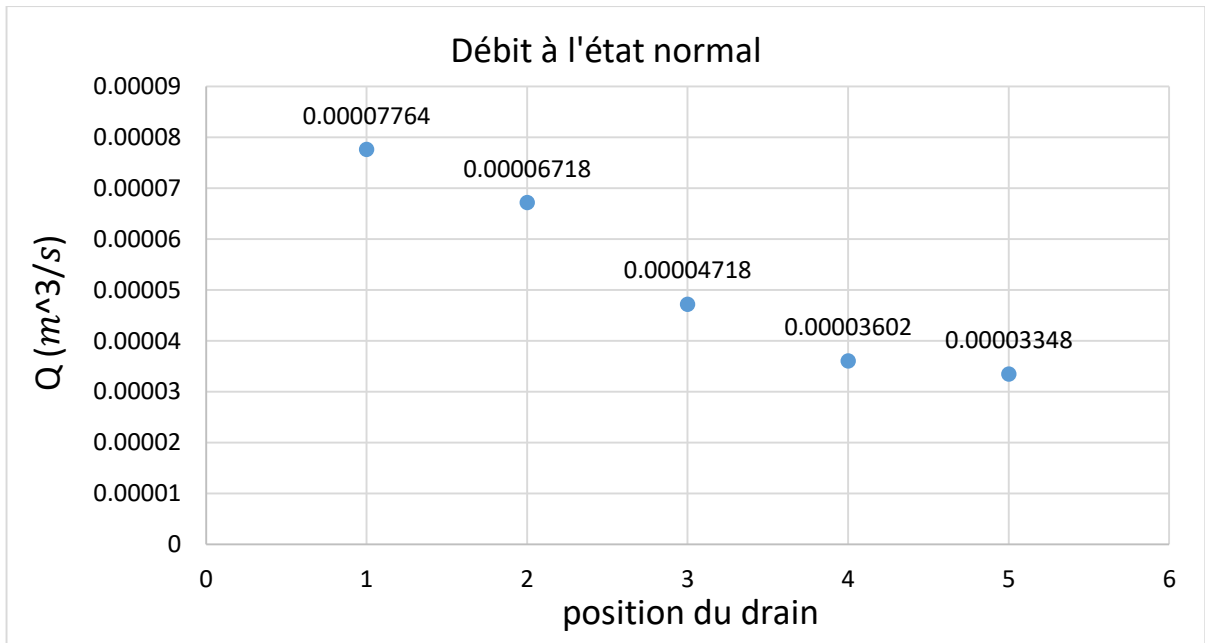


Figure IV.19 : Graphe du débit en fonction de position du drain (l'état normal)

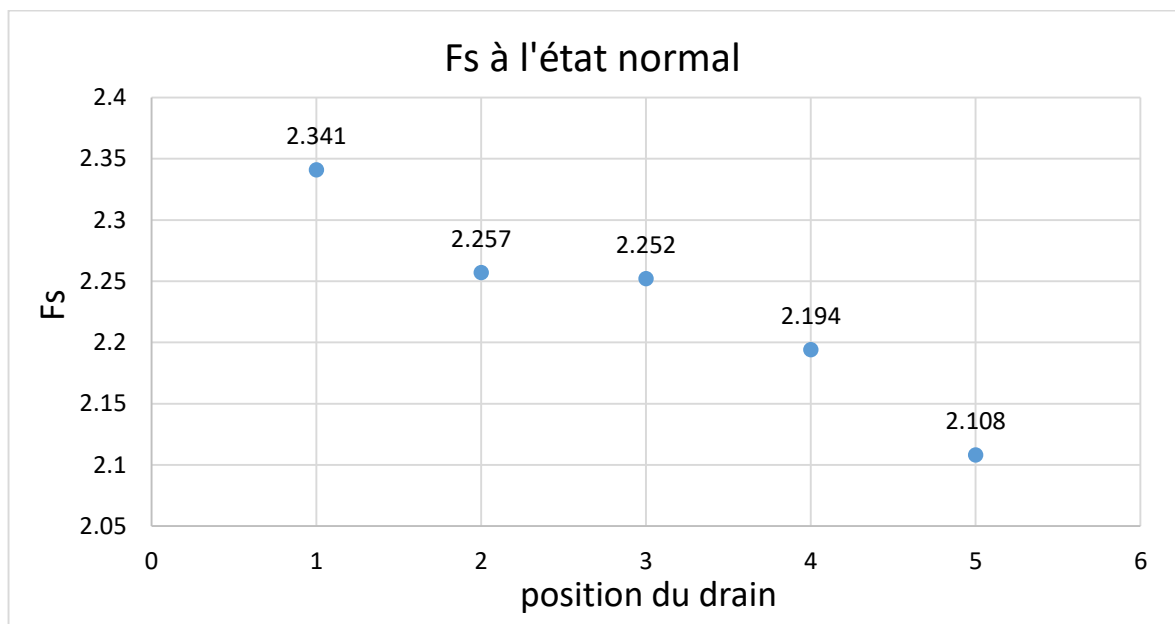


Figure IV.20 : Graphe du facteur de sécurité en fonction de position du drain (l'état normal)

Les résultats de simulations de l'infiltration montrent que la stabilité des barrages dépend de position du drain. Plus le tapis drain est long, plus le débit de fuite est élevé et plus le facteur de sécurité est élevé par petites valeurs.

IV.5.4.2 Stabilité à l'état de Vidange rapide en fonction du temps :

Une vidange est dite rapide si sa durée est inférieure ou égale à 30 jours.

L'analyse a été faite à l'aide des méthodes de l'équilibre limite, implantée dans le module « Slope/w » du logiciel « Geostudio ».

a) Vidange rapide en 30 jours :

La charge hydraulique est fonction du temps, elle passe de $h=12.46\text{m}$ vers $h=0\text{m}$ en 30 jours.

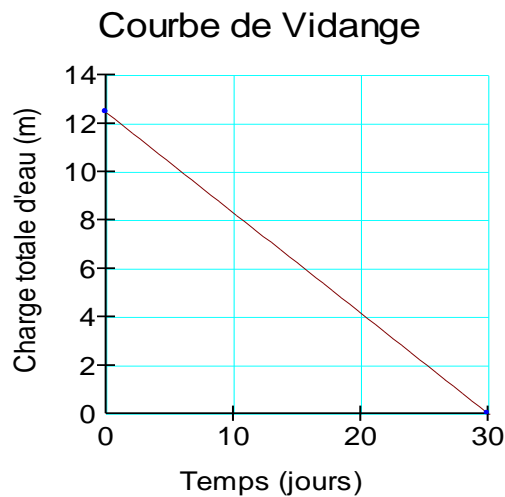


Figure IV.21 : Variation de la charge hydraulique en vidange de 30 jours (Barrage Boubrik)

Tableau IV.5 : Facteur de sécurité à l'état de vidange rapide en 30 jours (Barrage Boubrik)

Position de drain	$Q (m^3/s)$	F_S (Fin de construction)	F_S (après Vidange rapide)
1	7.764×10^{-5}	2.341	1.045
2	6.718×10^{-5}	2.257	1.126
3 (position initial)	4.718×10^{-5}	2.252	1.062
4	3.602×10^{-5}	2.194	0.969
5	3.348×10^{-5}	2.108	0.974

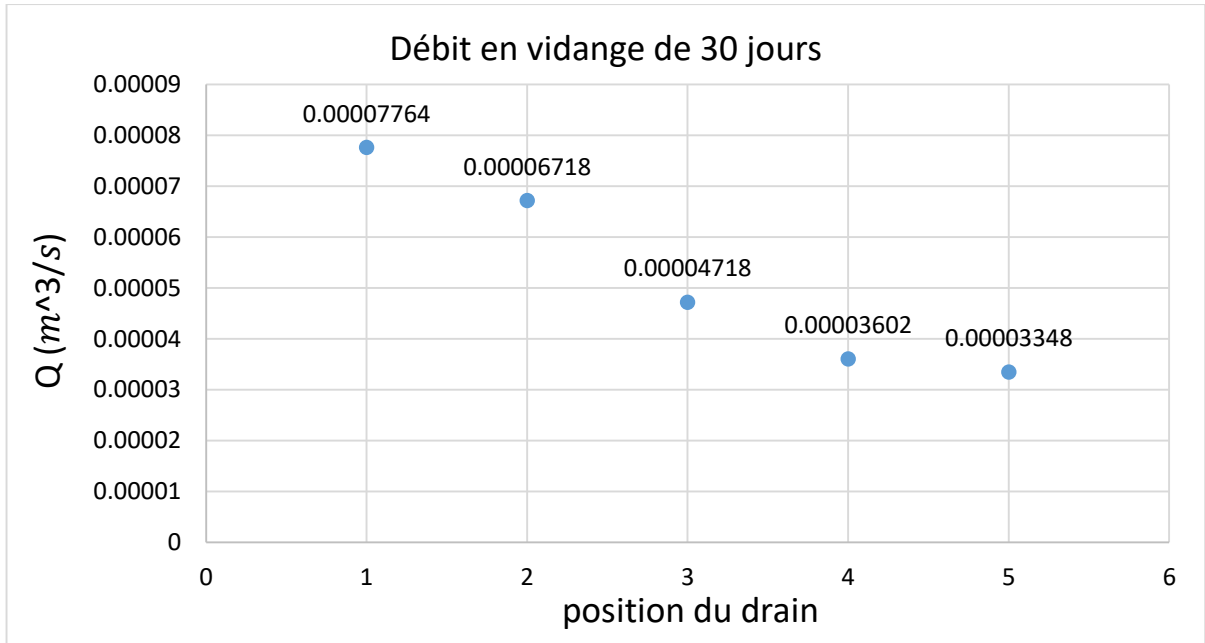


Figure IV.22 : Graphe du débit en fonction de position du drain (vidange de 30 jours)

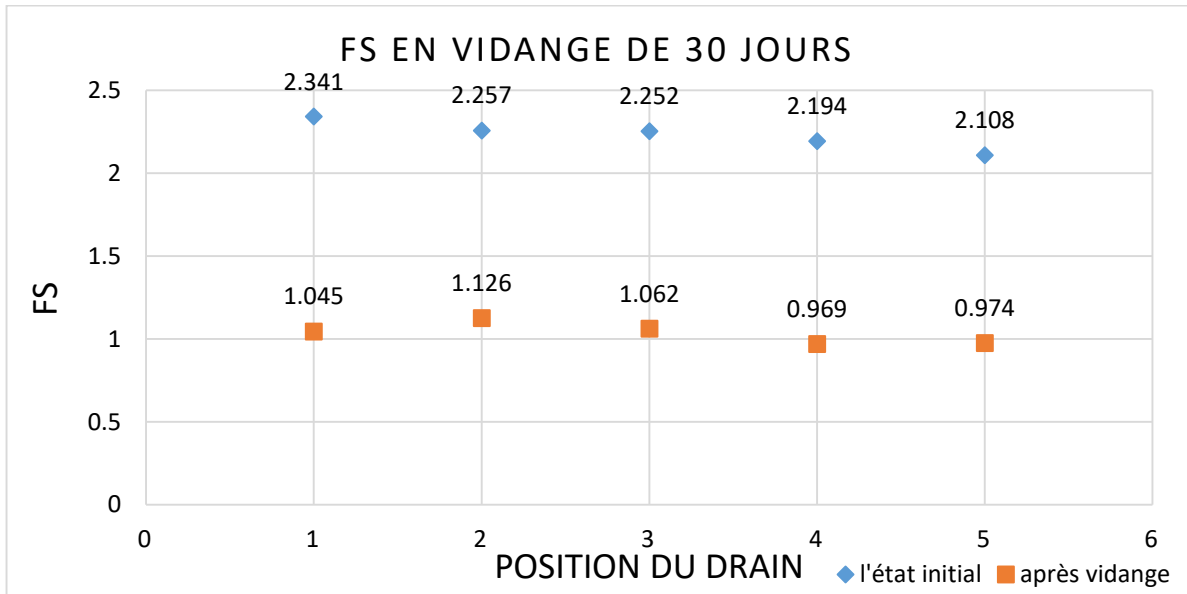


Figure IV.23 : Graphe du facteur de sécurité en fonction de position du drain (vidange de 30 jours)

La vidange rapide causé un rabattement de facteur de sécurité, et cela menace l'instabilité du barrage.

b) Vidange rapide en 5 jours :

La charge hydraulique est fonction du temps, elle passe de $h=12.46\text{m}$ vers $h=0\text{m}$ en 5 jours.

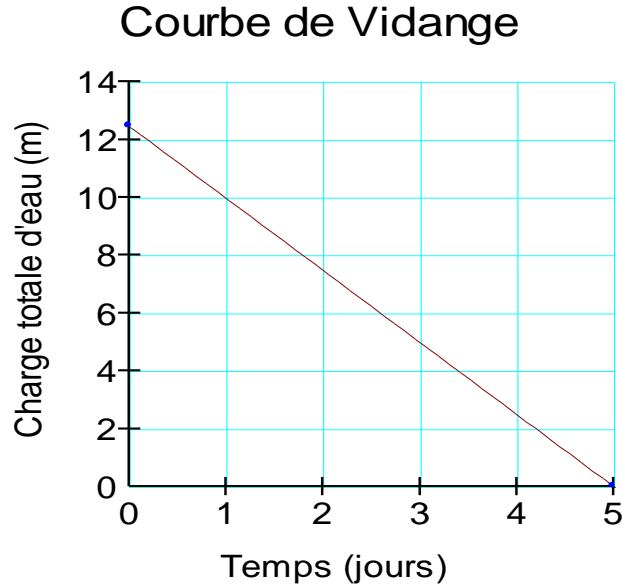


Figure IV.24 : Variation de la charge hydraulique en vidange de 5 jours (Barrage Boubrik)

Tableau IV.6 : Facteur de sécurité à l'état de vidange rapide en 5 jours (Barrage Boubrik)

Position de drain	$Q (m^3/s)$	F_S (Fin de construction)	F_S (après Vidange rapide)
1	7.764×10^{-5}	2.341	0.647
2	6.718×10^{-5}	2.257	0.825
3 (position initial)	4.718×10^{-5}	2.252	0.723
4	3.602×10^{-5}	2.194	0.527
5	3.348×10^{-5}	2.108	0.842

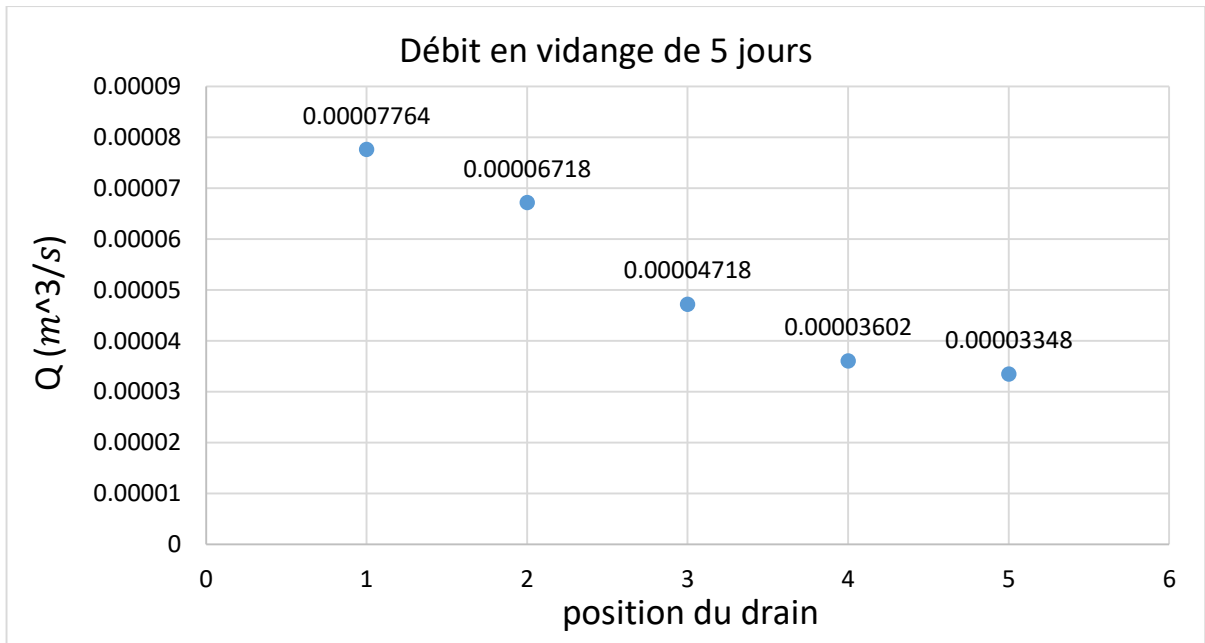


Figure IV.25 : Graphe du débit en fonction de position du drain (vidange de 5 jours)

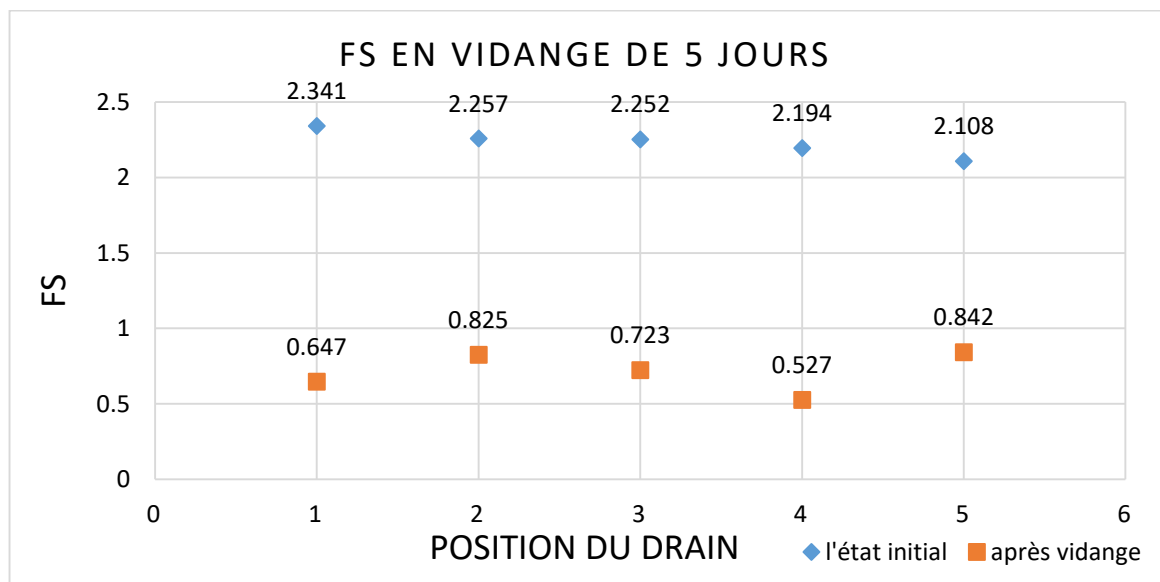


Figure IV.26: Graphe du facteur de sécurité en fonction de position du drain (vidange de 5 jours)

La vidange rapide causé un rabattement de facteur de sécurité, et cela menace l'instabilité du barrage. Le facteur de sécurité après vidange de 5 jours est moins par rapport une vidange de 30 jours.

IV.6 Barrage d'El-haimeur :

IV.6.1 Géométrie de l'ouvrage :

La digue d'El haimeur est une digue en alluvion drainé situé sur oued LAADIRA, d'une hauteur de 22m et d'une longueur en crête de 430m, elle est destinée à réguler le débit des crues à 20 m³/s au maximum. [12]

Tableau IV.7 : Caractéristiques géométriques de la section maximale de la digue El-haimeur

Paramètre	Valeur	Paramètre	valeur
Cote Crête	562.6 m	Epaisseur de la protection	0.5 m
Cote PHE	561.6 m	Profondeur de la clé d'étanchéité	4.0 m
Cote NNR	559.8 m	Largeur de base de la clé d'étanchéité	5.0 m
Cote de terrain naturel	543.5 m	Fruit des talus de la clé d'étanchéité	1/1
Cote du fond	540.5 m	Profondeur de la tranchée drainante	5.0 m
Largeur de crête	8.0 m	Largeur de base de la tranchée drainante	1.5 m
Profondeur des fouilles	3.0 m	Fruit des talus de la tranchée	0.5/1
Epaisseur des drains	1.0 m		



Photo IV.3 : photo du Barrage El-Haimeur

IV.6.2 Profil étudié :

La géométrie de la digue El-Haimeur étudiée est schématisée sur la figure IV.15 ci-dessous :

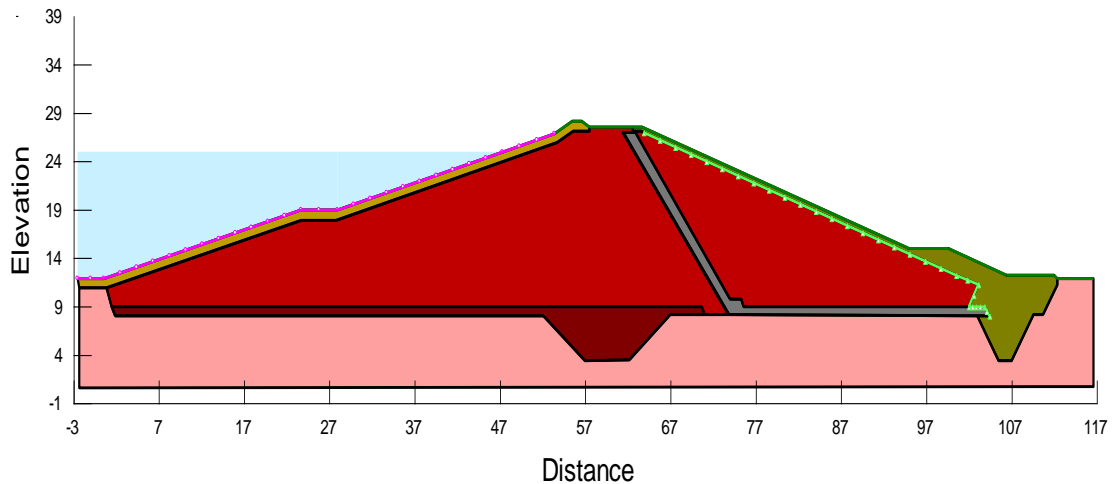


Figure IV.27 : Profil géométrique de la digue El-Haimeur

IV.6.3 Matériaux de construction :

La digue El-haimeur sera constituée de quatre matériaux de construction qui sont les suivants :

- Matériaux 0/50 constituant le tapis pseudo-étanche ainsi que la clé d'encrage
- Matériaux 0/200 qui constituent le corps de la digue
- Matériaux 3/60 qui constituent le drain vertical et le drain tapis, obtenus des alluvions grossières criblés, qui ont pour rôle l'acheminement des eaux infiltrées dans le corps de la digue vers l'extérieur
- L'enrochement de protection amont et aval, extrait de la roche calcaire, qui protège les talus contre l'érosion. [12]

Tableau IV.8 : présente la perméabilité et teneur en eau des matériaux de construction du barrage d'El-haimeur

	K (m/s)	W(m ³ / m ³)	Matériau
Drain 3/8	0.003	0.01	Gravier
Drain 3/60	0.003	0.01	Gravier
Remblai 0/50	7.7x10 ⁻⁷	0.14	Sable limoneux
Remblai 0/200	1.3x10 ⁻⁶	0.143	Sable limoneux
Rip-rap	0.5	0.1	Roche
Fondation	3.4x10 ⁻⁵	0.143	Sable limoneux

Les caractéristiques de ces matériaux sont les suivantes :

$$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3 , \quad c = 5 \text{ kN/m}^2 , \quad \varphi = 27^\circ$$

Pour l'étude des infiltrations pour chaque matériau on doit définir la conductivité hydraulique, à titre d'exemple la conductivité de sable limoneux est introduite sous forme d'une fonction schématisée sur la figure IV.16 :

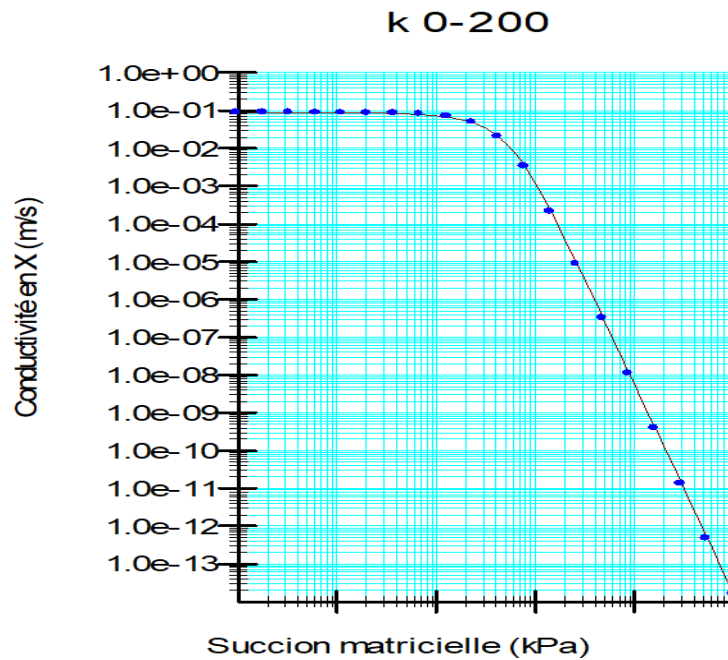


Figure IV.28 : Conductivité hydraulique de sable limoneux en fonction de la succion (Barrage El-Haimeur)

IV.6.4 Analyse de la stabilité en modifiant la position du drain :

IV.6.4.1 Stabilité à l'état normal :

Pour ce cas d'étude on définit une condition aux limites : Une charge hydraulique maximale sur le parement du talus amont de la retenue simulant que la retenue est pleine.

Les résultats des calculs de la stabilité hydraulique de la digue El-haimeur déterminée par le module « Seep/w » du logiciel « GeoStudio » sont les suivantes :

a) Position de la ligne de saturation :

- Résultats de simulations de l'infiltration (barrage El-haimeur) :

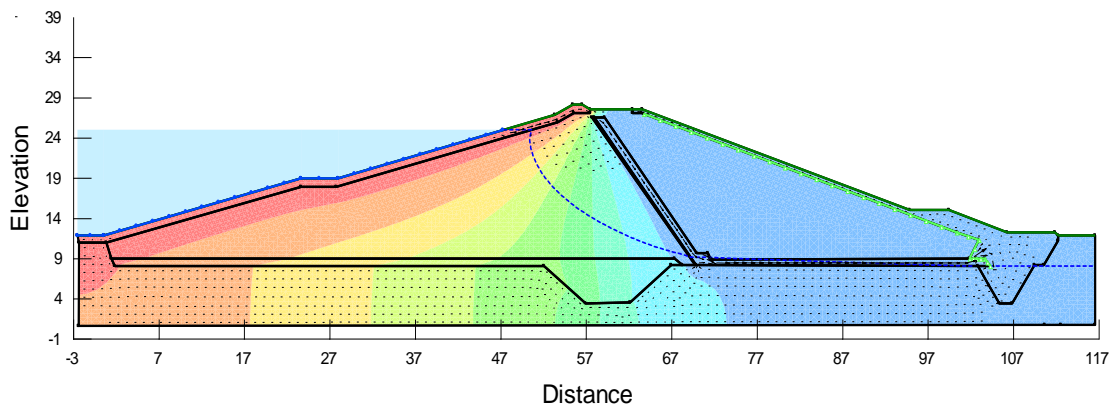


Figure IV.29 : ligne de saturation - Position 1

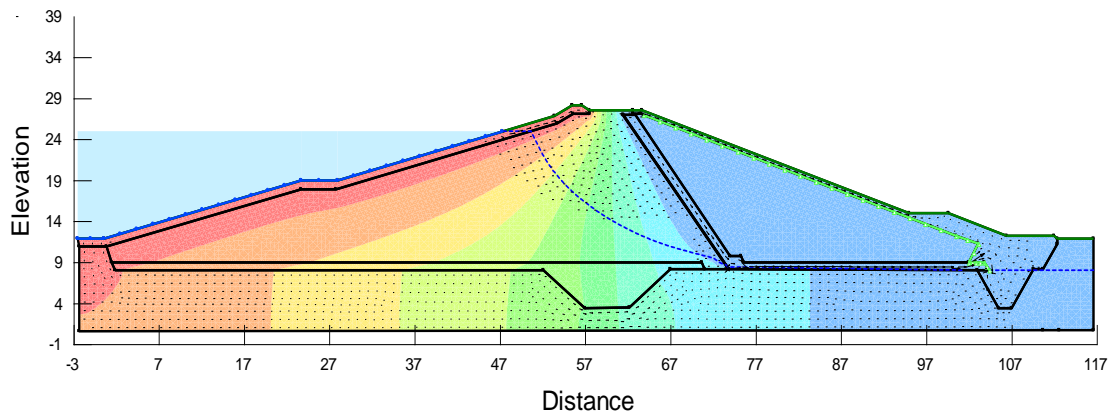


Figure IV.30 : ligne de saturation - Position 2 (position initiale)

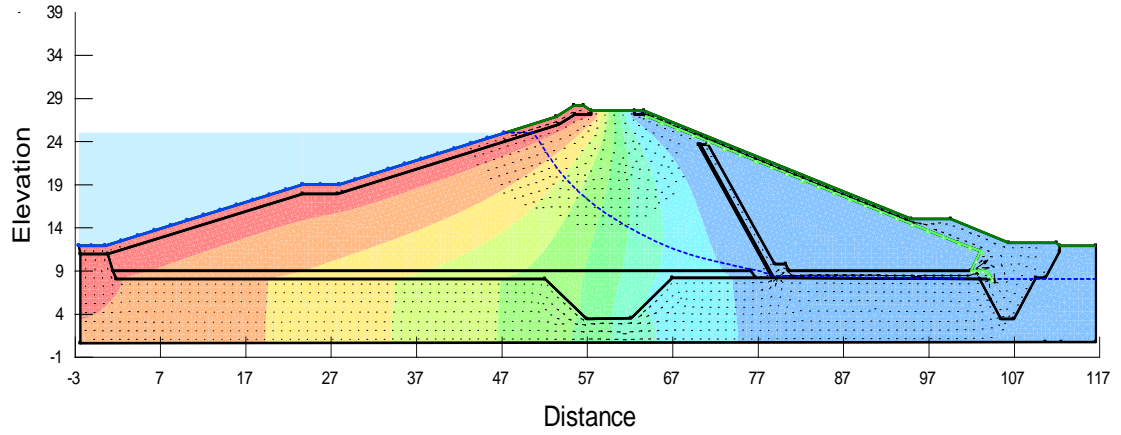


Figure IV.31 : ligne de saturation - Position 3

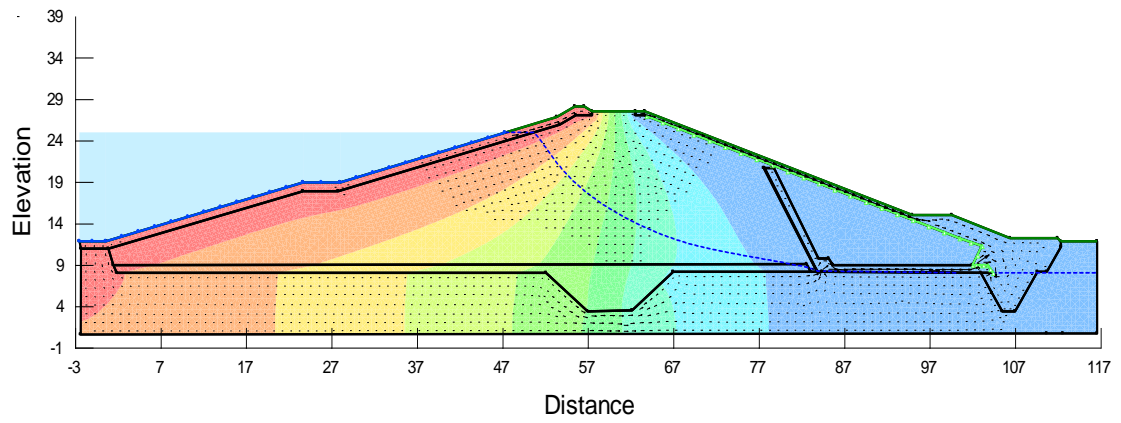


Figure IV.32 : ligne de saturation - Position 4

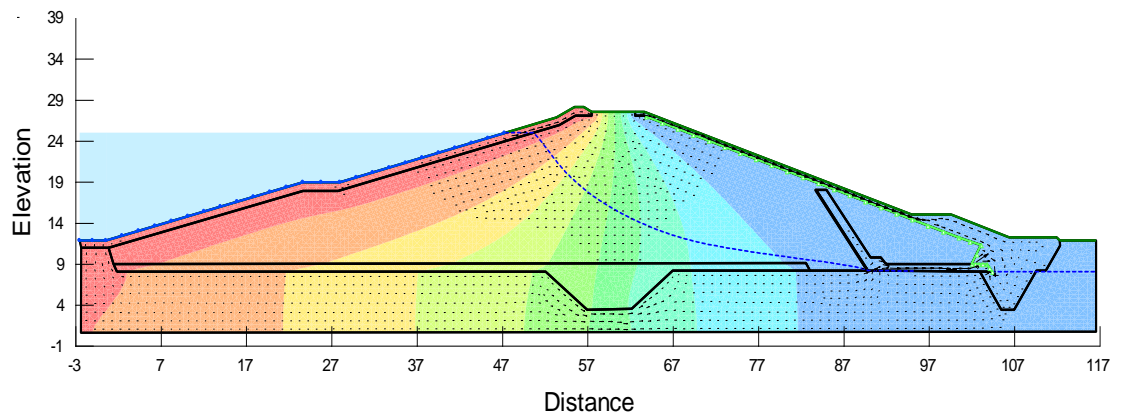


Figure IV.33 : ligne de saturation - Position 5

b) Lignes de contours des charges hydrauliques (équipotentielles) :

- Résultats de simulations de l'infiltration (barrage El-haimeur) :

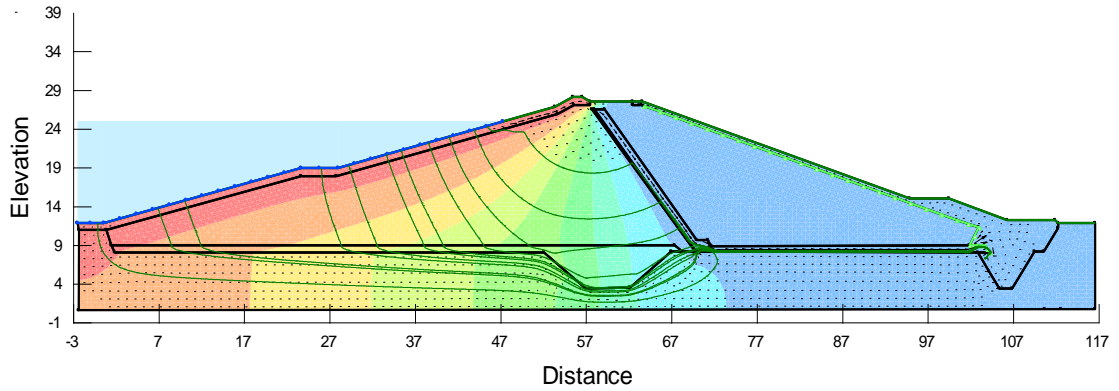


Figure IV.34 : Lignes de contours des charges hydrauliques - Position 1

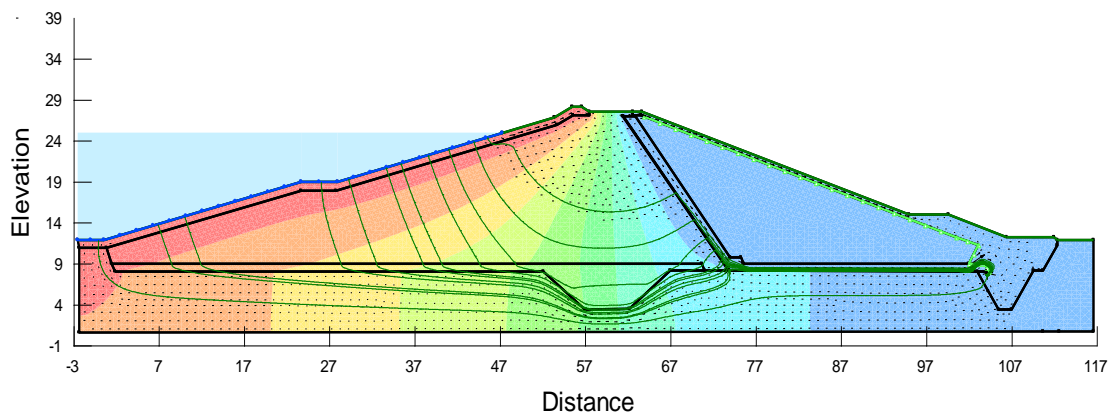


Figure IV.35 : Lignes de contours des charges hydrauliques - Position 2 (position initiale)

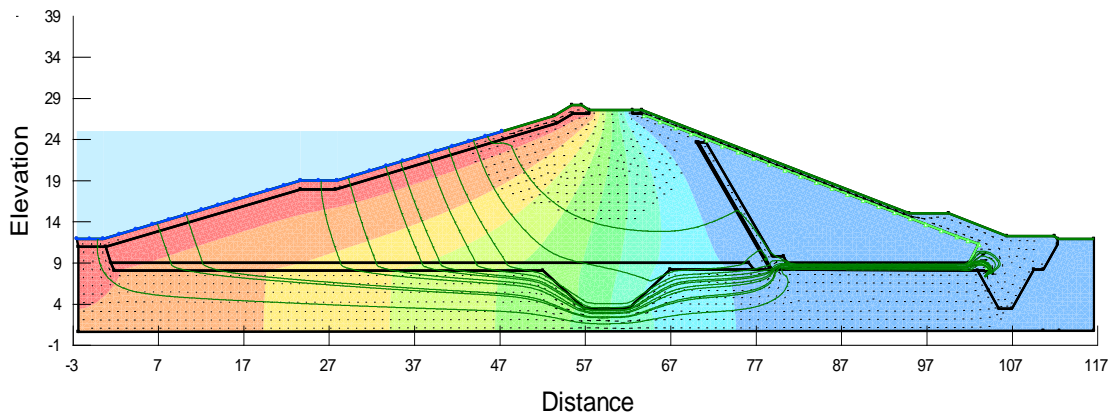


Figure IV.36 : Lignes de contours des charges hydrauliques - Position 3

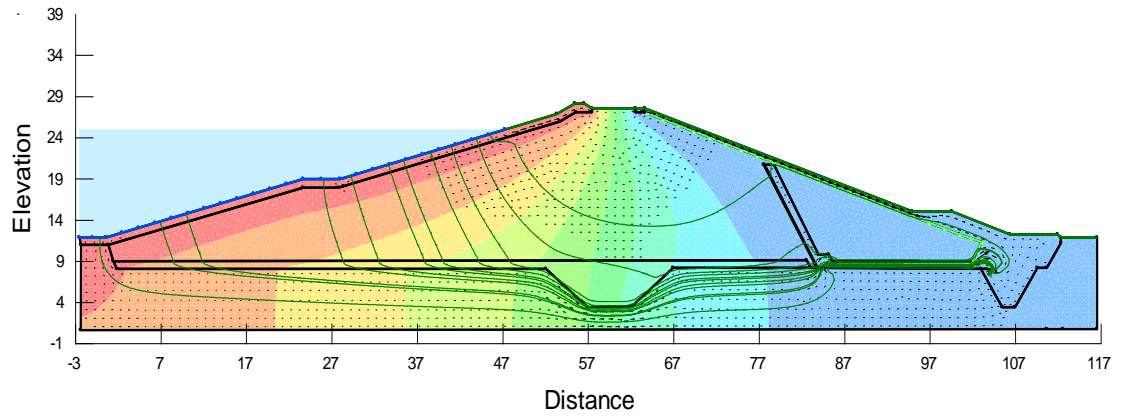


Figure IV.37 : Lignes de contours des charges hydrauliques - Position 4

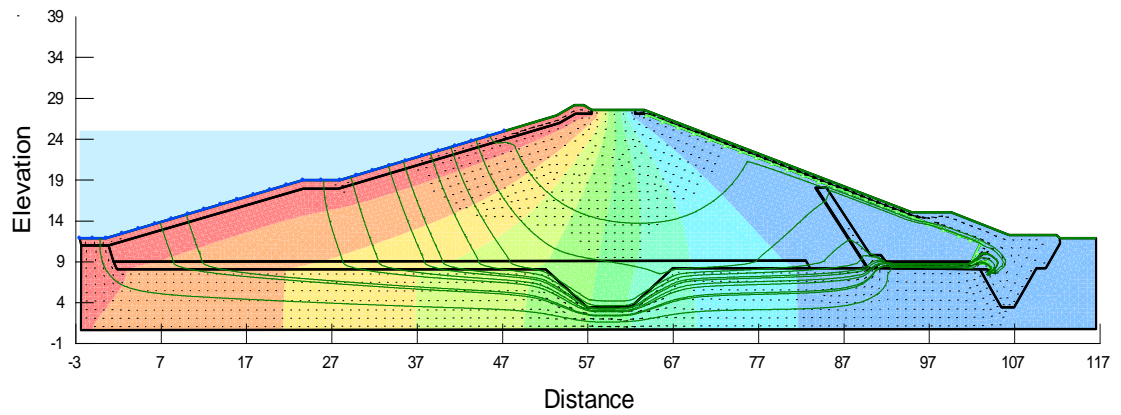


Figure IV.38 : Lignes de contours des charges hydrauliques - Position 5

c) Débit de fuite :

- Résultats de simulations de l'infiltration (barrage El-haimeur) :

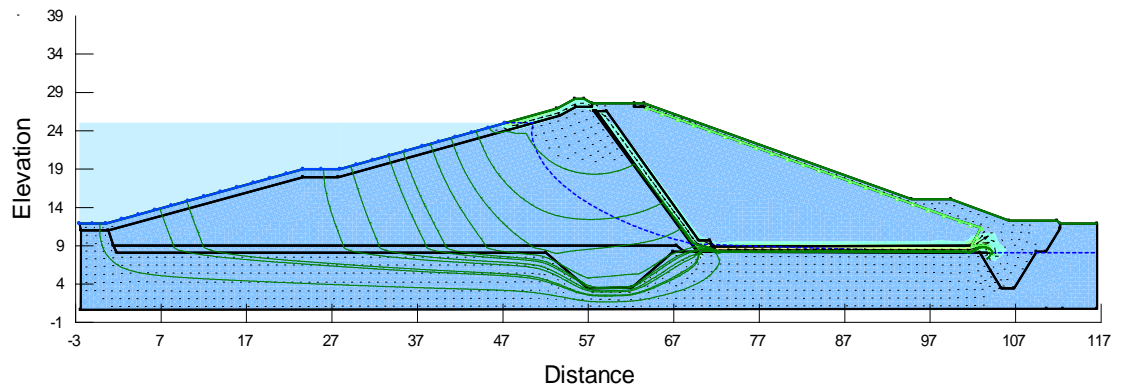


Figure IV.39 : Débit de fuite - Position 1

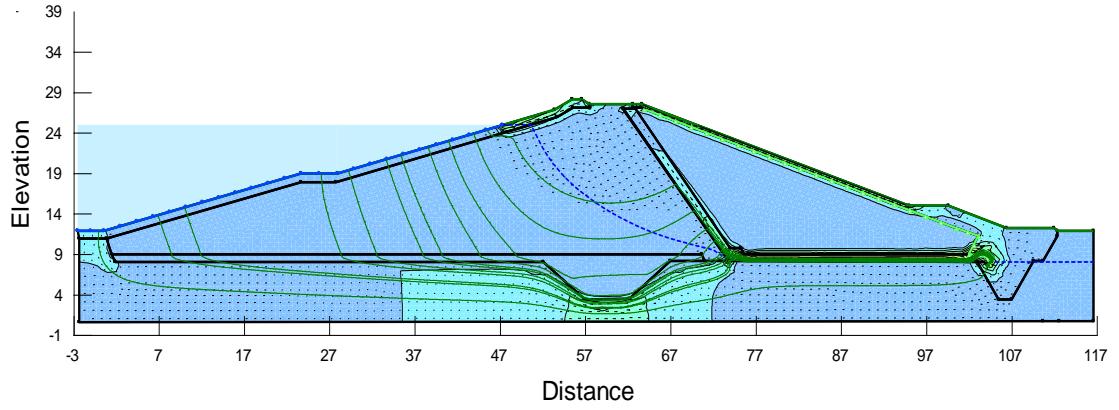


Figure IV.40 : Débit de fuite - Position 2 (position initiale)

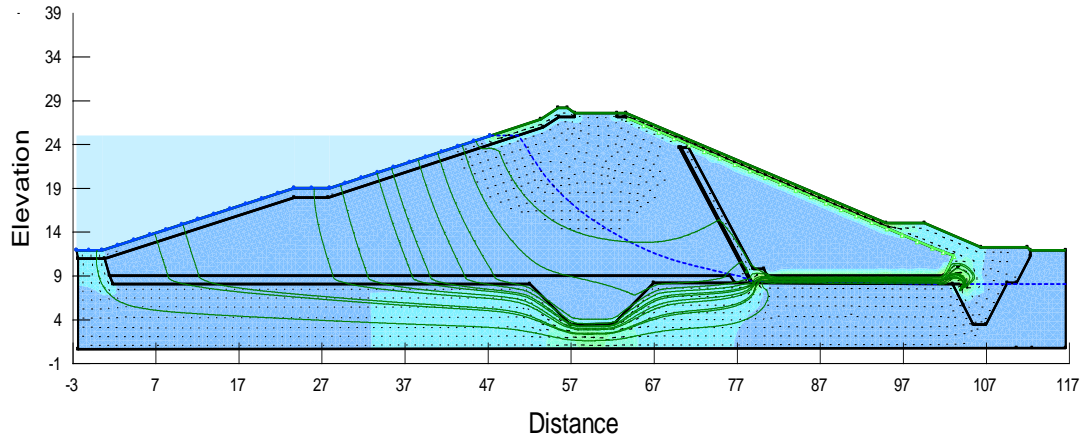


Figure IV.41 : Débit de fuite - Position 3

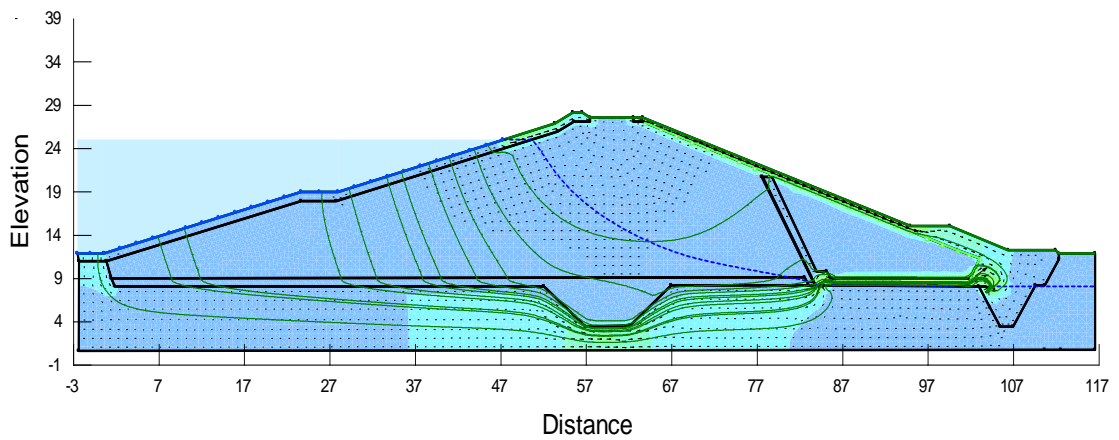


Figure IV.42 : Débit de fuite - Position 4

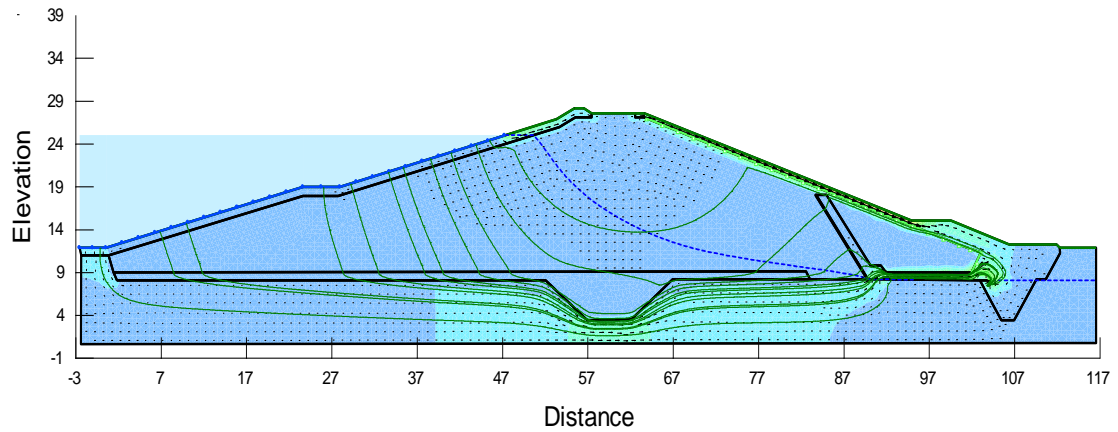


Figure IV.43 : Débit de fuite - Position 5

d) Facteur de sécurité :

Tableau IV.9 : Facteur de sécurité à l'état normal (Barrage El-Haimeur)

Position de drain	Longueur de tapis drain (m)	Q (m^3/s)	F _S
1	34.4	2.807×10^{-5}	2.095
2 (position initial)	31	2.027×10^{-5}	2.073
3	25.5	1.910×10^{-5}	2.071
4	16.5	1.833×10^{-5}	2.069
5	14.5	1.777×10^{-5}	2.067

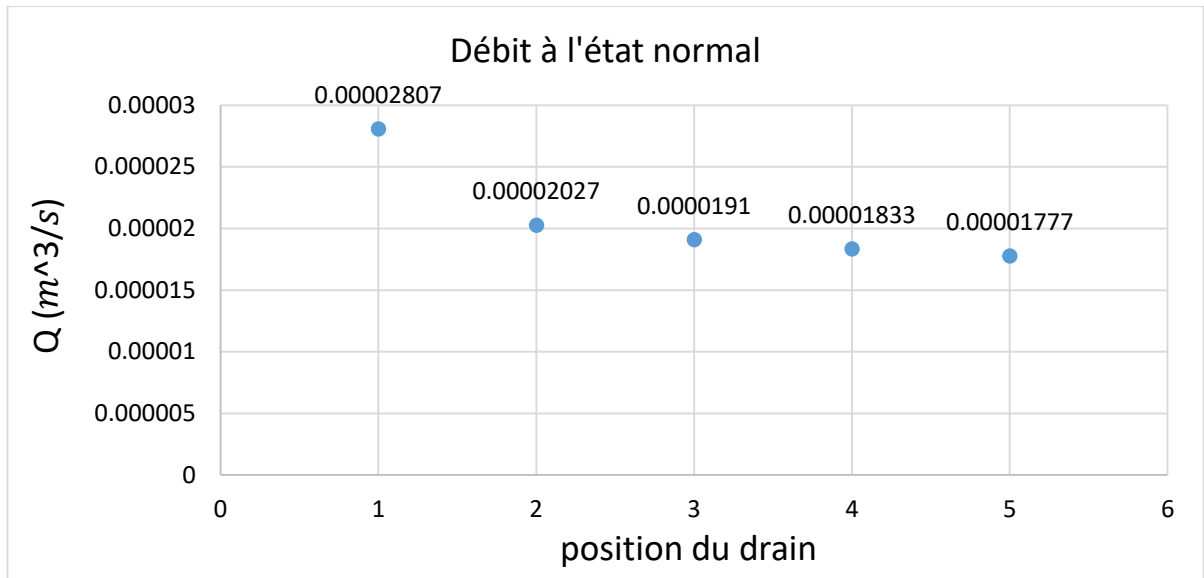


Figure IV.44 : Graphe du débit en fonction de position du drain (l'état normal)

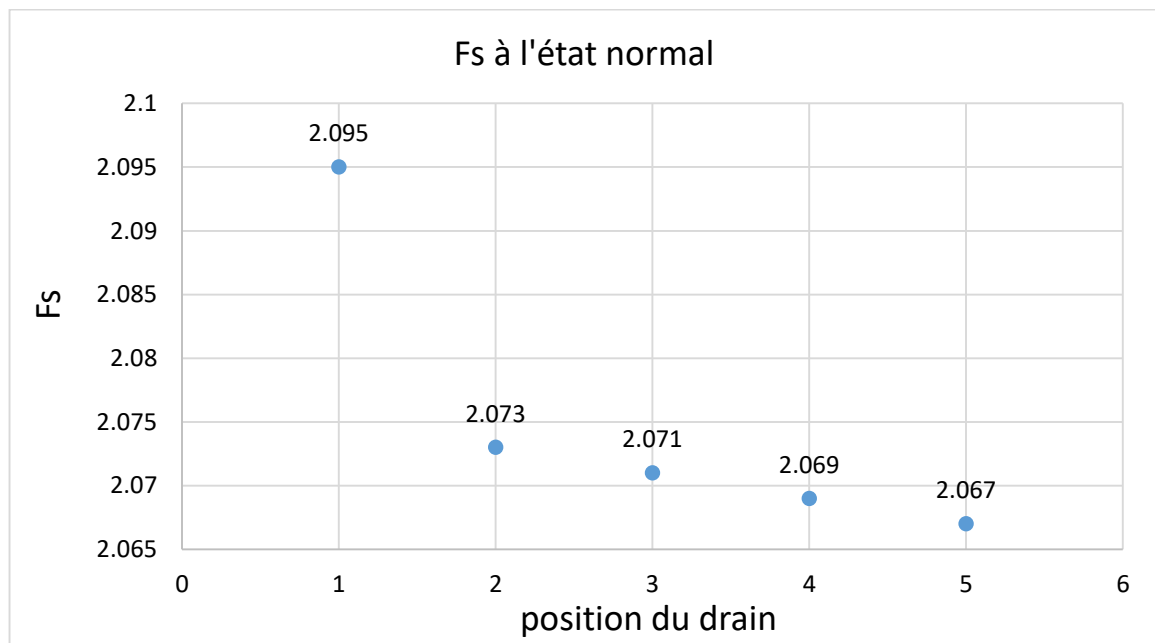


Figure IV.45 : Graphe du facteur de sécurité en fonction de position du drain (l'état normal)

Les résultats de simulations de l'infiltration montrent que la stabilité des barrages dépend de position du drain. Plus le tapis drain est long, plus le débit de fuite est élevé et plus le facteur de sécurité est élevé par petites valeurs.

IV.6.4.2 Stabilité à l'état de Vidange rapide en fonction du temps :

Une vidange est dite rapide si sa durée est inférieure ou égale à 30 jours.

L'analyse a été faite à l'aide des méthodes de l'équilibre limite, implantée dans le module « Slope/w » du logiciel « Geostudio ».

a) Vidange rapide en 30 jours :

La charge hydraulique est fonction du temps, elle passe de $h=24.97\text{m}$ vers $h=0\text{m}$ en 30 jours.

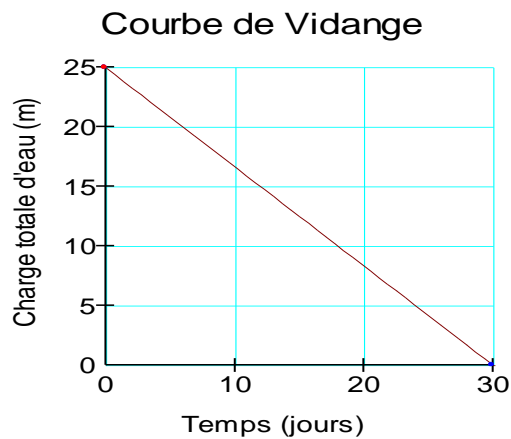


Figure IV.46 : Variation de la charge hydraulique en vidange de 30 jours (Barrage El-Haimeur)

Tableau IV.10 : Facteur de sécurité à l'état de vidange rapide en 30 jours (Barrage El-Haimeur)

Position de drain	Q (m^3/s)	F_S (Fin de construction)	F_S (après Vidange rapide)
1	0.000107	3.122	0.418
2 (position initial)	7.726×10^{-5}	2.904	0.371
3	7.236×10^{-5}	2.871	0.308
4	6.988×10^{-5}	2.847	0.331
5	6.774×10^{-5}	2.828	0.400

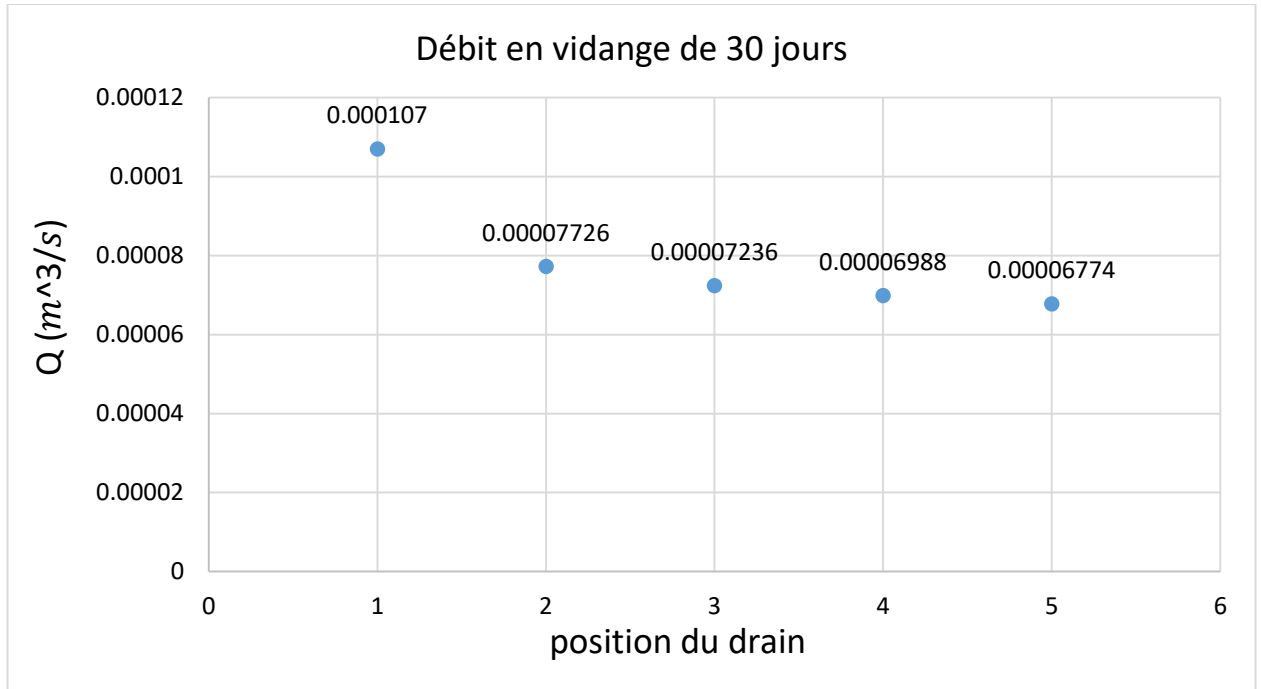


Figure IV.47 : Graphe du débit en fonction de position du drain (vidange de 30 jours)

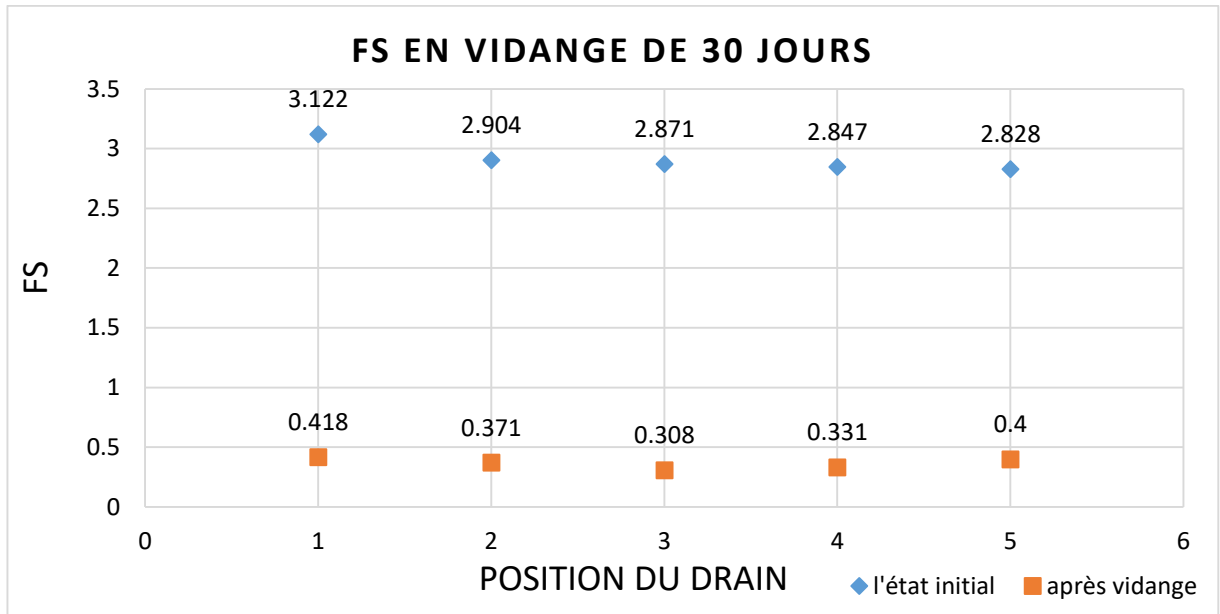


Figure IV.48 : Graphe du facteur de sécurité en fonction de position du drain (vidange de 30 jours)

La vidange rapide causé un rabattement de facteur de sécurité, et cela menace l'instabilité du barrage.

b) Vidange rapide en 5 jours :

La charge hydraulique est fonction du temps, elle passe de $h=24.97\text{m}$ vers $h=0\text{m}$ en 5 jours.

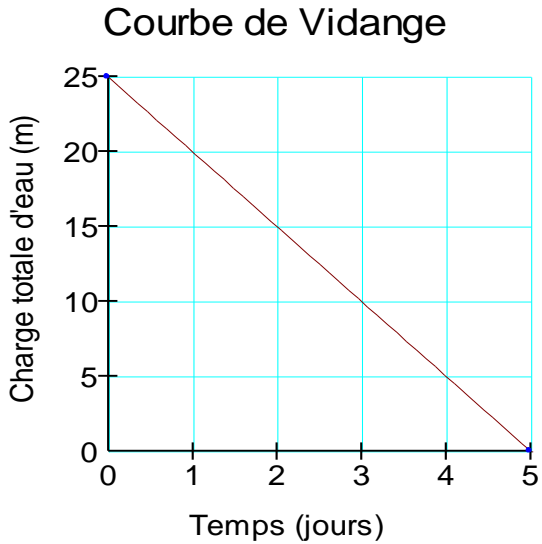


Figure IV.49 : Variation de la charge hydraulique en vidange de 5 jours (Barrage El-Haimeur)

Tableau IV.11 : Facteur de sécurité à l'état de vidange rapide en 5 jours (Barrage El-Haimeur)

Position de drain	$Q (m^3/s)$	F_S (Fin de construction)	F_S (après Vidange rapide)
1	0.000107	3.122	0.382
2 (position initial)	7.726×10^{-5}	2.904	0.346
3	7.236×10^{-5}	2.871	0.381
4	6.988×10^{-5}	2.847	0.328
5	6.774×10^{-5}	2.828	0.274

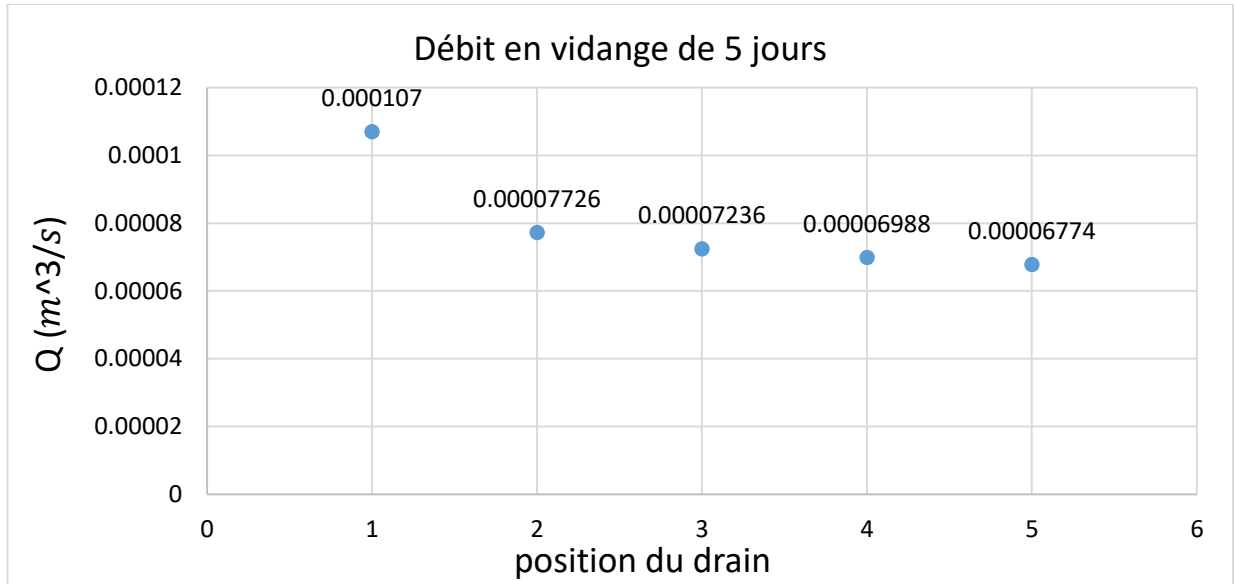


Figure IV.50 : Graphe du débit en fonction de position du drain (vidange de 5 jours)

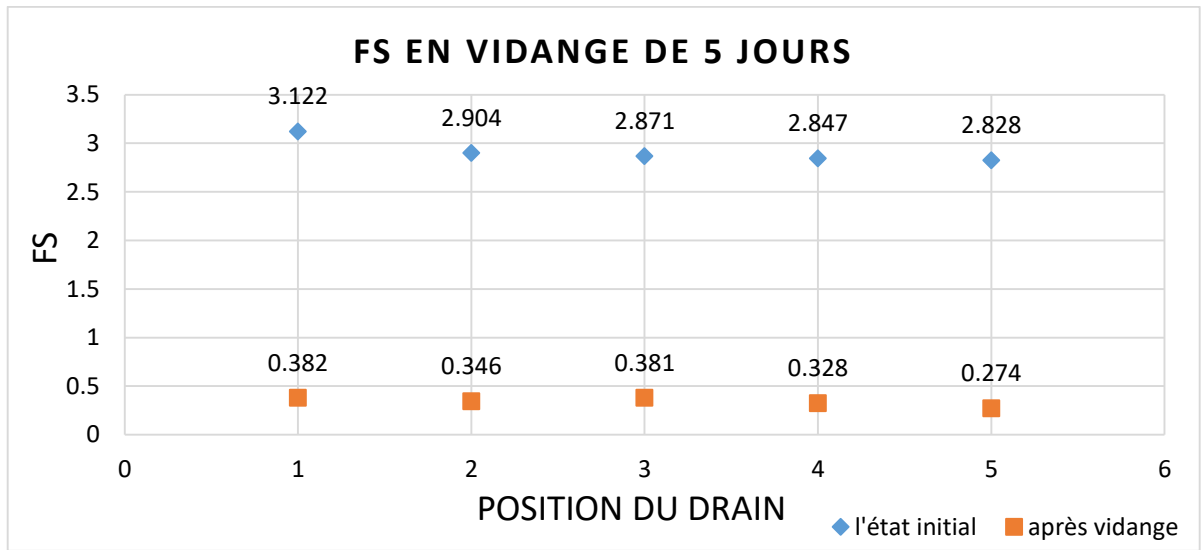


Figure IV.51 : Graphe du facteur de sécurité en fonction de position du drain (vidange de 5 jours)

La vidange rapide causé un rabattement de facteur de sécurité, et cela menace l'instabilité du barrage. Le facteur de sécurité après vidange de 5 jours est moins par rapport une vidange de 30 jours.

IV.7 Conclusion :

Les résultats de cette étude numérique montrent que la stabilité des barrages dépend de leur géométrie et de position du drain.

Les valeurs imposés du facteur de sécurité par le « manuel de conception et projets typiques des digues en terre » utilisé par l'A.N.B.T (Sans séisme) sont :

Tableau IV.12 : Les valeurs imposés du facteur de sécurité

L'état	Valeur imposée (F_S)
Fin de construction	1.25
Utilisation normale	1.35
Vidange rapide	1.25

Toutes les conditions imposées par le « manuel de conception et projets typiques des digues en terre » utilisé par l'A.N.B.T sont vérifiées, donc les talus sont stables pour toutes les positions essayées du drain du la digue Boubrik et El-haimeur , sauf le cas de la vidange rapide où la valeur est inférieure à la valeur imposée.

Conclusion générale

L'étude présentée dans ce mémoire avait pour finalité d'analyser l'effet des drains sur la stabilité d'une digue en terre avec une étude du cas du barrage de Boubrik et El-haimeur (wilaya de Ghardaïa).

Cette étude a permis dans une première étape d'exposer généralités sur les barrages en terre, les infiltrations, les différentes méthodes de détermination de la ligne de saturation, le débit de fuite, les ruptures, le calcul de la stabilité et le système de drainage.

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 hydraulique, le deuxième module « SLOPE/W » pour l'analyse de la stabilité mécanique des talus par un calcul en équilibre limite avec la méthode des tranches (méthodes de Fellenius, de Bishop).

Elle a permis d'analyser la stabilité hydraulique, en réduisant le débit de fuite au sein du massif par abaissement de la ligne de saturation et les lignes équipotentielles. Et la stabilité mécanique des talus amont de la digue en terre du barrage de Boubrik et El-haimeur (wilaya de Ghardaïa) pour différents positions du drain.

Ainsi, l'étude du problème du point de vue stabilité de l'ouvrage, a clairement démontré l'importance du rôle joué par la longueur du drain tapis dans la stabilité au glissement de l'ouvrage car il est lié à l'allure de la ligne de saturation qui dans le cas de l'existence d'une charge amont, divise le massif en deux parties, l'une saturée avec formation d'une nappe en mouvement l'autre totalement sèche. Ce passage d'eau dans une partie du massif engendre un changement des caractéristiques géotechniques des matériaux avec apparitions de pressions interstitielles, ce qui augmente le risque de glissement des talus.

Du point de vue économique, il a été prouvé que la longueur du drain tapis interne conditionne le choix des pentes du barrage et donc peut permettre de choisir des pentes donnant un ouvrage économique. Mais cette longueur doit être choisie de sorte à minimiser les fuites d'eau à travers le corps du barrage.

Références bibliographiques

- [1] **Maanser.A ; Zérara.F (2018)**. Analyse de la stabilité des barrages en terre : étude comparative des méthodes analytiques et numériques. Mémoire de fin d'étude de Master à l'Université Larbi Ben M'hidi – Oum el bouaghi.
- [2] **Mayoufi.S ; Sefiane.Ch (2021)**. Étude numérique de la stabilité d'un barrage en terre par Rocscience. Cas du barrage soubella (msila). Mémoire de fin d'étude de Master à l'Université Mohamed Boudiaf – M'sila.
- [3] **Chetatha.N (2016)**. Etude d'un barrage en terre (digue) barrage oued halib (W. Setif). Mémoire de fin d'étude de Master à l'Université Ziane Achour – Djelfa.
- [4] **Walid.B ; Fouad.B (2018)**. Analyse de l'effet des infiltrations sur la stabilité d'un barrage en terre . Mémoire de fin d'étude de Master à l'Université Mohamed Boudiaf – M'sila.
- [5] **Azieze.B (2012)**. Modélisation et optimisation du système de drainage dans la conception des digues en terre (cas du barrage de Kissir Wilaya de Jijel-Algérie). Mémoire de fin d'étude de Master à l'Université de Jijel.
- [6] **Belkheir.M (2016)**. Etudes de stabilités d'un barrage en terre à zones cas barrage d'Ain zada bordj. Bou.Arreridj. Mémoire de fin d'étude de Master à l'Université Mohamed Boudiaf – M'sila.
- [7] **Habitouche.A (2020)**. Modélisation numérique de l'effet des infiltrations sur la stabilité d'un barrage en terre situe a Magra. Mémoire de fin d'étude de Master à l'Université Mohamed el-bachir-el-ibrahimi – Bordj Bou Arreridj.
- [8] **Messaïd Belkacem (2009)**. Etude de la position efficace des drains dans les barrages en terre ; Doctorat en sciences à l'Université de Batna-Algérie.
- [9] **Dr .Lehbab ep .Boukezzi.Z .** Les barrages en remblai de terre (Polycopié) . Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.
- [10] **Khelifa.M ; Zouheir.H (2012)**. Polycopié du cours Ouvrages hydrauliques. Université de Tunis el Manar.

[11] **Zinai.O ; Nesrat.D (2018)**. Analyse et cartographie du risque d'inondation dans la ville de Ghardaïa. Mémoire de fin d'étude de Master à l'Université Kasdi Merbah – Ouargla.

[12] **Boukhetta.A ; Sammoune.M (2020)**. Support de décision spatiale pour la gestion des ressources en eau de la Value de Ghardaïa. Mémoire de fin d'étude de Master à l'Université de Ghardaïa.

[13] **Hadjira Femmam (2014)**. Analyse numérique de l'influence des pressions interstitielles sur la stabilité des talus . Doctorat en sciences à l'Université de Mohamed Khider –Biskra –Algérie.

[14] **Berthoumieux Junior Jean (2012)**. Étude pluridisciplinaire de la stabilité des pentes : application au glissement de Kenscoff-Mahotièr (Haïti). Doctorat en sciences à l'Université Catholique de Louvain.

[15] **A.N.B.T.12035-RP-0502-B-APD. (2009)**. Note de calcul.

[16] **A.N.B.T.12035-RP-0501-B-APD. (2022)**. Statistiques de l'agence.

Ressources du Web

[17] <https://www.climatsetvoyages.com> › climat › algerie › ghardaia.