



Faculté de Technologie
Département d'Hydraulique

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par :

AMROUNI Taous
BEN ABDESSELAM Ferroudja

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER en Hydraulique**

Option : **Ouvrages et Aménagements Hydraulique**

INTITULE :

MODELISATION DE L'ÉCOULEMENTS ET DE L'ÉROSION INTERÉNE DANS LES BARRAGES EN TERRE (CAS DU BARRAGE SOUK TLETA)

Soutenu le **29 /06 /2017** devant le jury composé de :

- Président : Mme BOUNAB Nadia
- Promoteurs : Mr SEGHIR Abdelghani

Mr BENDAHMANE Ibrahim

- Examineur : Mr HAMMOUCHE Abderrahmane
- Invité : Mr TABOU Rachid

Mr TEKLAL Rafik

Remerciements

A terme de notre travail, nous remercions avant tous le Dieu tout puissant de nous avoir donné la force et le courage durant toutes nos années d'études et pour accomplir ce travail.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance à nos très chers parents respectifs qui sont la plus grande force qui nous pousse à réussir et qui sont toujours présent à chacun de nos pas, eux qui nous ont aidé à nous relever après chacun de nos échecs et de nos avoir encouragé et soutenus afin d'arriver à ce jour.

Nous remercions chaleureusement notre promoteur **Mr Seghir** et notre co-promoteur **Mr Bendahmane** pour avoir eu foi en nous, et pour nous avoir guidé et aidé tout au long de notre travail montrant une grande disponibilité à notre égard.

Nous exprimons surtout notre profonde gratitude à tout les enseignants du département et surtout l'équipe du Hal Hydraulique **Mr Breksi, Mr Hammouche, Mr Belhocine, Mr Ikni, Mr Haddad** ainsi que **Mr Bouhali et Mr Hamani** pour leur accueil dans le laboratoire d'Hydraulique Souterraine et dans le Hall Hydraulique et pour leurs conseils, leur disponibilité et leur encouragements.

Nos remerciements vont également au personnel du projet de réalisation du barrage Souk Tleta à Tizi Ouzou pour le temps qu'ils nous ont consacré, les conseils et les encouragements qu'ils nous ont adressé et pour leur aide en matière de documents techniques durant notre stage spécialement **Mr Teklal et Mr Tabou**.

Nous tenons également à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin ont par leur présence, leurs compétences et leurs commentaires, contribué à l'élaboration et la bonne conduite de ce projet de recherche. On remercie aussi tout nos enseignant du primaire jusqu'à aujourd'hui de nous avoir aidé à apprendre et à enrichir nos connaissance pas à pas.

Nous adressons des remerciements spéciales à nos chers amis(es), à l'intérieur ou à l'extérieur de l'université qui répondent présent à chacun de nos appels durant nos cinq années d'étude à Bejaia et qui ont fait de cette période des moments particulièrement épanouissants et enrichissants.

Nous tenons aussi à remercier le jury d'avoir accepter d'examiner ce modeste travail et de nous faire part de leurs remarques et leurs commentaires.

Merci ...

Sommaire

Dédicaces

A ma très chère mère,

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles. Merci ***maman.***

A la mémoire de mon cher père,

Qui est toujours dans mon esprit et dans mon cœur, je te dédie aujourd'hui ma réussite. Que Dieu, le miséricordieux, t'accueille dans son éternel paradis. J'espère que tu es fier de moi.

A mes adorables sœurs : Lilia et Melissa, A mes chers frères : Salem et Lyes

Merci d'être toujours à mes côtés, par votre présence, par votre amour dévoué et votre tendresse, pour donner du goût et du sens à ma vie. J'espère du fond de mon cœur que vous trouverez dans ce travail l'expression de mon amour et de mon estime les plus sincères. Que Dieu, le tout puissant éclaire votre vie de santé, de bonheur et de succès.

A mes deux petits amours et neveux Farid et Fares

Que Dieu vous donne santé, bonheur, courage et surtout beaucoup de réussite et de succès dans votre vie. J'espère que vous ferai la fierté de vos parents.

A mon chère oncle Belkacem, sa femme et ses enfants. Ainsi que mon oncle Amrane

A mon beau frère Djilali, et ma belle sœur Sarah

A mes proches

A tous ce qui m'ont soutenu

Je dédie ce travail.

Taous

Je dédie ce travail :

A la mémoire de mes grands pères, mon arrière grande mère paix à leurs âmes ;

A la mémoire de mes chers amis Dikia et Haïim qu'ils reposent en paix ;

A mes grandes meres que Dieu les garde pour nous ;

A mes très chers parents, la lumière de ma vie ;

Mes frères et sœurs, mes compagnons à vie ;

Mes tantes et leurs maris ;

Mes oncles et leurs épouses ;

Tout mes cousines et cousins ;

A M'hand, Khadidja, Rabah, Thiziri

Et grand merci à tous mes amis.

DJOUNDJOU

Sommaire

Sommaire

Introduction générale..... 1

Première partie 3

Chapitre I: Généralités sur les écoulements en milieux poreux

I.1/Introduction..... 3

I.2/Généralités sur les milieux poreux..... 3

I.3/Caractéristiques physiques d'un milieu poreux 4

I.3.1/Notion d'homogénéité, d'isotropie et d'anisotropie..... 4

I.4/Paramètres hydrodynamiques d'un milieu poreux 5

I.5/Etude mécanique des écoulements dans le milieu poreux 6

I.5.1/Loi fondamentale de l'écoulement (Loi de Darcy) 6

I.5.2/Dispositif expérimentale de Darcy 6

I.5.3/L'énoncé de la loi de Darcy..... 7

I.5.4/Limites de validité de la loi de Darcy..... 7

I.6/Equations générales des écoulements en régime permanent 8

I.6.1/Ecoulement de l'eau dans les milieux saturés 8

I.6.2/Ecoulement de l'eau dans les milieux non saturés 9

I.7/Etude des réseaux d'infiltration dans un barrage en remblai..... 9

I.7.1/Détermination de la ligne de saturation..... 9

I.7.2/Détermination de la pression interstitielle..... 10

I.7.3/Détermination du débit de fuite..... 12

I.8/Influence de la ligne de saturation sur la stabilité d'un barrage 12

I.9/Conclusion..... 13

Chapitre II: Modélisation numérique des écoulements

II.1/Introduction 14

II.2/Présentation du logiciel 14

II.2.1/Principe de l'utilisation de Comsol..... 14

II.3/Présentation de la méthode des éléments finis 15

II.4/Présentation du maillage..... 18

II.5/Résultats numériques..... 20

II.6/Présentation des modèles d'étude numérique..... 20

II.6.1/Modélisation d'une digue simple 20

II.6.2/Résultats et discussions 23

II.6.3/Modélisation d'une digue avec noyau central.....	25
II.6.4/Résultats et discussions	28
II.7/Conclusion	29

Chapitre III: Simulation de l'écoulement dans le cas d'un barrage réel

III.1/Introduction	30
III.2/Modélisation d'un cas réel de barrage en construction	30
III.2.1/Présentation du barrage.....	30
III.2.2/Modélisation	32
III.2.3/Maillage choisie	34
III.3/Résultats et discussions	35
III.4/La variation de la vitesse de l'écoulement entre les différentes couches de la digue	36
III.5/Conclusion.....	37
Deuxième partie.....	38

Chapitre IV: Présentation du phénomène de l'érosion interne

IV.1/Introduction.....	38
IV.2/Définition de l'érosion interne	38
IV.3/Les phases d'apparition de l'érosion interne	39
IV.4/Mode de transport des particules érodées	40
IV.5/Critères pour l'estimation de l'initiation et le développement de l'érosion interne.....	41
IV.6/Typologie de l'érosion interne	41
IV.7/Origines du phénomène de l'érosion interne	43
IV.8/Modes de rupture d'un barrage sous l'effet de l'érosion interne	44
IV.8.1/Rupture par renard	44
IV.8.2/Rupture par suffusion	44
IV.9/Méthodes de détection de l'érosion interne	45
IV.10/Méthodes de caractérisation de l'érosion interne.....	46
IV.11/Conclusion	49

Chapitre V: Etude expérimentale de l'érosion de trou (HET)

V.1/Introduction	50
V.2/Matériels utilisés	50
V.3/Les hypothèses de bases	50
V.4/Caractéristiques de l'échantillon utilisé	50
V.4.1/Granulométrie	51
V.4.2/Limites d'Atterberg.....	51
V.4.3/L'essai Proctor	53
V.4.4/La conductivité hydraulique	53

V.5/Présentation du modèle expérimentale.....	54
V.5.1/Préparation de l'échantillon d'argile.....	55
V.5.2/Préparation de la colonne.....	56
V.5.3/Instruments de mesure	57
V.6/Procédure des essais de l'érosion de trou.....	58
V.6.1/Mise en place du matériel	58
V.6.2/Déroulement des essais	58
V.7/Résultats	59
V.8/Conclusion.....	59

Chapitre VI: Résultats expérimentaux et discussions

VI.1/Introduction.....	60
VI.2/Résultats expérimentaux et discussions	60
VI.2.1/L'étalonnage	60
VI.2.2/Essai n°01	61
VI.2.3/Essai n°02	62
VI.2.4/Essai n°03	64
VI.2.5/Essai n°04	66
VI.3/Calcul de la masse de l'échantillon érodée	69
VI.4/Variation du taux d'érosion en fonction du temps.....	70
VI.5/Estimation de l'érodabilité du sol	71
VI.6/Estimation de l'indice d'érosion de l'argile.....	71
VI.7/Conclusion	72
 Conclusion générale	 73
Références Bibliographiques.....	74

Liste des figures :

<i>Figure (I.1): Représentation d'un milieu poreux</i>	3
<i>Figure (I.2): Caractéristiques physiques d'un milieu poreux (d'après Castney 1982)</i>	5
<i>Figure (I.3): Expérience de Darcy</i>	7
<i>Figure (I.4): Ligne de saturation dans un barrage en terre non drainé d'après Kozeny</i>	10
<i>Figure (I.5): Détermination de la grandeur Δ pour la correction de la ligne de saturation</i>	10
<i>Figure (I.6): Tracer des lignes de courants et ligne équipotentielle</i>	11
<i>Figure (I.7): Détermination de la pression interstitielle</i>	11
<i>Figure (I.8): Variation de la sensibilité au glissement selon position de la ligne de saturations</i>	13
<i>Figure (II.1): Interface principale du logiciel Comsol.</i>	15
<i>Figure (II.2): Discrétisation du domaine en éléments triangulaires</i>	17
<i>Figure (II.3): Exemples de mailles utilisées dans Comsol</i>	19
<i>Figure (II.4): Composant d'un maillage</i>	20
<i>Figure (II.5): Géométrie du cas simple de la digue</i>	21
<i>Figure (II.6): Charge hydraulique à l'amont du cas simple</i>	22
<i>Figure (II.7): Atmosphère jauge à l'aval (cas simple)</i>	22
<i>Figure (II.8): Image descriptive des parties où il n'y a pas d'écoulement</i>	22
<i>Figure (II.9): Maillage mobile du cas simple</i>	23
<i>Figure (II.10): Lignes de courants du cas simple</i>	24
<i>Figure (II.11): Répartition des pressions dans le cas simple d'une digue</i>	24
<i>Figure (II.12): Répartition de la ligne de saturation du cas simple</i>	25
<i>Figure (II.13): Représentation des résultats donnés par les deux méthodes</i>	25
<i>Figure (II.14): Géométrie du cas intermédiaire</i>	26
<i>Figure (II.15): Charge hydraulique à l'amont dans le cas d'une digue avec noyau</i>	27
<i>Figure (II.16): Atmosphère jauge à l'aval</i>	27
<i>Figure (II.17): Image descriptive des parties où il n'y a pas d'écoulement</i>	27
<i>Figure (II.18): Maillage mobile de la digue avec noyau</i>	28
<i>Figure (II.19): Lignes de courants pour le cas avec noyau</i>	28
<i>Figure (II.20): Répartition des pressions pour le cas d'une digue avec noyau</i>	29
<i>Figure (II.21): Représentation de la ligne de saturation pour le cas d'une digue avec noyau</i>	29
<i>Figure (III.1): Schéma représentatif de la digue</i>	31
<i>Figure (III.2): Image qui montre les différents matériaux composants de la digue</i>	31
<i>Figure (III.3): Géométrie de la digue de col de Souk Tleta sous Comsol</i>	32
<i>Figure (III.4): Charge hydraulique</i>	33
<i>Figure (III.5): Atmosphère jauge</i>	33
<i>Figure (III.6): Les zones de flux nul</i>	34
<i>Figure (III.7): Le maillage mobile du cas de la digue réel</i>	34
<i>Figure (III.8): Représentation des lignes de courants pour le cas réel</i>	35

Figure (III.9): Représentation des pressions dans le cas de la digue de Souk Tleta -----	35
Figure (III.10): Représentation de la ligne de saturation de la digue réelle -----	36
Figure (III.11): Représentation de la répartition des vitesses dans chaque couche de la digue -----	37
Figure (IV.1) : Exemple de rupture d'un barrage par érosion interne (Teton 1976) -----	38
Figure (IV.2) : Illustration des différentes phases de progression de l'érosion interne (Beek et al,2011) -----	39
Figure (IV.3): Représentation du phénomène du Renard-----	40
Figure (IV.4): Décrochage, transport et dépôt de la fraction solide fine d'un sol sous l'action érosive de l'eau au cours du phénomène de suffusion (à gauche) et modelisation par méthode couplée DEM-PFV (à droite) -----	41
Figure (IV.5): Influence de la perméabilité sur l'écoulement-----	42
Figure (IV.6): Schéma représentatif des divers phénomènes initiateur de l'érosion interne dans un barrage -----	43
Figure (IV.7): Illustration des différents modes de rupture d'un barrage-----	44
Figure (IV.8): Schéma de l'appareillage de type canal -----	46
Figure (IV.9): Schéma de l'érosion par cylindre tournant-----	47
Figure (IV.10): Pinhole test-----	48
Figure (IV.11): Schéma de l'essai de l'érosion de trou-----	48
Figure (IV.12): Schéma de l'assai triaxial de l'érosion -----	49
Figure (V.1): Photo représentant la série de tamis (à gauche), et graphe de la distribution granulométrique de l'argile (à droite)-----	51
Figure (V.2): Appareil de CASAGRANDE-----	52
Figure (V.3): Essai Proctor -----	53
Figure (V.4): Schéma représentatif de l'essai de perméabilité in situ-----	54
Figure (V.5): Figure qui montre le procède expérimentale -----	55
Figure (V.6): Etapes de préparation de l'argile-----	55
Figure (V.7): Etapes de préparation de l'échantillon d'argile à utiliser -----	56
Figure (V.8): Etapes de préparation de la colonne-----	57
Figure (V.9): Appareil de mesure de la turbidité -----	57
Figure (V.10): Photo qui représente le remplissage du trou après les essais -----	58
Figure (VI.1): Etalonnage des valeurs-----	61
Figure (VI.2): Dispositif expérimental à 340 cm-----	61
Figure (VI.3): Photos représentant le tube utilisé pour diriger l'écoulement -----	62
Figure (VI.4): Dispositif expérimental à 33 cm -----	62
Figure (VI.5): Graphe représentant la variation de la turbidité en fonction du temps du 2eme essai-----	63
Figure (VI.6): Représentation de la variation de la concentration du 2eme essai-----	63
Figure (VI.7): La forme finale du trou après le 2eme essai -----	64
Figure (VI.8): Dispositif expérimental à 92 cm -----	64
Figure (VI.9): Variation de la turbidité (essai 3) -----	65
Figure (VI.10): Variation de la concentration (essai 3) -----	65
Figure (VI.11): La forme finale du trou après l'essai 3 -----	66
Figure (VI.12): Dispositif expérimental à 88 cm-----	66

<i>Figure (VI.13): Variation du débit en fonction du temps</i>	67
<i>Figure (VI.14): Représentation de la variation du débit (essai 4)</i>	67
<i>Figure (VI.15): Variation de la concentration (essai 4)</i>	67
<i>Figure (VI.16): Forme finale de la bougie après l'essai</i>	68
<i>Figure (VI.17): Evolution de la masse érodée cumulée en fonction du temps</i>	69
<i>Figure (VI.18): Variation du taux d'érosion en fonction du temps</i>	70

Liste des tableaux

<i>Tableau (I.1): Perméabilité à saturation pour différents matériaux (Marcly, 1981)</i>	9
<i>Tableau (II.1):Caractéristiques du modèle du cas simple</i>	21
<i>Tableau (II.2):Caractéristiques du noyau central</i>	25
<i>Tableau (III.1):Tableau qui montre les caractéristiques de chaque couche (Laboratoire du barrage)</i>	32
<i>Tableau (IV.1):Etapas de la phase préliminaire et informations recherchées, tiré de Fauchard et Mériaux(2007)</i>	45
<i>Tableau (V.1):Tableau représentant le classement de l'argile selon le degré de plasticité</i>	52
<i>Tableau (VI.1): Résultats obtenus lors de l'essai d'étalonnage</i>	60
<i>Tableau (VI.2):Classement des sols selon l'indice d'érosion</i>	72

Liste des symboles et abréviation

A : section de l'échantillon

A' : opérateur différentielle linéaire

A(u) : ensemble d'équations gouvernantes définies sur le domaine Ω

B : vecteur de valeurs connues

B(u):ensemble des conditions aux limites que les fonctions U doivent vérifier sur le contour Γ

C : concentration (g/l)

Ce : Constante de proportionnalité adaptée par les auteurs comme coefficient d'érosion du sol

C_r : porosité effective

D : diffusivité

D_m : densité maximum

d : diamètre initiale du trou

dl : distance parcourue

dv : différence de volume

H : hauteur du barrage

H₀ : charge hydraulique

H_m : humidité optimum

i: gradient hydraulique

K : conductivité hydraulique

K' : matrice globale

\bar{k} : Le tenseur de perméabilité (m/s)

m : masse érodée

m₁ : talus amont

m₂ : talus aval

N : nombre de sous domaines(éléments)

N_i : fonction d'interpolation

P_m : pression intersticielle

Q : débit de fuite

q : vitesse de filtration

\vec{q} : Flux d'eau (m/s)

R : coefficient de corrélation

Re : nombre de Reynolds

U : variable inconnue

U_D : fonction connue

u : vitesse suivant l'axe x

V : vitesse de percolation

v : vitesse d'écoulement

v : vitesse suivant l'axe y

W_1 : limite de liquidité

W_p : limite de plasticité

Y_0 : le niveau d'eau aval

γ_w : poids volumique de l'eau

ρ : masse volumique du fluide

μ : viscosité dynamique

η : La porosité de l'échantillon

η_e : porosité efficace

Ψ : fonction de pondération

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

Δh : différence de charge

Ω : domaine

Γ : frontière du domaine Ω .

∇ : opérateur de Laplace

εt : taux d'érosion

τt : Contrainte de cisaillement hydraulique le long du trou au temps t (N/m^2)

τc : Contrainte de cisaillement hydraulique critique (N/m^2)

D_f : diamètre finale du trou

FTU : unité de mesure de la turbidité

HET : Hole Erosion Test

I_e : indice d'érosion

I_p : indice de plasticité

L : longueur de l'échantillon

L_b : longueur à la base

L_c : longueur à la crête

M_t : masse totale érodée

t : temps

$V_{\text{ér}}$: volume érodé

Introduction générale

Introduction générale

Les barrages ont une grande importance dans notre société, ils influencent directement notre quotidien tant du côté économique qu'environnementale. On trouve deux types de barrages : barrage en remblai et barrage en béton. La technique de construction des digues en terre est de plus en plus privilégiée, même si elle est récente, elle ne cesse d'évoluer, seulement beaucoup de phénomènes restent non élucidés. Des méthodes, sont peu ou pas du tout étudiées pour faire l'unanimité tant sur le plan économique que sur le plan de stabilité de l'ouvrage. Ainsi, si l'on se réfère aux statistiques des accidents survenus aux barrages à travers le monde, le problème des infiltrations, renards et sous pressions a causé plus de 40% des accidents recensés.

En premier lieu on trouve le fait du mouvement de l'eau dans les milieu poreux ; qui est un problème géotechnique et hydraulique important, car ces mouvements peuvent modifier au cours du temps la distribution des pressions interstitielles exercées dans les massifs de sol, tant de point de vue mécanique que du point de vue hydraulique(évolution des forces) ; reste une étape très importante lors de la réalisation d'un ouvrage car toute modification dans le comportement des matériaux provoque un risque sur la stabilité du barrage.

En deuxième lieu, l'érosion interne qui provient de la migration, sous l'action d'un écoulement, de certains grains constitutifs de l'ouvrage. Cette migration est mal connue à cause de sa complexité et de sa difficulté à être détectée. Elle engendre une modification des caractéristiques hydrauliques et mécaniques du matériau constituant l'ouvrage. La perméabilité du matériau peut être considérablement modifiée ce qui peut provoquer une perte d'étanchéité ou des surpressions interstitielles. L'arrachage de certains grains porte préjudice à la stabilité structurelle du matériau et peut même conduire à la rupture de l'ouvrage (Bendahmane et al, 2009).

L'interaction de l'eau avec les ouvrages en terre peut générer des dommages irréversibles ; depuis les années 80, des études on de plus en plus éclaircit les causes associés a ces dommages et on trouvé pour la pluparts des cas que l'érosion interne est la cause principale de ces problèmes. Foster et al (2000) ont réalisé une étude statistique sur 11 192 barrages en terre : 136 ont subi des incidents dont 6% par glissement, 48% par érosion interne et 46% par surverse.

On dénombre plusieurs cas de rupture de barrage par érosion interne parmi eux on cite : un des premiers cas recensé dans le monde qui est le barrage en terre construit sur l'affluent du Nil, le Wadi Garwi dont les restes sont toujours visibles, on cite également la rupture du barrage Teton en 1976 qui est un grand barrage en remblai qui a causé la mort de 14 personnes et a coûté 400 millions de dollars de dégâts, on peu aussi citer plusieurs cas de rupture de digues : la digue d'Aramon (septembre 2002), les digues de Fourques et du Nord d'Arles (décembre 2003)...

Cependant, ce phénomène demeure très mal connu et n'est a ce jour pas réellement maîtrisé, c'est pourquoi il paraît essentiel d'effectuer un travail dans ce sens afin d'être capable de détecter l'apparition de ce dernier et de prédire son comportement afin d'essayer de le

ralentir ce qui permettra de minimiser ses dégâts sur la population et d'éviter la rupture brusque des ouvrages hydrauliques.

Ce travail vise à améliorer la compréhension quantitatives des principaux processus initiateur de l'érosion interne, tel que la suffusion et le mécanisme de fuite concentrés, qui conduisent à la fois à la formation des défauts dans le corps de barrage et de sa fondation. Cette compréhension permet d'accélérer les études d'évaluation de la sécurité des barrages en terre

Pour atteindre l'objectif fixé, ce travail s'articule autour de deux parties principales :

La première partie est scindée en trois chapitres, le premier concerne les généralités sur les écoulements dans les milieux poreux et la loi de Darcy ainsi que les méthodes régissant ce problème. Le second chapitre est consacré à la simulation de l'écoulement de l'eau dans deux cas de digues différentes et à la présentation des résultats obtenus. Le troisième chapitre concerne la simulation sur un cas réel du barrage de Souk Tleta à Tizi Ouzou afin de présenter les résultats obtenues ; lignes de courants, répartition des pressions, ligne de saturation et calcul de débit de fuite.

La deuxième partie comporte aussi trois chapitres, le quatrième chapitre, décrit le phénomène de l'érosion interne qui est un phénomène essentiellement causé par l'écoulement en milieu poreux, ses différentes étapes d'apparition, ses mécanismes, ses moyens de transports, ses origines et causes majeurs. Ensuite, dans le cinquième chapitre couvre les travaux expérimentaux qui concerne l'érosion de trou au niveau du Hall d'Hydraulique de l'université A-Mira de Bejaïa et cela dans le but de quantifier ce phénomène et de l'approcher concrètement. Dans le dernier chapitre est réservé à la présentation des résultats obtenus et leurs interprétations.

Notre travail se termine par une conclusion générale et quelques perspectives de recherche

Partie 1 :

Etude des écoulements en milieu poreux

Chapitre I :

Généralités sur les écoulements en milieu poreux

Première partie

I.1/Introduction

Les écoulements souterrains constituent la partie cachée du cycle hydrologique, c'est pour cela que certaines de leurs caractéristiques mesurables restent parfois incertaines. Cependant une meilleure connaissance et maîtrise de ces écoulements et de ces ressources sont vitales pour l'avenir car leur gestion, leur transport et leur stockage représentent 20% de l'énergie consommée par le monde. Il est donc nécessaire de résoudre les problèmes complexes liés à l'hydrodynamique en milieux poreux ce qui inclut la résolution des équations établies par des méthodes efficaces qu'elles soient analytiques ou numériques.

Les paramètres qui conditionnent les écoulements dans les sols saturés sont la gravité et les forces de frottement au niveau des grains. Ces paramètres sont dus essentiellement à la viscosité, tandis que les écoulements dans les sols non saturés mettent en jeu les interactions entre les trois phases : solide, liquide et gazeuse.

L'approche la plus classique pour la résolution des problèmes liés aux écoulements souterrains est l'approche de Darcy qui est basée sur l'équation empirique « loi de Darcy » et sur l'équation de conservation de la masse.

Dans cette partie, nous définirons les variables et les paramètres fondamentaux nécessaires pour la description des transferts hydriques dans les milieux poreux. Nous présenterons ensuite les équations régissant les écoulements dans un sol saturé.

I.2/Généralités sur les milieux poreux

I.2.1/Définition du milieu poreux

Un milieu poreux est un milieu solide contenant des pores (vides) pouvant être interconnectés ou séparés qui sont remplis d'eau, d'air ou d'autres fluides. Pour qu'un fluide puisse percoler dans un milieu poreux, il faut qu'au moins une partie de ces pores soient interconnectés. Ces pores, dont les formes et les dimensions sont d'une grande diversité, constituent les réseaux poreux qui offrent un grand nombre de possibilités au cheminement d'un fluide.

La figure suivante montre les différentes composantes d'un milieu poreux,

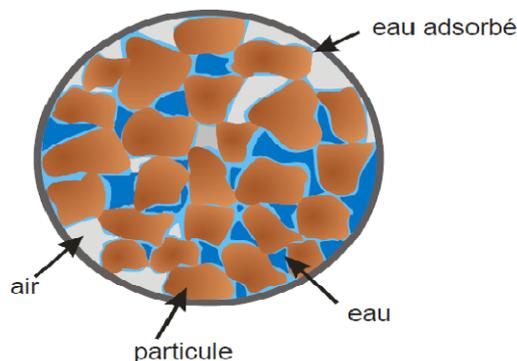


Figure (I.1): Représentation d'un milieu poreux

I.2.2/Différents types d'eau dans un sol saturé

Dans les sols saturés, l'eau remplit tous les vides entre les particules. Si l'on exclut l'eau qui entre dans la composition des minéraux (eau de constitution), il est nécessaire de distinguer **l'eau gravitaire**, c'est la fraction de l'eau souterraine qui se draine sous l'action des forces de gravité uniquement, et **l'eau de rétention**, c'est la fraction de l'eau maintenue dans les interstices à la surface des grains ou sur des microfissures par la force d'attraction moléculaire. Et aussi **l'eau capillaire** qui est l'eau soumise à la force de tension superficielle au-dessus de la surface de la nappe. (M, 2012)

I.2.3/Différents types de porosité

I.2.3.1/La porosité efficace η_e (coefficient de porosité)

Elle se rapporte à l'eau libérée par drainage gravitaire d'une roche saturée. C'est le volume de l'eau gravitaire (V_e) que l'échantillon peut contenir à l'état saturé ; puis libéré sous l'effet d'égouttage complet ; à son volume total (V_t). Elle dépend essentiellement de l'arrangement de la surface spécifique des grains ; elle est exprimée par :

$$\eta_e = \frac{V_e}{V_t} \quad (\text{I.1})$$

I.2.3.2/La porosité effective

Appelée aussi capacité de rétention. C'est le rapport du volume de rétention V_r (eau non égouttable par gravité) au volume total apparent V_t . elle est donnée par la formule suivante :

$$C_r = \frac{V_r}{V_t} \quad (\text{I.2})$$

I.2.3.3/La porosité cinématique

Elle désigne le rapport de l'eau non liée aux grains ; elle est difficilement mesurable dans la pratique. Ce concept est proche de la porosité efficace c'est un rapport de volume (Carlier, 1980)

I.3/Caractéristiques physiques d'un milieu poreux

I.3.1/Notion d'homogénéité, d'isotropie et d'anisotropie

L'homogénéité du sol a une grande importance sur la stabilité des fondations en général, et c'est une hypothèse indispensable sans laquelle aucune théorie sur les écoulements souterrains ne sera possible. Un terrain poreux est homogène s'il présente en tout point dans une direction donnée la même résistance à un écoulement de filtration.

Dans son comportement par rapport à un écoulement souterrain un terrain à des propriétés géométriques, on peut dire qu'il est isotrope s'il présente la même résistance à un écoulement de filtration quelque soit la direction et anisotrope dans le cas contraire.

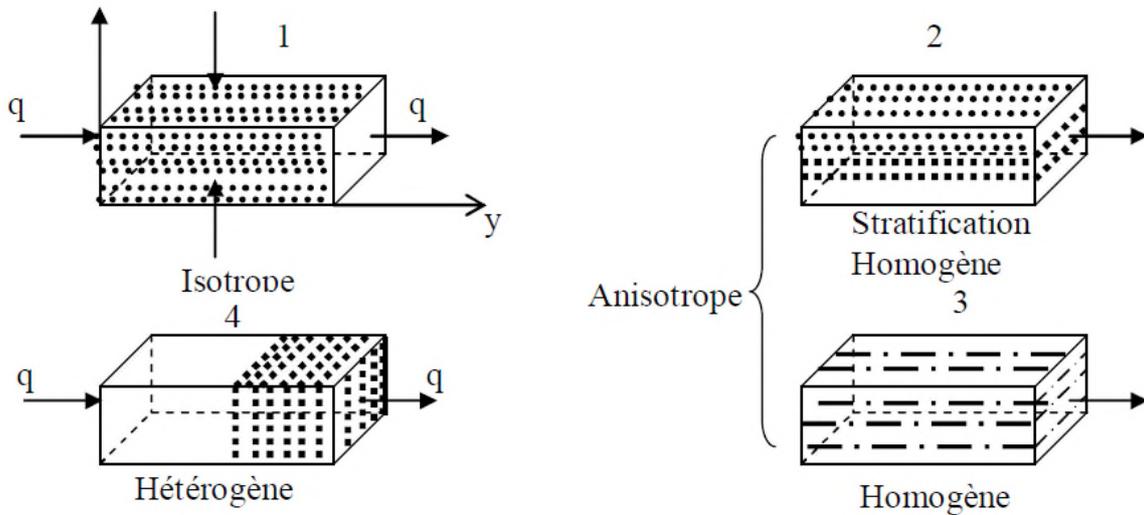


Figure (I.2): Caractéristiques physiques d'un milieu poreux (d'après Castney 1982)

I.4/Paramètres hydrodynamiques d'un milieu poreux

I.4.1/Conductivité hydraulique K

La conductivité hydraulique d'un matériau (une roche, un tissu, etc.) correspond à son aptitude à se laisser traverser par un fluide de référence sous l'effet d'un gradient de pression. C'est une constante qui caractérise un milieu poreux et liée à la forme des grains et la porosité du sol.

Il n'est pas simple de la mesurer in-situ. C'est une grandeur statistique du matériau. On peut la comparer à une vitesse d'infiltration et dans ce cas, la mesure peut être réalisée avec un infiltromètre.

Cette conductivité hydraulique est définie comme le facteur de proportionnalité, reliant le flux q (débit par unité de surface) au gradient de potentiel ϕ induisant l'écoulement tel que :

$$K(\phi) = \frac{-q}{\text{grad}\phi} \quad (\text{I.3})$$

Le coefficient de la conductivité hydraulique $K(\phi)$ dépend fortement de la concentration en eau et de sa variation. Si le milieu est saturé, ce coefficient est égal au coefficient de perméabilité.

I.4.2/Diffusivité D

La diffusivité a été initialement définie par Childs & Collis-George, 1948, sous la forme suivante :

$$D(\theta) = K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \quad (\text{I.4})$$

Notons que la diffusivité dépend non seulement de la concentration en eau mais aussi de son gradient. Elle est aussi liée à la géométrie du milieu poreux, la nature de l'interaction entre le fluide et la matrice solide, aux conditions initiales, et aux conditions aux limites de l'écoulement

I.4.3/Le coefficient d'emmagasinement

Le coefficient d'emmagasinement spécifique d'un matériau représente sa capacité à libérer ou emmagasiner (stocker) de l'eau sous l'effet d'une variation de la charge hydraulique. C'est le volume d'eau libéré ou emmagasiné par un volume unitaire de ce matériau pour une variation unitaire de charge hydraulique. C'est le rapport du volume extrait d'un sol poreux sur le volume total.

$$S_s = \frac{V_{ext}}{V_t} \quad (I.5)$$

I.5/Etude mécanique des écoulements dans le milieu poreux

I.5.1/Loi fondamentale de l'écoulement (Loi de Darcy)

L'étude fondatrice des écoulements dans les milieux poreux a été réalisée par l'ingénieur Darcy en 1856 avec un « Mémoire sur les fontaines publiques de la ville de Dijon » (Othman, 2013). Il a mis en évidence une relation linéaire entre la vitesse et le gradient de pression appliqué de part et d'autre du matériau poreux. La loi de Darcy s'applique à un milieu poreux homogène et isotrope parcouru par un écoulement à faible vitesse.

A cet effet, Darcy a tenté d'améliorer la qualité des filtres à sable utiles à la purification des eaux d'alimentation, il a établi expérimentalement la relation entre le débit d'écoulement à travers un milieu poreux et la perte de charge qui lui est associée dans un dispositif expérimental.

I.5.2/Dispositif expérimentale de Darcy

Considérons un tube cylindrique rempli de sol à travers lequel l'eau pénètre sous pression par une extrémité pour ressortir par l'autre ; des tubes (piézomètres) permettent de mesurer la pression de l'eau interstitielle en différents points. On constate que les niveaux d'eau dans les piézomètres sont alignés sur une droite et cela quelle que soit la pression d'alimentation.

Les pertes de charges sont proportionnelles aux épaisseurs de terre traversée, ceci est dû à ce que la circulation dans le sol s'effectue en régime laminaire.

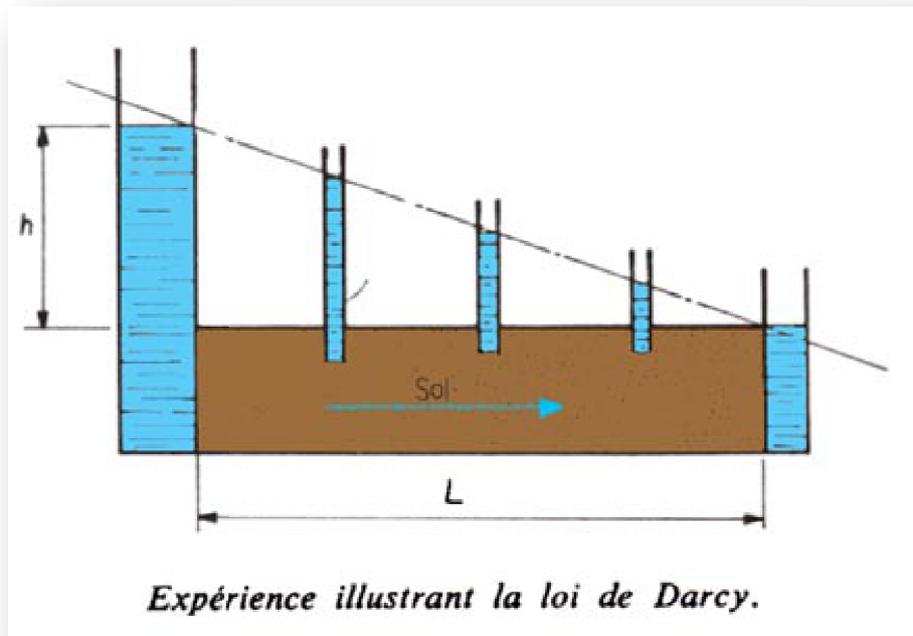


Figure (I.3):Expérience de Darcy

I.5.3/L'énoncé de la loi de Darcy

Dans son expérience, Darcy a déduit une relation expérimentale exprimant le débit total Q transitant à travers la colonne comme le produit de sa section A , du rapport de la différence de la charge totale Δh existant entre ces deux extrémités à sa longueur L et d'un coefficient de proportionnalité K ; et elle exprimé sous la forme :

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{L} = K \cdot i \cdot A \quad (\text{I.6})$$

Avec : $i = \frac{\Delta h}{L}$ est le gradient hydraulique.

En divisant les deux membres de cette équation par A , on trouvera la vitesse de filtration $q = \frac{Q}{A}$ appelée également vitesse de Darcy :

$$q = \frac{Q}{A} = K \cdot \frac{\Delta h}{L} = K \cdot i \quad (\text{I.7})$$

I.5.4/Limites de validité de la loi de Darcy

La loi de Darcy étant établie dans un laboratoire répond à des conditions très strictes, parmi lesquelles on cite : la continuité, l'isotropie, l'homogénéité du milieu et dans un écoulement laminaire.

Pour des gradients élevés, il a été constaté que la loi de Darcy n'est pas applicable, les pertes de charge augmentent beaucoup plus vite que le débit. De nombreuses expériences ont été faites dans le but de déterminer les limites de validité de cette loi.

En Hydraulique pour que la loi de Darcy soit applicable c'est évident que l'écoulement doit rester en régime laminaire et ne dépasser le seuil d'apparition de la turbulence, il est nécessaire que le nombre de Reynolds (**Re**) qui mesure l'importance des forces d'inertie par rapport aux forces de viscosité soit inférieur à 10 (Othman, 2013), on définit le nombre de Reynolds par :

$$\text{Re} = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (\text{I.8})$$

Avec : V est la vitesse de décharge, ν est la viscosité cinématique du fluide et D est le diamètre moyen des grains.

Il est admis que la loi de Darcy est applicable pour $\text{Re} < 10$. (Carlier, 1980)

Dans les modèles capillaires ou les pores du milieu sont supposés constituer une micro-conduite de diamètre D , la vitesse V désigne la vitesse moyenne de l'écoulement dans les capillaires.

Il existe plusieurs modèles dans la littérature, par exemple :

$$\text{Re} = \frac{\varepsilon^2 L \rho |\Delta P| \sqrt{\eta}}{\mu^2} \quad (\text{I.9})$$

Avec : ε est le rapport entre la longueur l des pores et la longueur L du milieu, μ et ρ sont la viscosité dynamique et la masse volumique du fluide et η est la porosité

I.6/Equations générales des écoulements en régime permanent

I.6.1/Ecoulement de l'eau dans les milieux saturés

La généralisation de la loi de Darcy pour le milieu homogène et anisotrope, et pour un fluide incompressible, s'écrit :

$$\vec{q} = -\bar{k} \cdot \overrightarrow{\text{grad}H} \quad (\text{I.10})$$

Avec:

\vec{q} : Flux d'eau (m/s)

\bar{k} : Le tenseur de perméabilité (m/s)

$\overrightarrow{\text{grad}H}$: Le gradient de la charge hydraulique (-).

Le tenseur d'ordre 2 représente la constante de proportionnalité entre le débit et le gradient hydraulique dans la loi de Darcy. Rapporté à un système référentiel $oxyz$, il représente l'effet de la résistance à l'écoulement de l'eau dû aux forces de frottement selon les 3 directions ox, oy, oz .

Lorsque le sol est homogène et anisotrope, les valeurs de la perméabilité varient selon chaque axe et expriment le tenseur symétrique par :

$$\bar{K} = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{pmatrix}$$

Le tableau suivant illustre la perméabilité de plusieurs matériaux en fonction de leurs textures. La distinction entre le domaine perméable et imperméable est fixée à 10^{-9} m/s.

Tableau (I.1): Perméabilité à saturation pour différents matériaux (Marcly, 1981)

Texture	Perméabilité (m/s)	Observation
Graviers sans éléments fins	10^{-2}	Très perméable
Sables non argileux et graviers	10^{-2} à 10^{-5}	Perméable
Sables fins et argileux	10^{-5} à 10^{-9}	Peu perméable
Argiles franches	10^{-9} à 10^{-13}	Imperméable

I.6.2/Ecoulement de l'eau dans les milieux non saturés

Les processus d'écoulement dans les milieux non saturés sont en général compliqués et difficiles à décrire car ils mettent en jeu des interactions entre trois phases : solide, liquide et gazeuse qui représentent respectivement : le sol, l'eau et l'air.

I.7/Etude des réseaux d'infiltration dans un barrage en remblai

Les pertes d'eau par infiltration dans les barrages sont très faibles et pour les déterminer il faut les aborder sous trois angles :

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

I.7.1/Détermination de la ligne de saturation

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

La méthode pour le tracé 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.

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

$$y^2 - y_0^2 - 2 \cdot x \cdot y_0 = 0 \quad (\text{I.11})$$

$$\text{Avec : } y_0 = \sqrt{h_1^2 + L^2} - L \quad (\text{I.12})$$

Les paramètres y_0 , L et h_1 sont représentés dans la figure (I.4)

La figure suivante montre le traçage de la ligne de saturation dans une digue homogène, avec B est longueur de la base et b est la longueur à la crête, H_1 est la charge hydraulique, m_1 et m_2 sont les talus amont et aval respectivement

Avec :  Représente la parabole de Kozeny

 Représente la ligne phréatique.

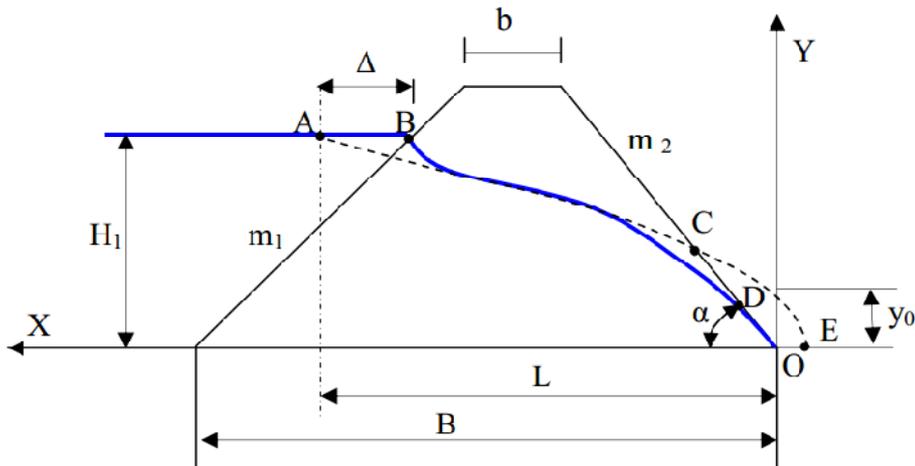


Figure (I.4): Ligne de saturation dans un barrage en terre non drainé d'après Kozeny

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

En traçant la parabole de Kozeny celle-ci coupe le plan d'eau à une distance qui ne coïncide pas avec le passage réel de l'eau. Elle doit être corrigée par une courbe normale au talus amont et tangente à la parabole théorique à l'aval. Pour le calcul de cette distance on dispose de la méthode suivante :

$$\Delta = 0.3m_1 \cdot h_1 \tag{I.13}$$

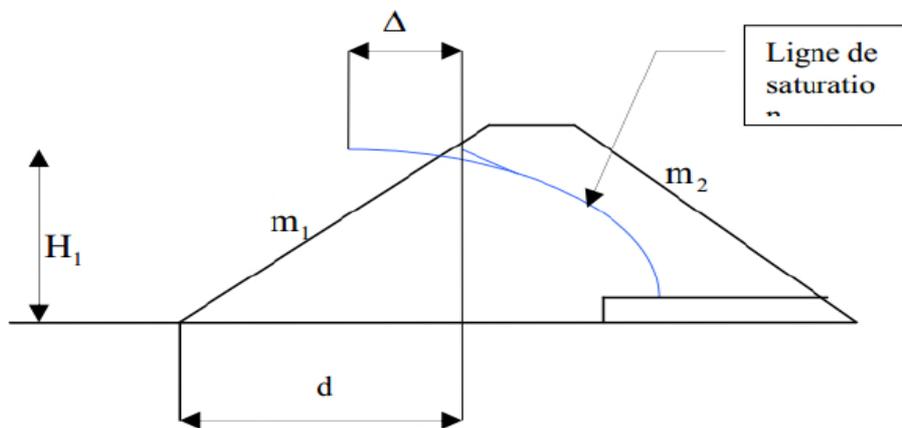


Figure (I.5): Détermination de la grandeur Δ pour la correction de la ligne de saturation

I.7.2/Détermination de la pression interstitielle

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

- La condition de continuité de la phase liquide :
 $div \vec{V} = 0$
- La loi de Darcy :
 $\vec{V} = -k \cdot \overrightarrow{grad. h}$

D'après ces deux équations on obtiendra la condition de continuité suivante :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \Delta h = 0 \quad (\text{I.14})$$

Où : Δ représente le Laplacien

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

En pratiques, comme les écoulements dans les barrages en terre, la résolution de l'équation de Laplace consiste à rechercher:

- Les lignes équipotentielle
- Les lignes de courant

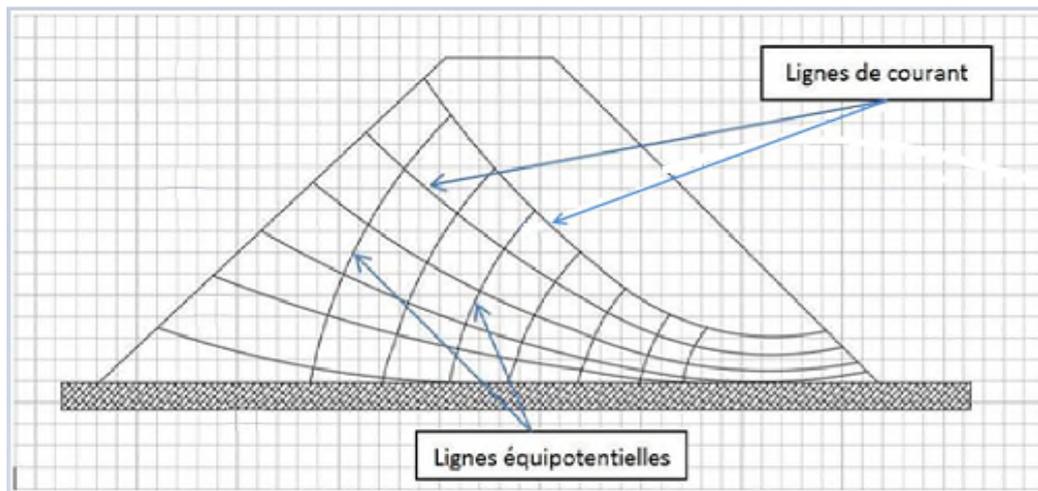


Figure (I.6): Tracer des lignes de courants et ligne équipotentielles

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

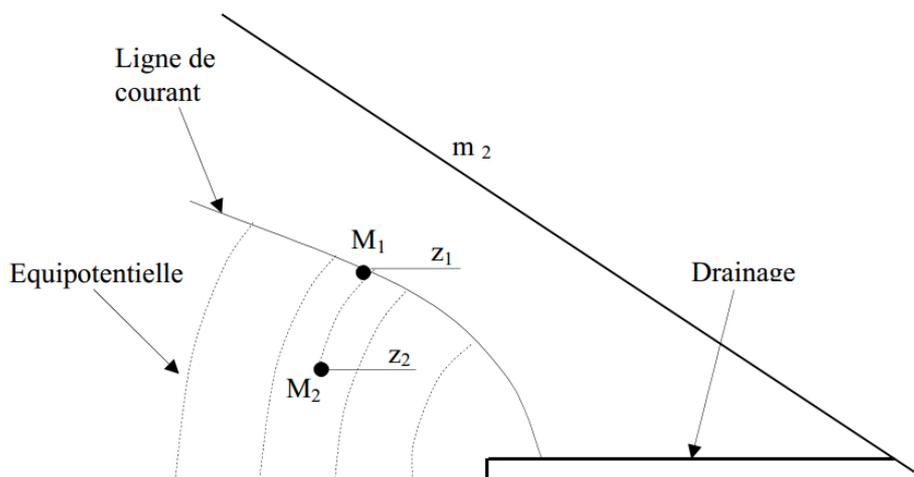


Figure (I.7): Détermination de la pression interstitielle

La détermination de la pression interstitielle se fait d'après la figure (I.7) suivant l'expression suivante :

$$P_m = (Z_1 - Z_2) \cdot \gamma_w \quad (\text{I.15})$$

I.7.3/Détermination du débit de fuite

Le débit de fuite dû aux infiltrations, peu s'obtenir à partir du réseau des lignes de courant orthogonales aux équipotentielles. Ces lignes de courant représentent la trajectoire de l'eau à travers le corps du barrage. On peut aussi évaluer approximativement le débit de fuite par le calcul en utilisant la loi de Darcy pour un mètre linéaire.

I.8/Influence de la ligne de saturation sur la stabilité d'un barrage

I.8.1/Stabilité hydraulique

Liée essentiellement au phénomène de l'érosion interne, qui influe sur les paramètres hydrauliques d'un barrage. Causé par l'arrachage des particules de sol sous l'effet de l'eau, ce phénomène, se développe en présence de deux conditions doivent avoir lieu simultanément: l'arrachement de particules, et leurs transport. Ces différents modes de déclenchement de l'érosion interne peuvent se combiner entre eux et être difficilement distinguables. Pour entraîner la rupture, il faut aussi que les conditions du transport des particules soient assurées afin que l'érosion soit apparente. La nature du transport conduit à distinguer deux mécanismes d'érosion interne: le renard hydraulique et la suffusion.

- **Le renard hydraulique :** Le renard hydraulique apparaît dans un ouvrage de génie civil lorsque l'écoulement d'eau à travers celui-ci se fait selon un chemin préférentiel. Le long de ce chemin se trouvent des points faibles affectés par des phénomènes d'érosion (érosion régressive ou boulangerie). Si ces points faibles ne sont pas entourés par des zones stables limitant leur expansion, il y a alors formation d'un trou continu de l'aval vers l'amont, La vitesse d'écoulement à travers l'ouvrage augmente et accélère ainsi le processus de ruine en cours .
- **La suffusion :** La suffusion est un phénomène de migration des petites particules à travers le squelette constitutif d'un sol. Il en résulte une redistribution des fines dans le sol qui s'apparente à une migration massive des particules fines. La migration des particules fines accroît le risque de colmatage et en conséquence, les pressions interstitielles peuvent augmenter en un point localisé du remblai. Si ce point est à l'aval, il va se former une zone instable qui menacera l'ouvrage de ruine.

I.8.2/Stabilité mécanique :

Au plan microscopique et très schématiquement, la résistance d'un sol au sens large réside, dans la reprise des efforts extérieurs par le frottement grain à grain des particules solides qui le constituent, et par la cohésion entre particules dans le cas de matériaux fins.

Or, la pression interstitielle c'est-à-dire la pression de l'eau présente entre les grains diminue, voire s'annule, le frottement aussi. Les sols saturés résistent beaucoup moins aux contraintes de cisaillement qui tendent à les faire glisser suivant des surfaces de rupture privilégiées. On

conçoit, dès lors, aisément que la configuration de la ligne de saturation dans le remblai influence grandement le comportement de l'ouvrage a la stabilité, comme l'illustre le schéma comparatif suivant. (Cherif & Bouhassane, 2013)

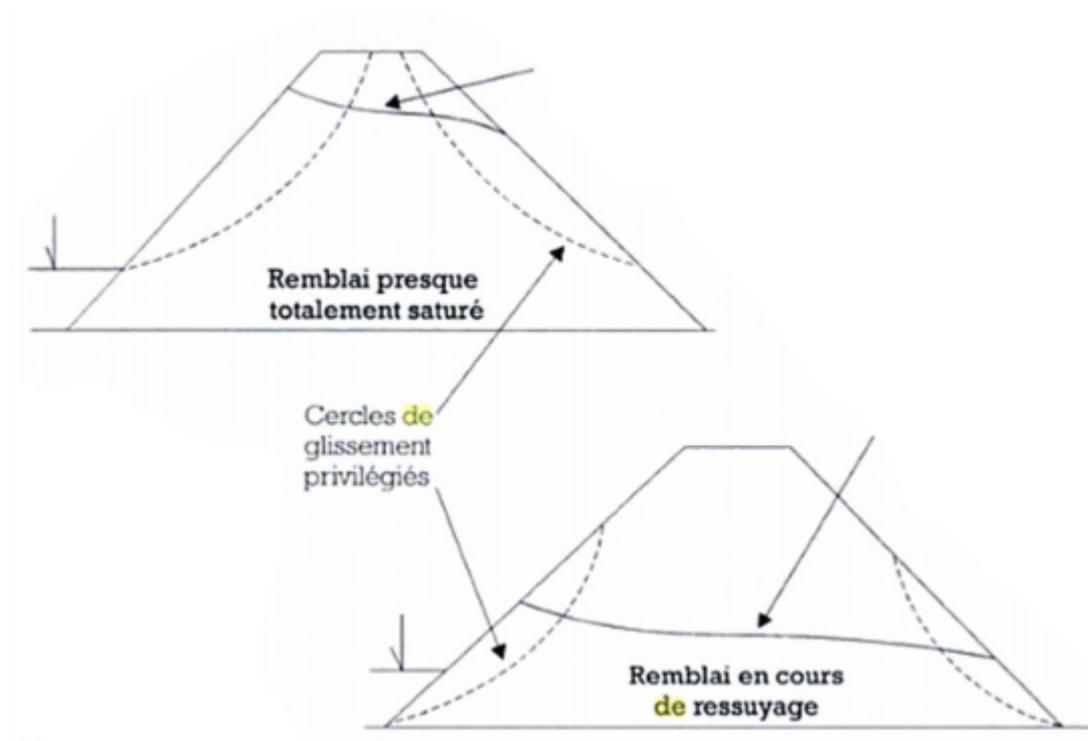


Figure (I.8): Variation de la sensibilité au glissement selon position de la ligne de saturations

I.9/Conclusion

L'étude des écoulements à travers un milieu poreux est caractérisée par trois paramètres hydrodynamiques principaux qui sont: le coefficient de conductivité, le gradient hydraulique, la vitesse et le débit de l'écoulement.

Dans le cas des digues homogène, des formules empirique pourront être appliquées et donnent des résultats satisfaisants. Par contre, pour les digues zonées ces formules ont leurs limites d'application.

Pour notre étude nous ferons recours à la modélisation numérique de ces écoulements afin de déterminer le débit d'infiltration, et de tracer la ligne de saturation et les lignes de courants, les détails de ce travail seront exposé au chapitre suivant.

Chapitre II :

Modélisation numériques des écoulements

II.1/Introduction

Un modèle numérique est une représentation simplifiée de la réalité à l'aide d'équations dans le but de trouver des réponses à un ensemble de problèmes et de mieux comprendre et prédire le comportement d'un système et aussi pour mieux mener les expériences sur terrain.

La simulation par ordinateur est devenue indispensable pour la science et l'ingénierie. Aujourd'hui tous se fait à travers les langages de programmation offrant de multiples options pour simuler par des méthodes numériques avancées.

Après avoir fait l'étude d'un cas réel (barrage) et ayant eu toutes les données nécessaire sur les écoulements dans les milieux poreux, on s'intéresse maintenant à faire une modélisation numérique de l'écoulement dans une digue en terre composée de plusieurs zones de divers matériaux ; et cela en utilisant un logiciel informatique nommé COMSOL Multiphysics5.2.

II.2/Présentation du logiciel

COMSOL Multiphysics est un logiciel développé par des étudiants de Germund Dahlquist dans un institut de Technologie à Stockholm en Suède en 1986, et sa première version est sortie en 1998.

Ce logiciel permet la simulation et la résolution de problèmes très complexes (exemple l'interaction fluide –sol), il est basé sur la méthode des éléments finis. COMSOL permet de coupler des physiques "simples" ou d'étudier des phénomènes multiphysiques. Il comprend plus de 30 modules complémentaires qui offrent des interfaces et des outils spécialisés en génie électrique, mécanique, chimique et fluidique. De plus des interfaces bidirectionnelles relient les simulations réalisées dans ce logiciel à d'autres logiciels de calcul, CAO (CAD) et Matlab.

Dans le cas de la simulation des écoulements dans une digue, les résultats à visualiser sont essentiellement : le calcul du débit de fuite à travers le corps du barrage et le traçage de la ligne de saturation et des lignes de courants.

II.2.1/Principe de l'utilisation de Comsol

L'utilisateur de Comsol doit suivre les étapes suivantes pour l'élaboration d'un modèle :

- Choix de dimension : 3D; 2D; 2D axisymétrique; 1D; 1D axisymétrique; 0D ;
- Choix du module physique : écoulement fluide ; transfert de chaleur ; transport d'espèces chimiques... ;
- Choix du type d'étude : stationnaire ; temporelle ;
- Construction de la géométrie ;
- Choix et paramétrage des matériaux ;
- Choix et paramétrage du maillage ;
- Calcul de l'étude ;
- Visualisation des résultats.

L'interface de Comsol est montré dans la figure ci après

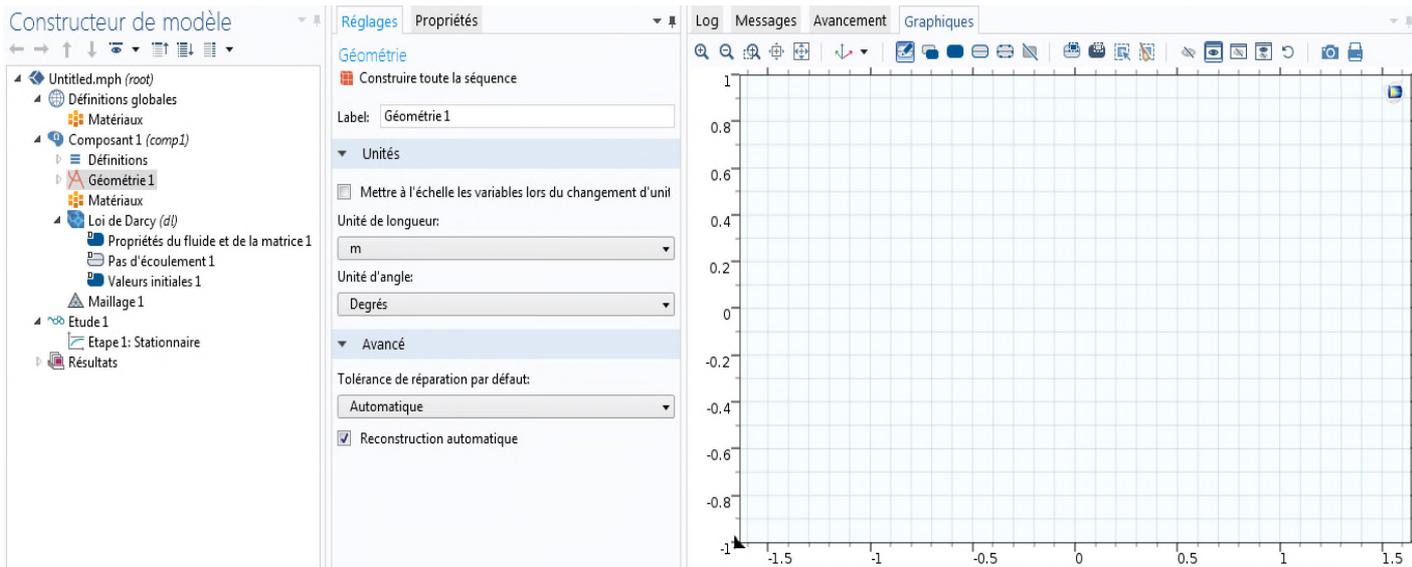


Figure (II.1): Interface principale du logiciel Cmsol.

II.3/Présentation de la méthode des éléments finis

II.3.1/Définition

La méthode des éléments finis consiste à chercher une solution approchée du problème en se basant sur la construction d'une approximation interne constituée de fonctions polynomiales par morceaux. C'est à dire discrétiser le domaine de calcul en un grand nombre de sous domaines élémentaires de forme géométrique simple (éléments finis) interconnectés entre eux par des points appelés nœuds. Cette répartition est appelé maillage.

II.3.2/Etapes de résolution d'un problème par éléments finis

La résolution d'un problème avec la méthode des éléments finis se déroule en plusieurs étapes :

- Formulation des équations différentielles aux dérivés partielles et leurs domaines d'application.
- Création du maillage (nœuds et éléments) ;
- Génération des tableaux élémentaires (matrices et vecteurs) reliant les nœuds et les forces appliquées aux nœuds ;
- Assemblage des des vecteurs et matrices en un système globale de manière à respecter les conditions d'équilibre aux nœuds ;
- La prise en compte des condition aux limites dans le système globale ;
- Résolution du système ;
- Présentation des résultats sous forme numérique ou graphique.

II.3.4/Principe de la méthode

La méthode des éléments finis consiste à utiliser une approximation simple de l'inconnue pour transformer les équations aux dérivés partielles en équations algébriques, toutefois elle ne s'applique pas directement aux équations aux dérivés partielles mais à une formulation

intégrale équivalente au problème à résoudre. L'équation aux dérivées partielles peut être formulée comme suit :

$$A(u)=0 \quad \text{sur le domaine } \Omega \quad \text{ou : } U \in V \quad (V \text{ espace des fonctions})$$

$$B(u)=0 \quad \text{sur le contour } \Gamma$$

Avec : $A(u)$ est l'ensemble d'équations gouvernantes définies sur le domaine Ω et $B(u)$ est l'ensemble des conditions aux limites que les fonctions U doivent vérifier sur le contour Γ
Pour chercher la solution associée à cette équation elle doit être réécrite sous forme intégrale.

II.3.5/Forme intégrale des équations aux dérivés partielles

II.3.5.1/Méthode des résidus pondérés

Si l'on propose de résoudre dans un domaine Ω de frontière Γ l'équation différentielles suivante : $A [U(x, y)] + U_D(x, y)=0$ (II.1)

Avec : A : opérateur différentielle linéaire.

U : est une variable inconnue

U_D : est une fonction connue

La méthode des résidus pondérés consiste à remplacer l'équation (II.1) par la fonctionnelle (W) donnée par l'équation (II.2) telle que $\Psi(x, y)$ sont les fonctions de projection ou de pondération.

$$W = \int_{\Omega} \Psi(x, y) [L[U(x, y)] + U_D] d\Omega \quad (II.2)$$

Si $U(x, y)$ vérifie l'équation (III.2) pour toute $\Psi(x, y)$, l'élément d'une base complète de fonction, donc elle est la solution de l'équation (III.1). (Bouchelghoum & Aid, 2002)

II.3.6/Discretisation des formes intégrale

Parmi les différentes méthodes de choix possible des fonctions Ψ_i on trouve que la plus utilisé est la méthode de **Galerkine**. Cette méthode consiste à remplacer $U(x, y)$ par une approximation polynomiale d'interpolation $N_i(x, y)$ de type suivant : (Alexandre, 2005)

$$U(x, y) = \sum_{i=1}^n N_i(x, y) U_i \quad (II.3)$$

Puis elle fait associer aux fonctions de pondération $\Psi(x, y)$ les fonctions d'interpolation $N_i(x, y)$ du type suivant :

$$\Psi_i(x, y) = N_i(x, y) \quad (II.4)$$

Avec : n : nombre de nœuds dans l'élément choisi

N_i : fonction d'interpolation

U_i : valeur de l'inconnu au nœud i

x, y : sont les coordonnées du nœud i sur lequel U prend la valeur de U_i

Donc l'équation fonctionnelle de (II.2) s'écrit sous la forme suivante :

$$W_i = \int_{\Omega} N_i(x, y) [L(\sum_{i=1}^n N_i(x, y) U_i) + U_D] d\Omega \quad (\text{II.5})$$

Les fonctions d'interpolation $N_i(x, y)$ sont calculés pour que la fonctionnelle W_i soit nulle. En réalité il est difficile d'approcher la fonction $U(x, y)$ par un polynôme du type (II.3) dans tout le domaine Ω . Cela par contre est beaucoup plus facile si l'approche est faite en sous domaine, à condition que l'intervalle total soit divisé en intervalle élémentaire suffisamment petits, on effectue donc une partition de Ω en domaine élémentaire Ω_e ou l'équation (II.5) s'écrit comme suit : (Bouchelghoum & Aid, 2002)

$$W_{ei} = \int_{\Omega_e} N_i(x, y) [L(\sum_{i=1}^n N_i(x, y) U_i) + U_D] d\Omega_e \quad (\text{II.6})$$

$$W_i = \sum_e W_{ei} \quad (\text{II.7})$$

II.3.7/Discretisation du domaine géométrique

La discrétisation du domaine Ω est la première étape de l'analyse par éléments finis. Dans cette étape tout le domaine est subdivisé en nombre finis de petits domaine noté Ω_e avec ($e=1, 2, \dots$ jusqu'à N) ou N est le nombre de sous domaine appelés éléments. Le domaine est découpé en éléments de forme donnée : triangle, quadrilatère, tétraèdre, etc ; l'ensemble de tous les éléments constituent le maillage.

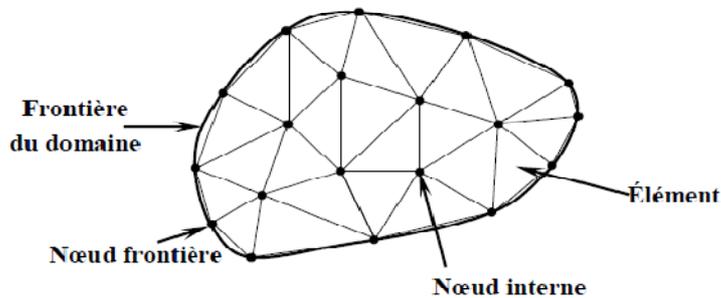


Figure (II.2): Discrétisation du domaine en éléments triangulaires (Seghir, 2005-2014)

La partition du domaine Ω en éléments Ω_e doit respecter les règles suivantes :

- Le recouvrement des deux éléments est exclu
- Un nœud appartenant à deux éléments doit être défini dans chacun d'eux
- Il ne doit pas exister de vide entre les éléments
- L'ensemble de tout les éléments doit constituer un domaine aussi proche que possible du domaine original
- Les angles proche de zéro doivent être évités.

II.3.8/Formulation de la matrice globale et du vecteur global

Cette étape consiste à mettre sous forme matricielle, les formes intégrales de l'équation à résoudre dans chaque domaine élémentaire Ω_e l'équation devient :

$$We = [K]^e \{U\}^e - \{F\}^e \quad (II.8)$$

Ces matrices élémentaires sont assemblées bloc par bloc et vont constituer la matrice globale pour la résolution, la même chose pour les vecteurs des sollicitations global, on aura donc :

$$[k]^g = \sum_e [K]^e$$

$$\{F\}^g = \sum_e \{F\}^e$$

II.3.9/Résolution du système d'équation

La résolution du système d'équation est la dernière étape dans la méthode des éléments finis après l'assemblage et la construction de la matrice globale et du vecteur global, le système d'équation à résoudre aura la forme suivante :

$$[K]\{U\} = \{b\} \quad (II.7)$$

Avec : K : c'est la matrice globale

U : les valeurs inconnues

B : vecteur de valeurs connues

La précision de la méthode des éléments finis est limitée par les dimensions du système que nous voulons résoudre.

II.4/Présentation du maillage :

Un maillage est la discrétisation spatiale d'un milieu continu, ou aussi, une modélisation géométrique d'un domaine par des éléments proportionnés finis et bien définis. L'objet d'un maillage est de procéder à une simplification d'un système par un modèle représentant ce système et, éventuellement, son environnement (le milieu), dans l'optique de simulations de calculs ou de représentations graphiques.

On parle également dans le langage commun de pavage.

Les techniques de génération de maillages sont employées de manière intensive dans de nombreux domaines de l'ingénierie reposant sur des modèles physiques basés sur des systèmes d'équations aux dérivées partielles. La simulation numérique de tels modèles est largement utilisée à des fins de conception, de dimensionnement et de validation.

La première étape d'une simulation est toujours la construction du maillage du domaine de calcul de façon à remplacer cette région par une union d'éléments finis (géométriquement simples ou bornés) selon la dimension spatiale du domaine. (Pascal & Paul-Louis, 1999)

II.4.1/ Génération de maillage

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse, vu l'influence de ses paramètres sur la solution calculée.

La technique de génération de maillage peut être résumée sous la forme suivante :

La géométrie doit être préparée au préalable, avec la définition de tous les composants de la géométrie du domaine d'étude (un barrage dans notre cas), sous forme de données numériques,

La géométrie qui représente les différents domaines fluides est décomposée en sous domaines « maillables ».

Maillages des sous domaines fluides.

La réduction du temps nécessaire à la génération du maillage est un critère de bonne maîtrise de l'utilisation du logiciel et du temps de calcul.

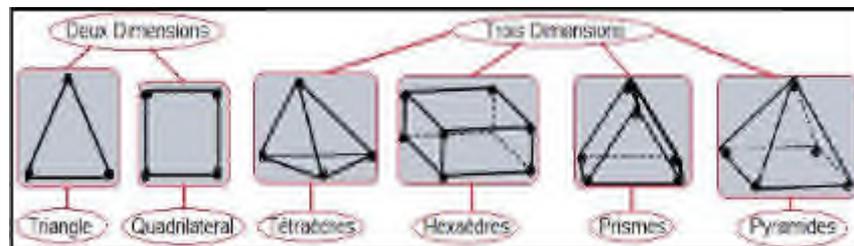


Figure (II.3): Exemples de mailles utilisées dans Comsol

II.4.2/ Composants du maillage

Les composants sont définis dans un processeur : Cellule = volume de contrôle divisant la géométrie

Le domaine de calcul est défini par un maillage qui représente le fluide et les faces solides qui interviennent.

Face = frontière d'une cellule

Edge = frontière d'une face

Node = point de maillage

Zone = groupe de nœuds, face et/ou cellule

Les conditions limites sont assignées aux faces zones.

Les données des matériaux et les termes sources sont assignés aux cellules zones.

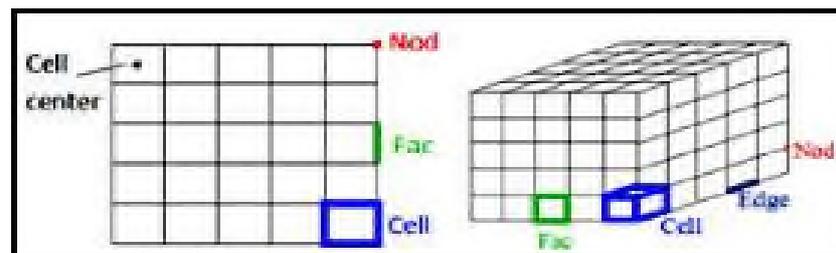


Figure (II.4): Composant d'un maillage

II.4.3/ Choix du type de maillage

- **Maillage structuré (quadra/hexa)**

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie multi bloc. Cette technique consiste à diviser les domaines de calcul en plusieurs compartiments de formes géométriques simplifiées et de les mailler séparément.

- **Maillage non structuré (tri/tétra.)**

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant à leur disposition.

- **Maillage hybride**

Maillage généré par un mélange d'éléments de différents types, triangulaires ou quadrilatéraux en 2D, tétraédriques, prismatiques, ou pyramidaux en 3D.

II.5/Résultats numérique

La simulation numérique a été réalisée avec le logiciel Comsol, tel qu'il a été expliqué précédemment. L'étude est réalisée pour deux cas de caractéristiques différentes et cela dans le but de connaître le fonctionnement de ce logiciel, à commencer par un cas simple représentant les mêmes caractéristiques pour toute la digue, puis un cas avec un noyau central ayant deux types de matériaux de caractéristiques différentes.

Dans chaque cas, on va tracer les lignes de courants, la ligne de saturation et déterminer le débit de fuite.

II.6/Présentation des modèles d'étude numérique :

II.6.1/Modélisation d'une digue simple

Dans le but d'appréhender le logiciel et de connaître ces fonctionnalités, nous avons essayé de simuler un écoulement à travers une digue de barrage simple et homogène de dimensions connues et de forme trapézoïdale.

II.6.1.1/Caractéristique et géométrie du modèle :

Dans ce cas le modèle représente une digue trapézoïdale homogène (Figure II.5) ayant les paramètres représentés dans le tableau ci après.

Tableau (II.1):Caractéristiques du modèle du cas simple

Paramètre	Expression
Longueur à la base Lb	110m
Longueur à la crête Lc	20m
Hauteur H	29.2m
Charge Hydraulique H0	29.2m
Conductivité Hydraulique K	$3.06 \cdot 10^{-7}$ cm/s
Porosité	0.15

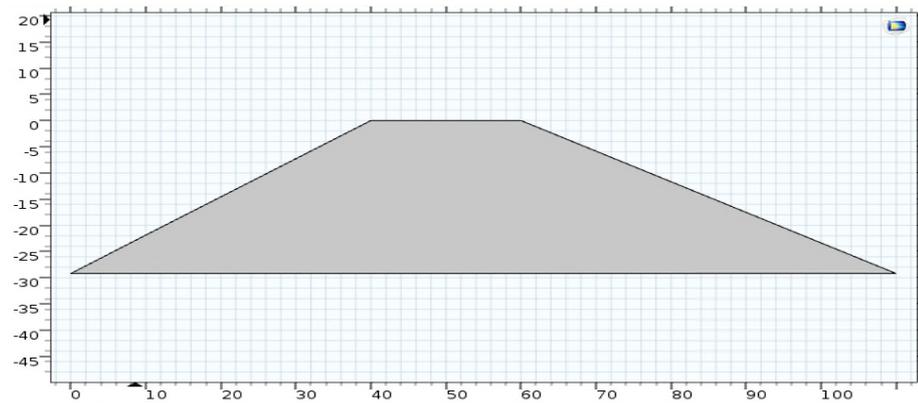


Figure (II.5):Géométrie du cas simple de la digue

II.6.1.2/Equation du domaine :

L'équation de l'écoulement à travers la digue, dans ce modèle, est définie par l'équation de Laplace qui se traduit comme suit :

$$\nabla \cdot (\rho u) = Qm \quad (II.8)$$

II.6.1.3/Conditions aux limites :

a) Charge hydraulique :

La charge hydraulique à l'amont de la digue est $H=H_0$ (Figure II.6).

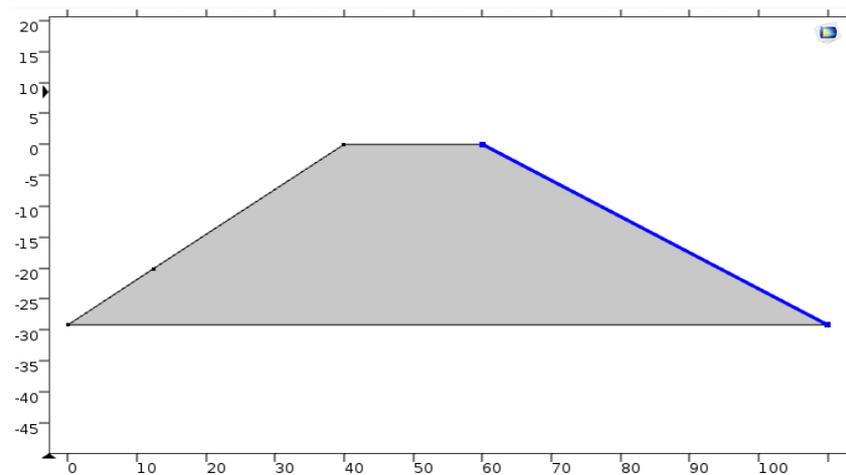


Figure (II.6):Charge hydraulique à l'amont du cas simple

b) Atmosphère Jauge :

Une quantité de mailles a été imposée pour une partie aval (**Figure II.7**).

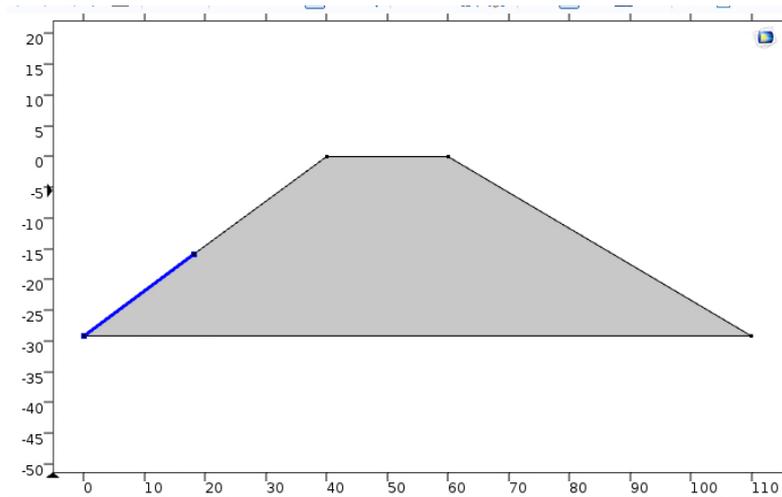


Figure (II.7): Atmosphère jauge à l'aval (cas simple)

c) Flux nul :

L'écoulement est nul à travers la crête, la fondation et la partie restante de l'aval (**Figure II.8**).

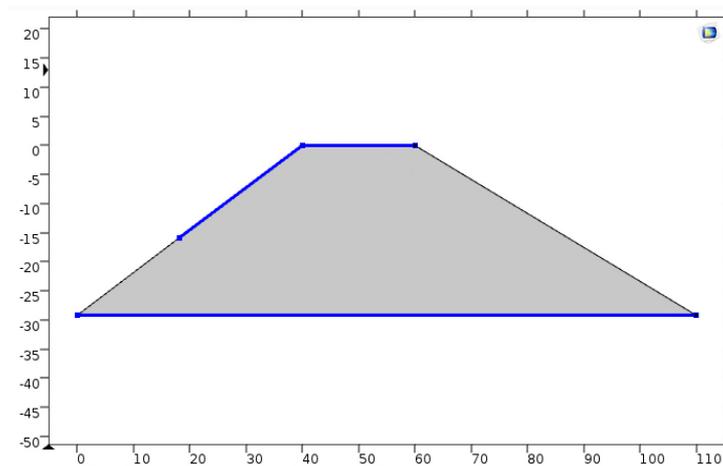


Figure (II.8): Image descriptive des parties où il n'y a pas d'écoulement

Dans ces zones, l'écoulement est exprimé par l'équation suivante :

$$\nabla \cdot (-\nabla H) = 0 \quad (\text{II.9})$$

II.6.1.4/Maillage :

Dans ce modèle, l'écoulement ne se fait pas dans tout le domaine, ce qui nous amène à utiliser le maillage mobile.

Dans paramètre de maillage nous avons choisis les éléments de forme quadrangle et de taille fine (Figure II.9).

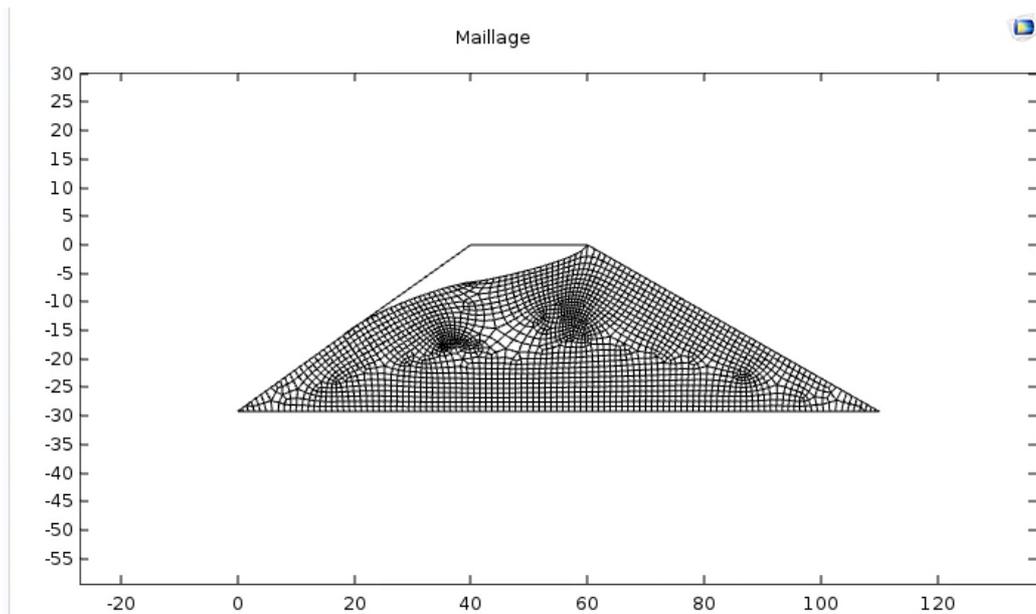


Figure (II.9): Maillage mobile du cas simple

II.6.2/Résultats et discussions

Les résultats obtenus suite à la simulation de la digue simple sont :

- *Les lignes de courants*

Les lignes de courants dans le cas d'une digue simple et homogène sont montrées dans la figure suivante :

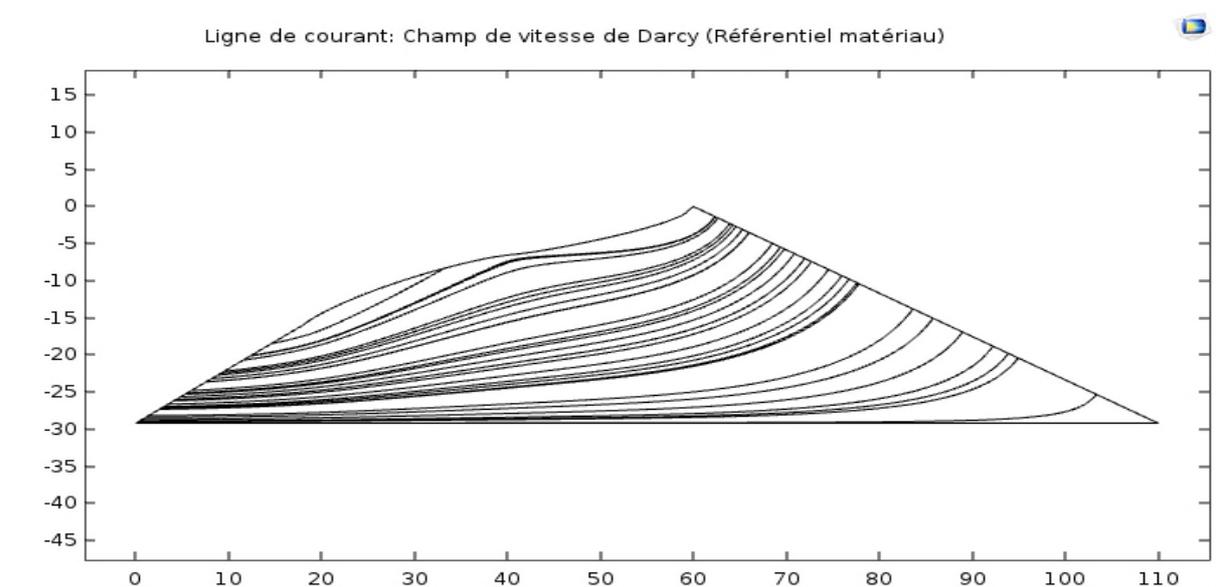


Figure (II.10): Lignes de courants du cas simple

On remarque bien à partir de la figure que les lignes de courants correspondent aux cas communément rencontrés dans la littérature et qu'elles commencent de la hauteur de la charge hydraulique et se dirigent vers l'aval de la digue qui est soumis à la pression atmosphérique.

- **La répartition des pressions**

La répartition des pressions dans la digue simple est tel qu'elle est montrée dans la figure suivante :

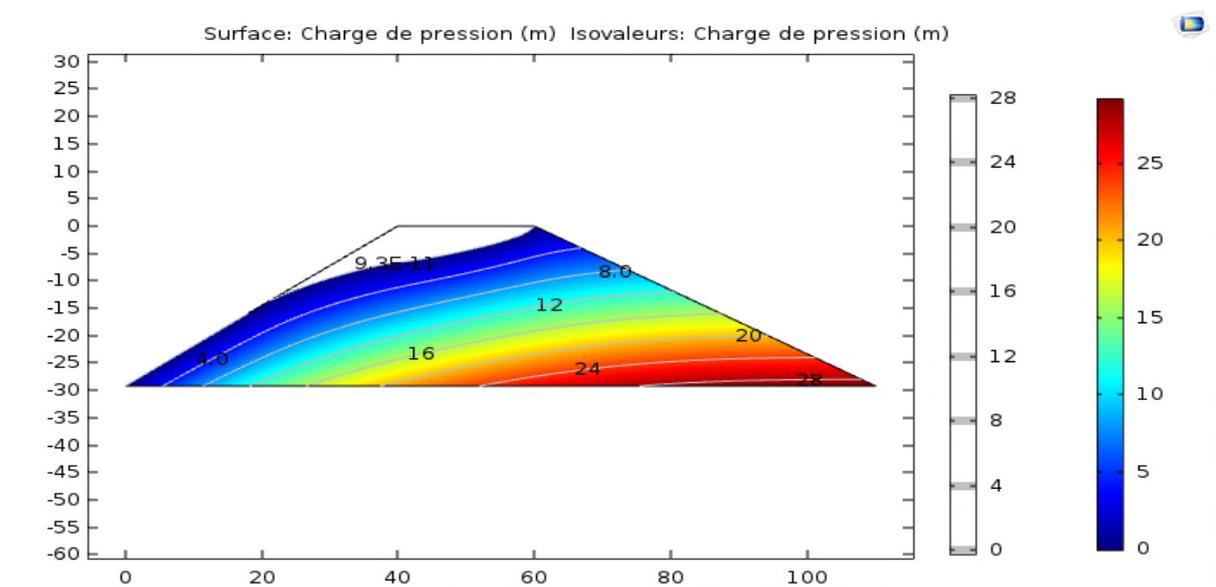


Figure (II.11): Répartition des pressions dans le cas simple d'une digue

D'après la figure on voit bien que les pressions les plus grandes sont a la base et à l'amont de la digue. Plus en haut et plus en aval, la pression diminue jusqu'à atteindre la valeur 0 toute en haut et aussi à l'aval.

- **La ligne de saturation**

Elle est montrée dans la figure suivante :

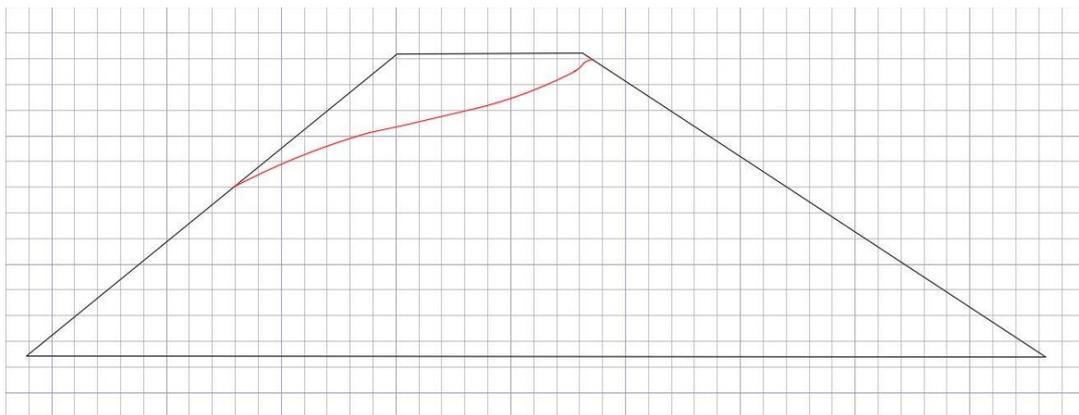


Figure (II.12): Répartition de la ligne de saturation du cas simple

- **Le débit de fuite**

Le calcul du débit de fuite avec Comsol se fait comme suit :

Dans la partie résultats, on sélectionne : quantités dérivées puis intégration sur la ligne et on insère l'équation du débit qui suit : $dl.u*nx+dl.v*ny$ c'est intégration sur X et sur Y et le résultat est en unité de surface (m^2/s)

Le résultat obtenu pour ce cas est : $Q=2.060843268099623*10^{-8} m^3/s/ml$

- **Comparaison entre la ligne de saturation numérique et analytique :**

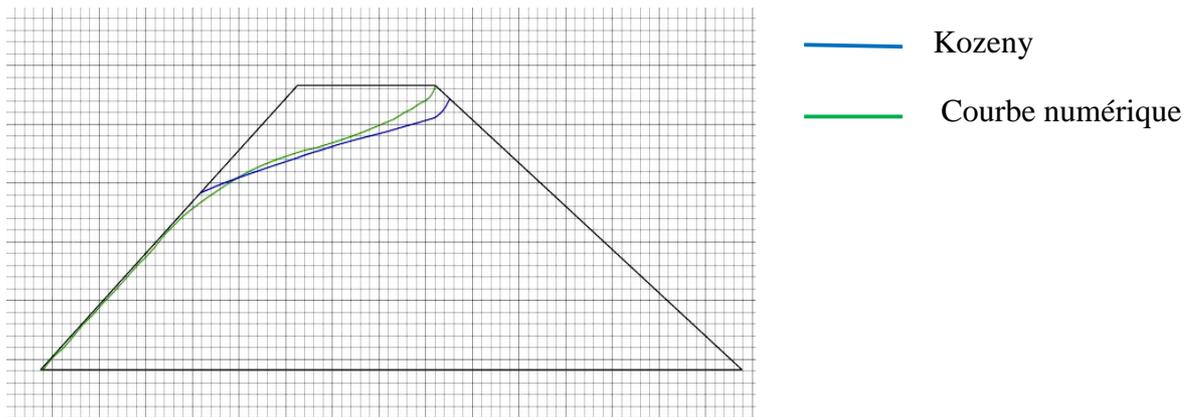


Figure (II.13): Représentation des résultats donnés par les deux méthodes

La figure (II.13) montre les résultats obtenus avec les deux méthodes utilisées pour tracer la ligne de saturation, analytiquement par la formule de Kozeny expliquée précédemment (Chapitre I. session 7.1) et numériquement sous Comsol. On remarque que les deux lignes suivent la même allure.

II.6.3/Modélisation d'une digue avec noyau central

Afin de nous approcher d'un cas d'étude de barrage réel nous avons cette fois modélisé numériquement un écoulement dans une digue avec noyau central, soit un barrage avec une zone imperméable comme noyau au centre.

Nous avons, dans ce cas, diminué la charge hydraulique à l'amont jusqu'à $H_0=25m$ et ajouté un noyau à la digue simple ayant les caractéristiques représentées dans le tableau suivant.

Tableau (II.2): Caractéristiques du noyau central

Paramètre	Expression
Longueur à la base l_b	20m
Longueur à la crête l_c	5m
Hauteur h	29.2m
Conductivité hydraulique k	$K/3$

II.6.3.1/Géométrie :

La géométrie de ce modèle est représentée dans la figure (II.14).

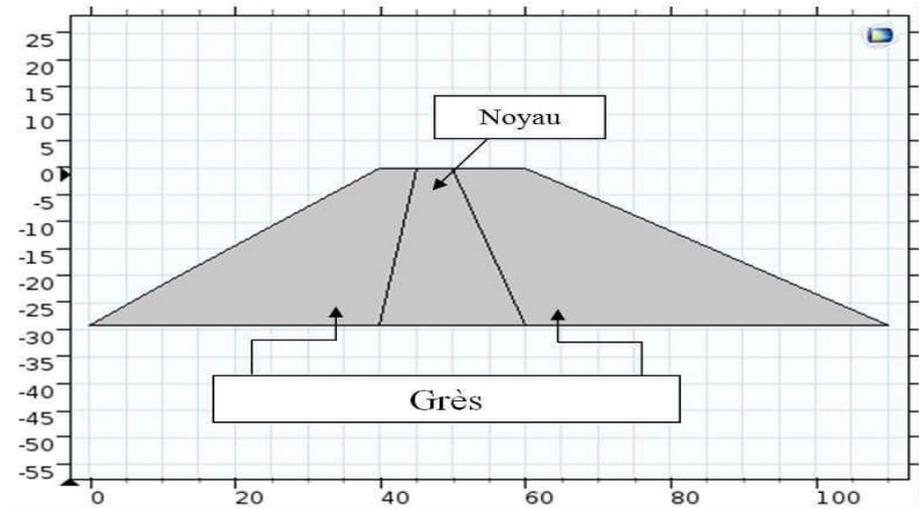


Figure (II.14): Géométrie du cas intermédiaire

II.6.3.2/Conditions aux limites :

a) Charge hydraulique :

La charge hydraulique à l'amont de la digue est $H=H_0$ (Figure II.15).

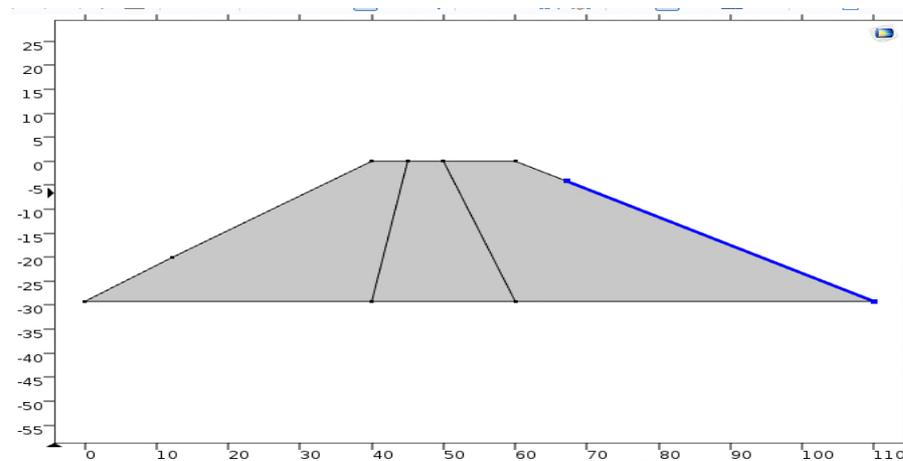


Figure (II.15): Charge hydraulique à l'amont dans le cas d'une digue avec noyau

b) Atmosphère Jauge :

La même quantité de mailles a été imposée pour cette partie aval (Figure II.16).

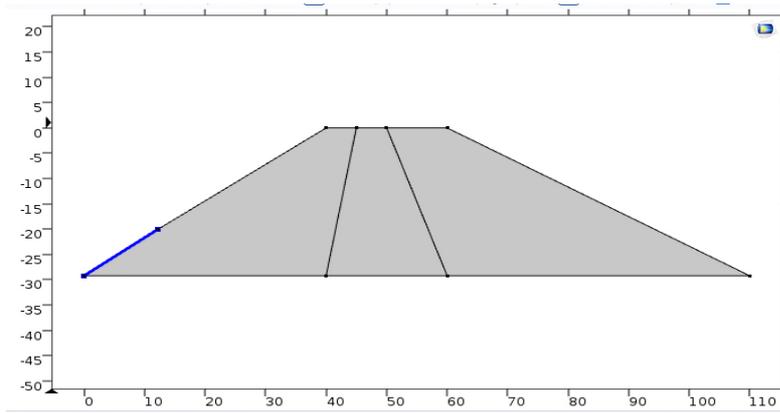


Figure (II.16): Atmosphère jauge à l'aval

c) Flux nul :

La Figure (II.17) représente les zones où l'écoulement est nul

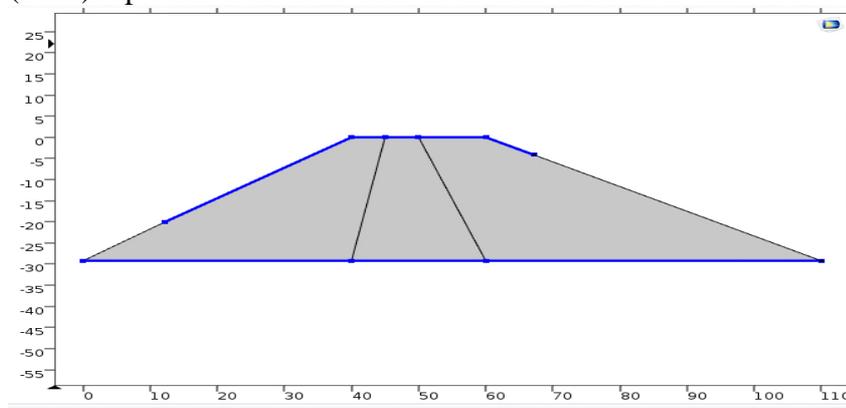


Figure (II.17): Image descriptive des parties où il n'y a pas d'écoulement

II.6.3.3/Maillage :

Pour ce modèle, les éléments choisis sont triangulaires de taille fine. Le maillage mobile est utilisé avec les mêmes conditions de déplacement que celles du modèle du cas simple (Figure II.18).

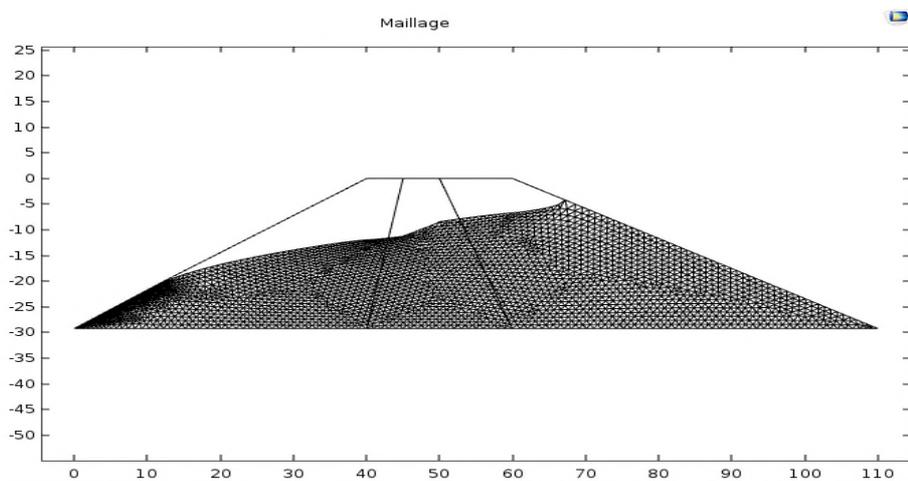


Figure (II.18): Maillage mobile de la digue avec noyau

II.6.4/Résultats et discussions

- *Lignes de courants :*

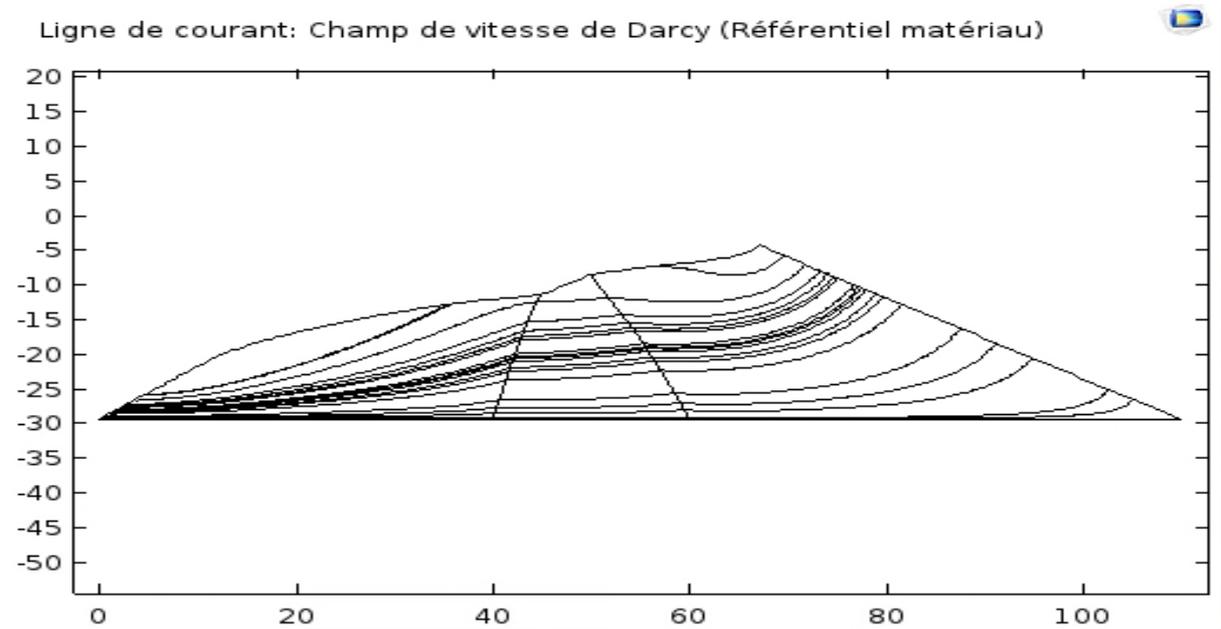


Figure (II.19):Lignes de courants pour le cas avec noyau

Dans ce cas on remarque que les lignes de courants sont descendantes formant des paraboles avant de pénétrer dans le noyau puis tendent à se stabiliser et prendre une forme linéaire à l'intérieur du noyau. En sortant du noyau, elles reprennent leur forme parabolique, et cela est dû au fait que la perméabilité à l'intérieure du noyau est très faible.

- *La répartition des pressions*

Elle est représentée dans la figure suivante :

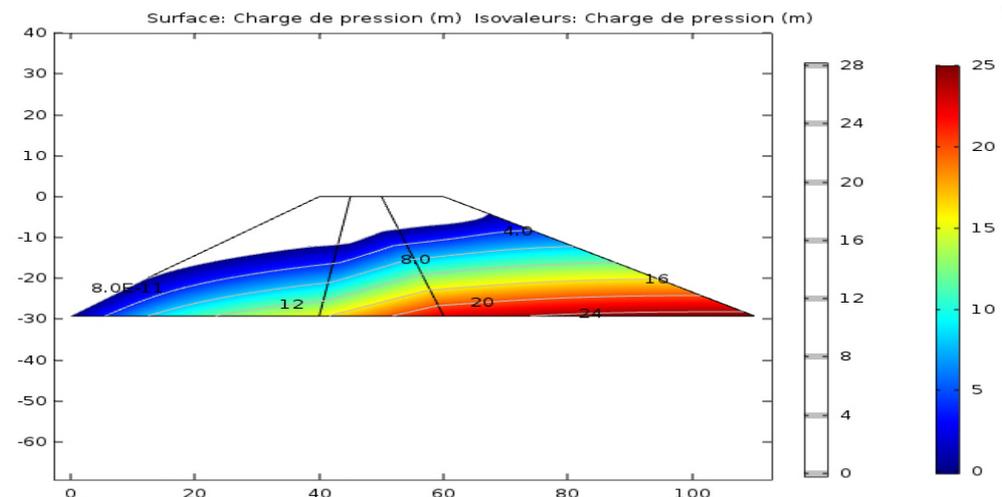


Figure (II.20):Répartition des pressions pour le cas d'une digue avec noyau

- **La ligne de saturation**

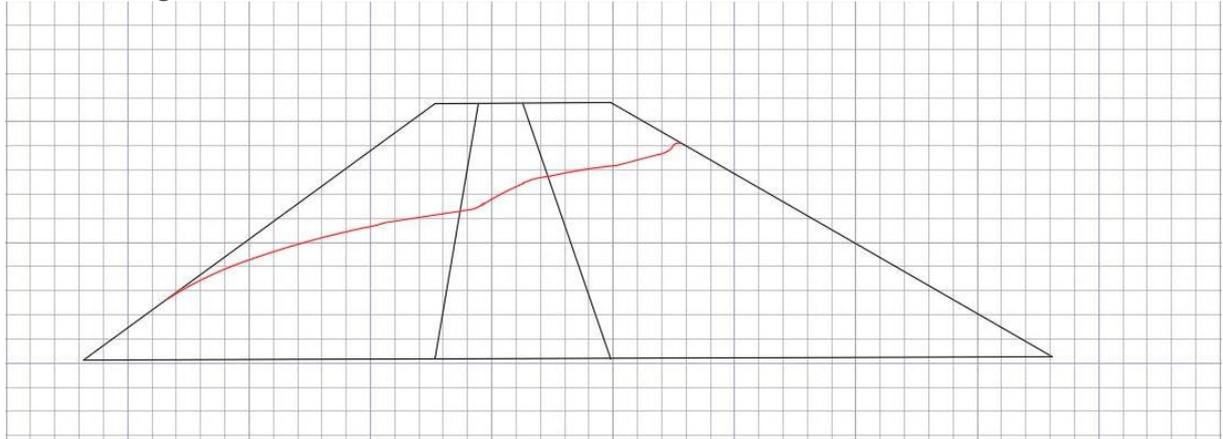


Figure (II.21): Représentation de la ligne de saturation pour le cas d'une digue avec noyau

- **Le débit de fuite**

En suivant les mêmes étapes que précédemment le résultat est de :

$$Q = 1.31818173607511 * 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s/ml}$$

On remarque que le débit pour ce cas est plus faible que dans le cas d'une digue simple, et cela est dû à la présence du noyau de très faible perméabilité qui empêche l'eau de pénétrer.

II.7/Conclusion :

Après avoir présenté le logiciel de calcul et ses fonctionnalités nous l'avons utilisé dans le but de simuler l'écoulement dans différents types de barrages, un cas simple et un cas avec noyau central. Dans le chapitre suivant, on va simuler l'écoulement dans une digue de barrage réel.

Chapitre III :

*Simulation de l'écoulement dans le cas d'un barrage
réel*

III.1/Introduction

Dans ce chapitre, on va analyser l'écoulement à travers la digue d'un barrage réel en cours de construction et on va calculer le débit de fuite, et déterminer le réseau d'écoulement composé de lignes de courants et de ligne de saturation.

III.2/Modélisation d'un cas réel de barrage en construction

Pour la détermination d'un débit de fuite, et le traçage des lignes de courants et de la ligne de saturation d'un barrage réel en construction nous avons le barrage de Souk Tleta à Tizi Ouzou qui est un barrage composé de plusieurs zones avec des caractéristiques différents ;

III.2.1/ Présentation du barrage

Le site de ce barrage nommé Souk Tleta est situé sur l'oued Bou-Gdoura à l'aval du confluent d'Acif Tleta et Thala Imedrane à 8km au sud de Draa Ben Khedda et à 80km environ à vol d'oiseau d'Alger dans la direction Est.

L'aménagement de souk Tleta est destiné principalement à alimenter en eau potable la ville d'Alger ; Boumerdes et satisfaire leurs besoins industriels et intervient aussi à couvrir les besoins en irrigation de la plaine de Mitidja.

L'ouvrage est un barrage en terre zonée projetant une retenue qui permet, par un volume utile de 77.5hm^3 , de régulariser un volume $98\text{ hm}^3/\text{an}$ (98 millions m^3/an).

Ce barrage est constitué initialement de deux digues ; une digue principale et une digue de col construite du côté gauche du site et c'est cette digue qui nous intéresse essentiellement.

Notre digue a une hauteur de **29.2 m** et une longueur de couronnement de 448m environ ayant une crête de 6m de large. Cette digue sera réalisée dans le but de fermer la retenue sur la rive gauche. Cette digue est constituée d'une recharge d'alluvions à l'amont recouverte par des enrochements, un noyau central étanche à base d'argile puis d'une recharge en grés désagrégés vers l'aval recouvert par la terre végétale. Elle est aussi équipée d'un système de filtration et de drainage. (Marché du barrage)

La figure suivante montre la géométrie générale de la digue :

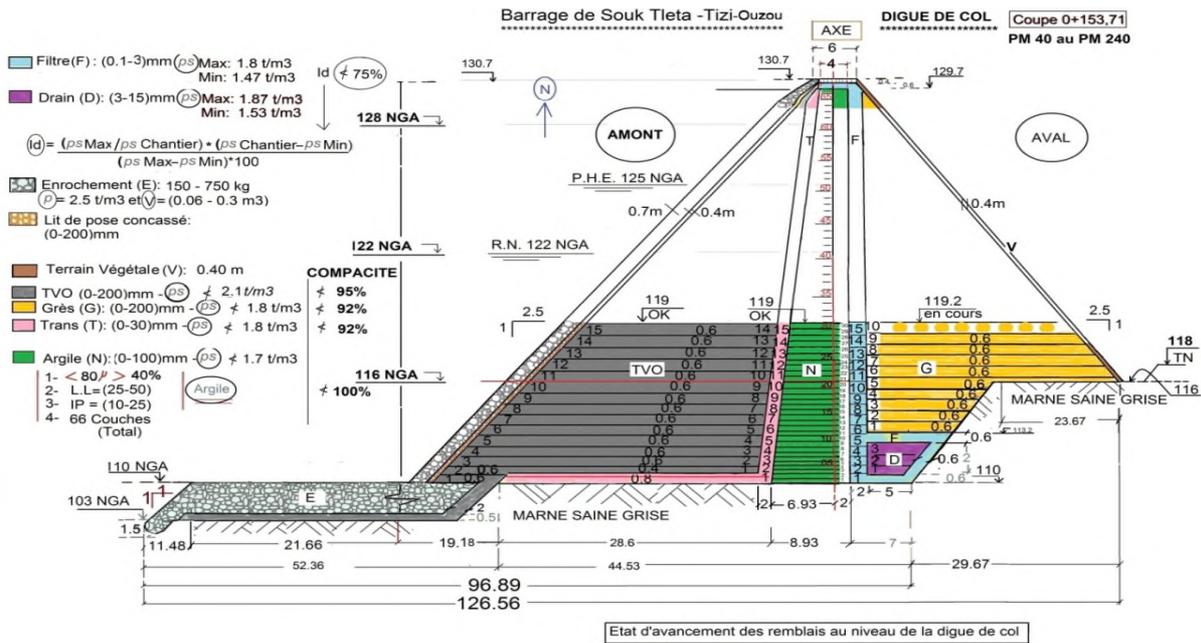


Figure (III.1): Schéma représentatif de la digue

La digue de ce barrage est en terre composé de plusieurs zones de différents matériaux de différents caractéristiques granulométriques et hydrauliques, comme le montrent les figures suivantes :



Figure (III.2): Image qui montre les différents matériaux composants de la digue

On trouve notamment de coté amont vers l'aval:

- Un parement amont en enrochement.
- Lit de pose concassé
- Une zone en TVO
- Une couche de transition
- Un noyau en argile
- Un filtre
- Une couche de grès
- Un drain
- De la terre végétale

Caractéristiques de chaque couche

On résume ci après les caractéristiques des sols (des remblais) qui nous intéressent pour l'étude des écoulements et de l'infiltration à travers le corps du barrage.

Ces valeurs sont obtenues de l'interprétation des résultats des essais effectués sur le site par les ingénieurs du projet.

Tableau (III.1): Tableau qui montre les caractéristiques de chaque couche (Laboratoire du barrage)

Description	Poids spécifique [kg/m ³]	La porosité [-]	La conductivité Hydraulique [m/s]
La roche	2600	0.5	$2 \cdot 10^{-2}$
Le lit de pose	2200	0.15	$3.06 \cdot 10^{-9}$
TVO	2100	0.15	$3.06 \cdot 10^{-9}$
La transition	2100	0.10	$3.06 \cdot 10^{-9}$
L'argile	2000	0.001	$1.02 \cdot 10^{-11}$
Le filtre	2100	0.4	10^{-2}
Les grès	2300	0.4	10^{-2}
Le drain	2100	0.4	10^{-2}
La terre végétale	1900	0.4	10^{-2}

Note : Il est à noter que la hauteur amont de l'eau est estimée au environ de 25m

III.2.2 /Modélisation :

a. La géométrie :

La géométrie de la digue est représentée dans la figure (III.3).

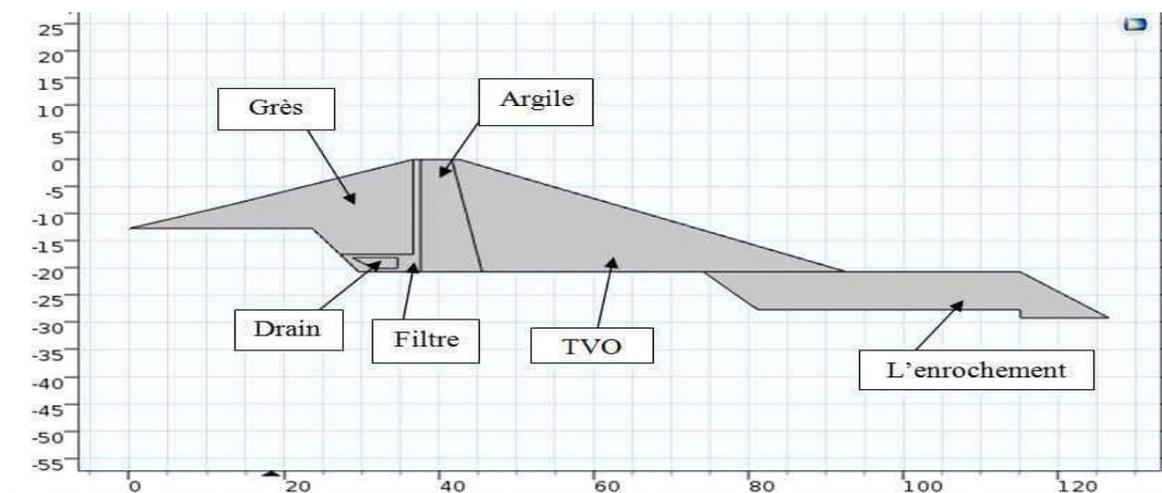


Figure (III.3): Géométrie de la digue de col de Souk Tleta sous Comsol

b. Condition aux limites du modèle :

- **Charge hydraulique :**

Comme dans le barrage réel, nous avons introduit une charge hydraulique de $H_0=25\text{m}$ à l'amont pour ce modèle (Figure III.4).

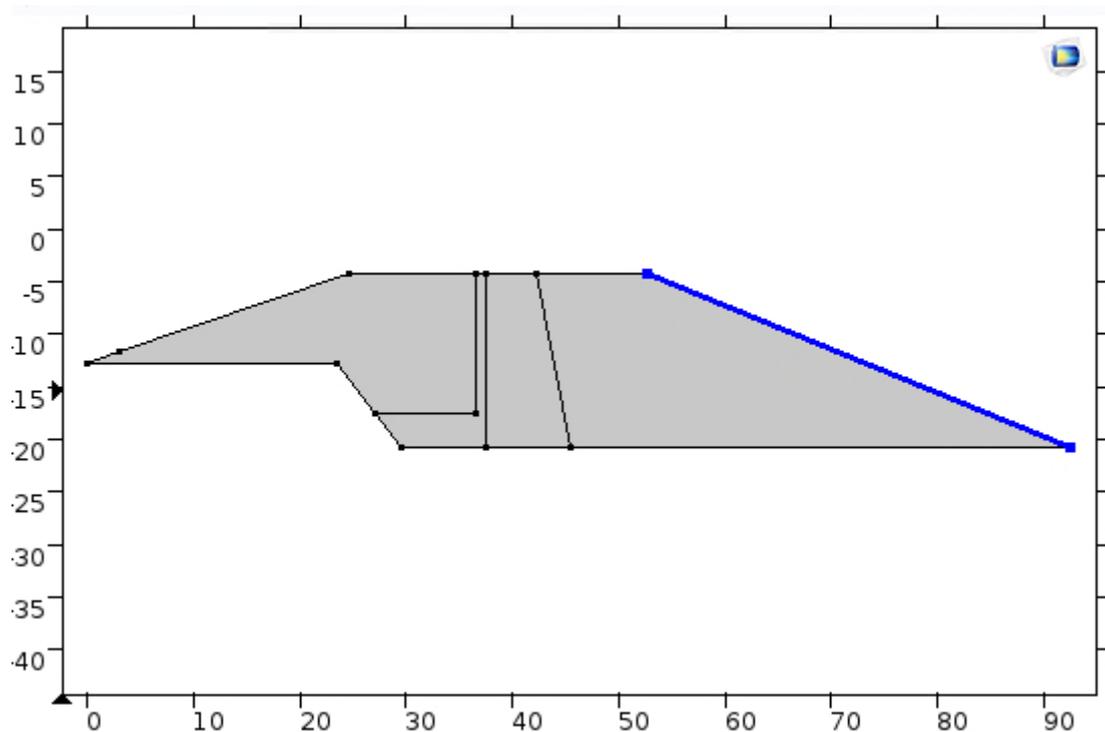


Figure (III.4): Charge hydraulique

- **Atmosphère Jauge :**

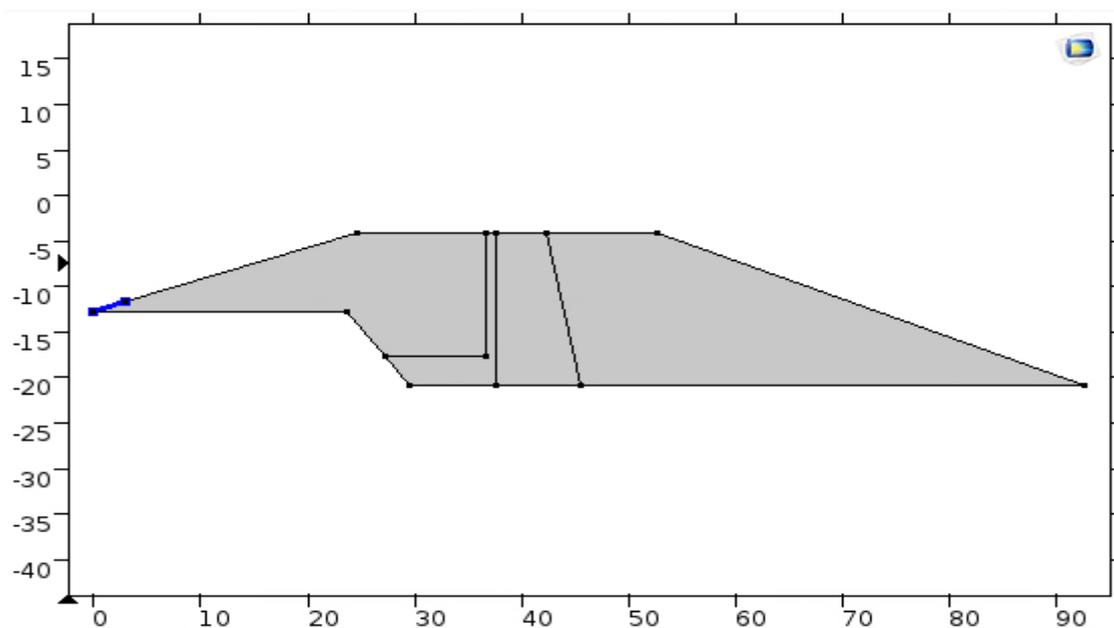


Figure (III.5): Atmosphère jauge

- Flux nul :

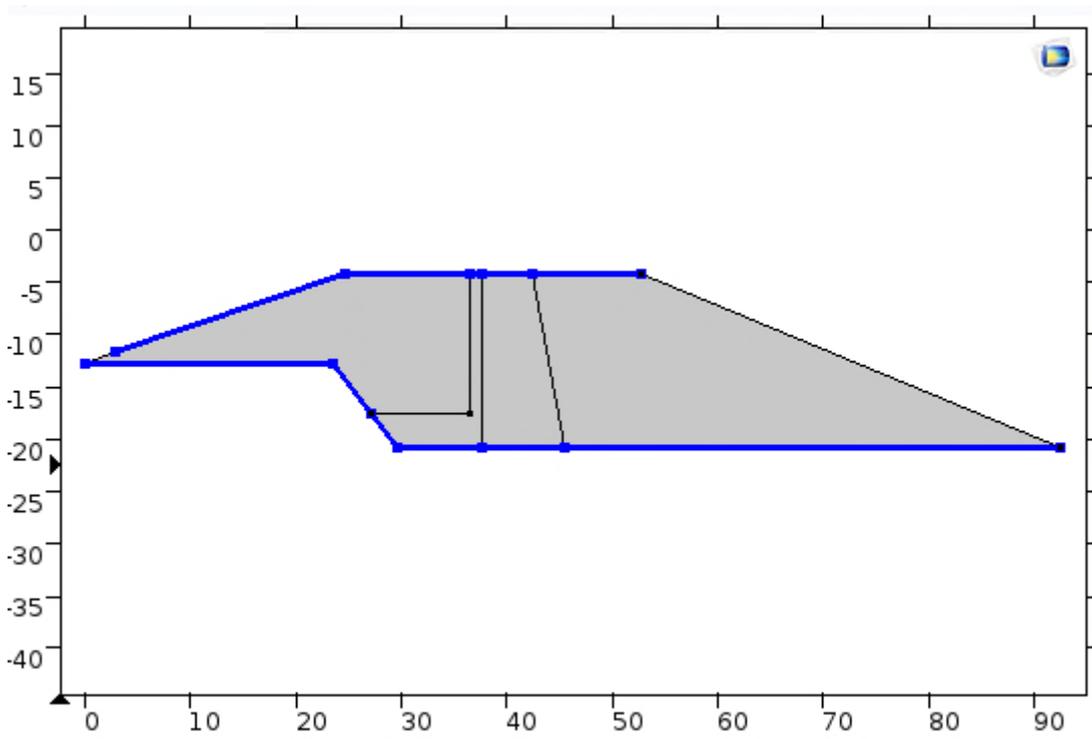


Figure (III.6): Les zones de flux nul

III.2.3/Maillage choisie :

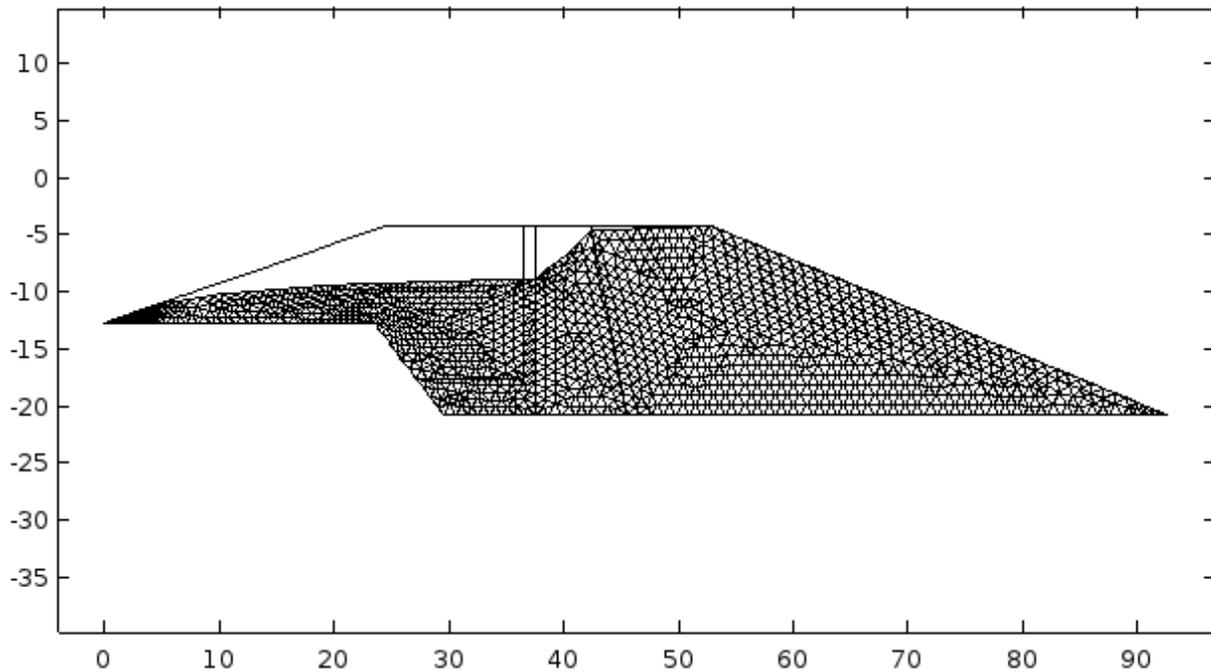


Figure (III.7): Le maillage mobile du cas de la digue réel

III.3/Résultats et discussions

Les résultats obtenus dans ce cas d'étude sont présentés ci-après :

- *Les lignes de courants :*

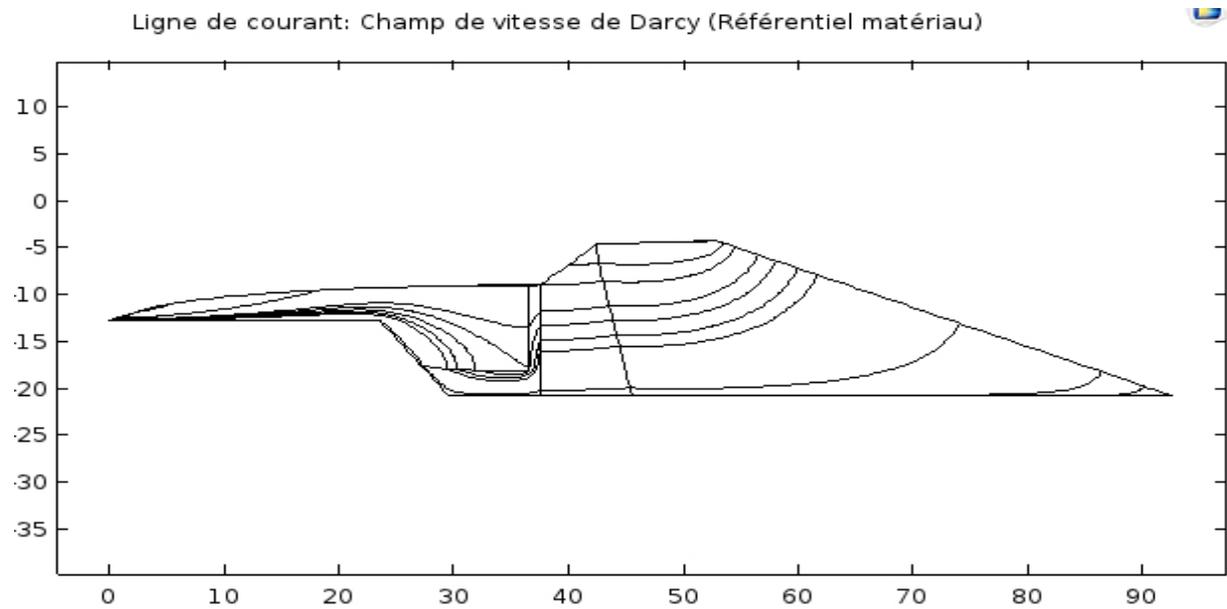


Figure (III.8): Représentation des lignes de courants pour le cas réel

- *La répartition des pressions*

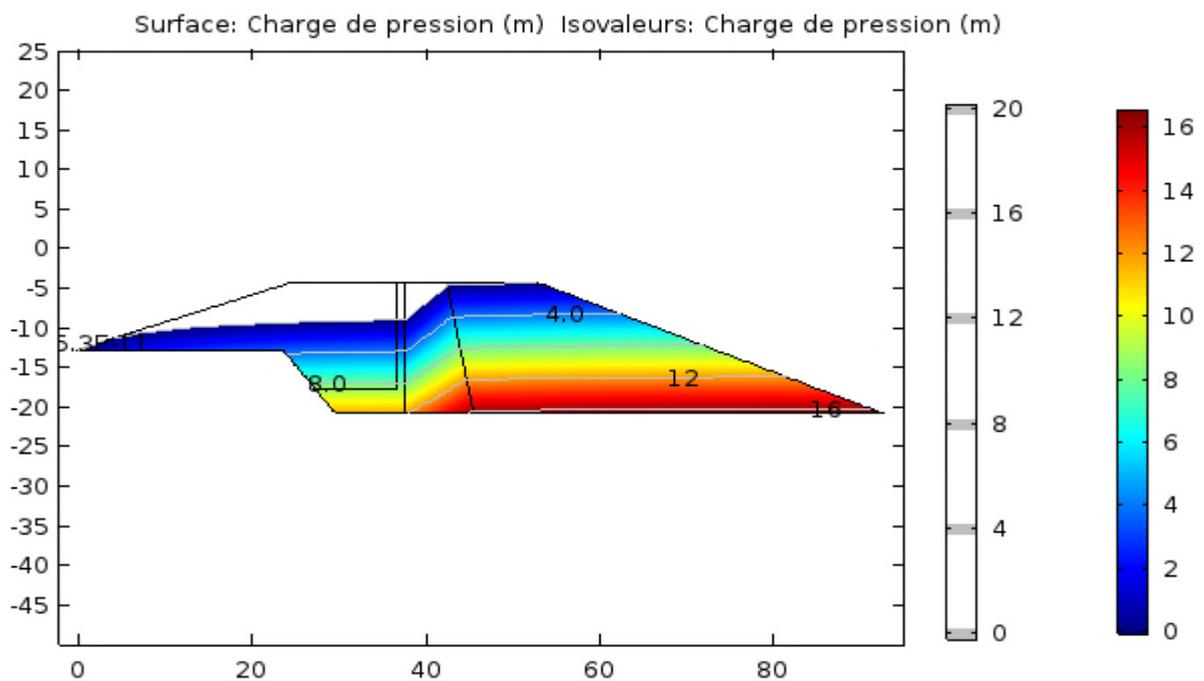


Figure (III.9): Représentation des pressions dans le cas de la digue de Souk Tleta

III.2.3.3/La ligne de saturation

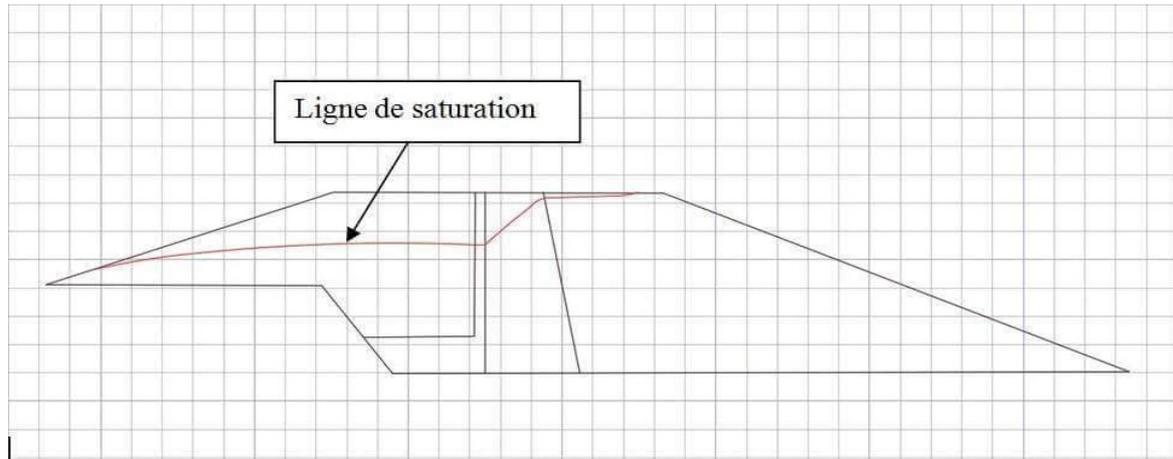


Figure (III.10): Représentation de la ligne de saturation de la digue réelle

III.2.3.4/Calcul du débit de fuite

La valeur trouvée du débit de fuite dans ce cas est de :

$$Q = 5.6084 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s/ml}$$

Le débit a encore diminué pour ce cas grâce au fait que la perméabilité diminue d'une zone à une autre.

III.4/La variation de la vitesse de l'écoulement entre les différentes couches de la digue :

Afin de connaître la répartition des vitesses de Darcy dans chaque couche de la digue de ce barrage et de les comparer, une coupe est réalisée dans chaque partie de la digue dans le but de déterminer la vitesse spécifique à l'écoulement de l'eau de chaque matériau

La vitesse est exprimée en fonction des coordonnées y (m)

Avec :

- (a) Représente la vitesse de Darcy dans la TVO
- (b) Représente la vitesse de Darcy dans le noyau d'argile
- (c) Représente la vitesse de Darcy dans filtre
- (d) Représente la vitesse de Darcy dans les grés

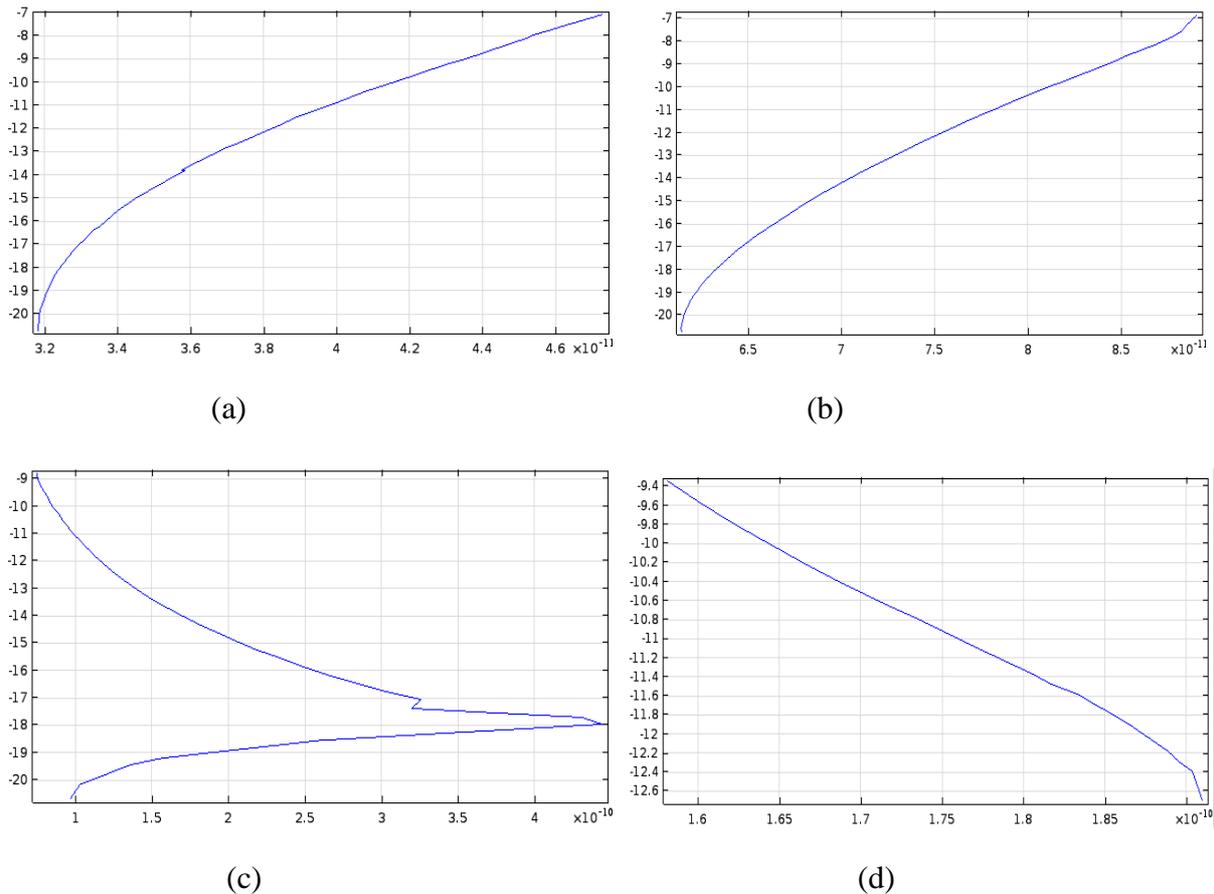


Figure (III.11): Représentation de la répartition des vitesses dans chaque couche de la digue

D'après les résultats obtenus on distingue bien que l'eau pénétrante dans la digue du barrage se déplace avec des vitesses différentes en fonction de la nature du matériau à travers lequel elle passe et en fonction aussi de la hauteur de la digue.

On remarque que l'allure de la courbe dans le TVO et le noyau est presque la même, il y'a une diminution de la vitesse en fonction de la profondeur.

Dans le filtre (c) les vitesses augmentent jusqu'à un pic de $4.5 \cdot 10^{-10}$ m/s enregistré au niveau de $y=18\text{m}$ ce qui correspond à l'emplacement du drain, puis elles diminuent progressivement.

Dans les grés la vitesse augmente en fonction de la profondeur jusqu'à atteindre la valeur de $V \approx 1.92 \cdot 10^{-10}$ m/s qui correspond au point où s'exerce la pression atmosphérique.

III.5/Conclusion

A la fin de ce chapitre, on conclut que l'étude des écoulements (des infiltrations) à travers le corps d'un barrage est une étude compliquée mais très importante pour les projets de réalisation de barrage, car elle peut éviter des complications vers l'avenir et des dangers très importants.

Partie 2 :

Caractérisation de l'érosion interne dans un échantillon d'argile

Chapitre IV:

Présentation du phénomène de l'érosion interne

Deuxième partie

IV.1/Introduction

Au sein des ouvrages hydrauliques, l'écoulement de l'eau peut induire à une migration de particules solides provoquant une modification des propriétés mécaniques et hydrauliques, ce phénomène s'appelle l'érosion interne.

L'érosion interne d'un sol est un phénomène complexe représentant une source importante de problèmes puisqu'il est directement lié à la sécurité des digues et des barrages. Ce phénomène qui se traduit par l'apparition de fuites très graves dans les ouvrages hydrauliques, est l'un des causes majeures de leur rupture. La survenance de tels accidents peut engendrer des pertes matérielles et en vies humaines désastreuses. Elle peut aussi avoir des conséquences dramatiques sur le plan socioéconomique.

Plusieurs études ont mis en lumière ce problème, on cite notamment Moore et Masch(1962), Fry *et al* (1997), Foster *et al*(2000), Bendahmane(2005) et Bonelli et al(2007) ; cependant, il demeure un phénomène mal connu de part sa complexité et sa difficulté à être détecté dans les ouvrages, car il fait appel à un ensemble de phénomènes interdépendants liés au matériau et au fluide ce qui préoccupe les spécialistes qui tentent de le faire connaître et de le modéliser.

C'est pourquoi, il est important de bien comprendre ce phénomène et les processus qui conduisent à son apparition afin de développer un modèle qui permettra de minimiser son apparition dans le but d'assurer une sûreté efficace et permettre de maintenir ces ouvrages plus longtemps et dans les bonnes conditions de fonctionnement.

IV.2/Définition de l'érosion interne

L'érosion interne est un endommagement progressif qui se produit dans les sols non cohésifs sous l'action de l'écoulement d'un fluide. C'est un processus selon lequel les particules empreintes des voies de migrations préférentielles. Cette migration engendre une modification des caractéristiques hydrauliques et mécaniques du matériau constituant l'ouvrage et surtout la modification de la perméabilité, cette perturbation de la caractéristique intrinsèque essentielle peut créer une perte d'étanchéité ou une suppression interstitielle. Une telle modification dans ce milieu poreux peut engendrer une rupture directe et brusque de l'ouvrage en question.

Pour que ce phénomène apparaisse deux conditions doivent être réunies selon Fry *et al* (1997) : l'arrachement des particules du sol et leur transport.

La figure suivante représente un cas réel de la rupture du barrage du Teton en 1976



Figure (IV.1) : Exemple de rupture d'un barrage par érosion interne (Teton 1976)

IV.3 /Les phases d'apparition de l'érosion interne

L'érosion interne est un phénomène extrêmement difficile à localiser, et lorsqu'il est pressentie ou identifié on ne peut pas prévoir le temps que va prendre l'ouvrage jusqu'à la rupture, il peut aller de quelques heures à quelques années jusqu'à la formation complète de la brèche, ce phénomène se développe suivant quatre étapes d'après Foster et Fell (2001) :

IV.3.1/L'initiation

L'initiation représente le fait que la sollicitation hydraulique est supérieure à un seuil d'érosion, cette phase se manifeste quand un phénomène de détachement de particules apparaît.

L'initiation est la première étape d'apparition de ce phénomène, cette partie est favorisée par :

- La présence d'un chemin d'infiltration ou d'une source d'eau au sein de l'ouvrage.
- L'existence de matériaux érosifs à l'intérieur de ce chemin et transportables par le flux d'infiltration.
- L'absence de protection qui aura pour but de retenir ces particules (ex, filtres).

IV.3.2/La filtration

Cette étape dépend de la présence ou non d'un filtre dans l'ouvrage construit car, comme il a été signalé précédemment, l'arrachement des particules seul ne suffit pas pour provoquer l'érosion, en effet la présence des filtres et des drains dans les constructions permet de retenir les particules arrachées et de les réarranger en forme de voûte dans les zones appelées « Zones d'auto-filtration » ; mais ce n'est pas souvent le cas surtout dans les anciens ouvrages et l'absence de ces filtres contribuerait à la progression de l'érosion dans le domaine (Foster *et al.*, 2000).

IV.3.3/la progression de l'érosion

Cette étape définit l'évolution graduelle vers le côté amont du barrage du détachement des particules qui sont transportées par le flux d'infiltration, elle est générée par le transport des particules et dépend du gradient hydraulique.

IV.3.4/La formation de la brèche

C'est la dernière étape de l'érosion interne dans les ouvrages hydrauliques ; elle résulte de la circulation de l'eau du réservoir, principalement de l'amont vers l'aval en suivant des trajectoires aléatoirement définies. Cette étape est suivie par la rupture du barrage.

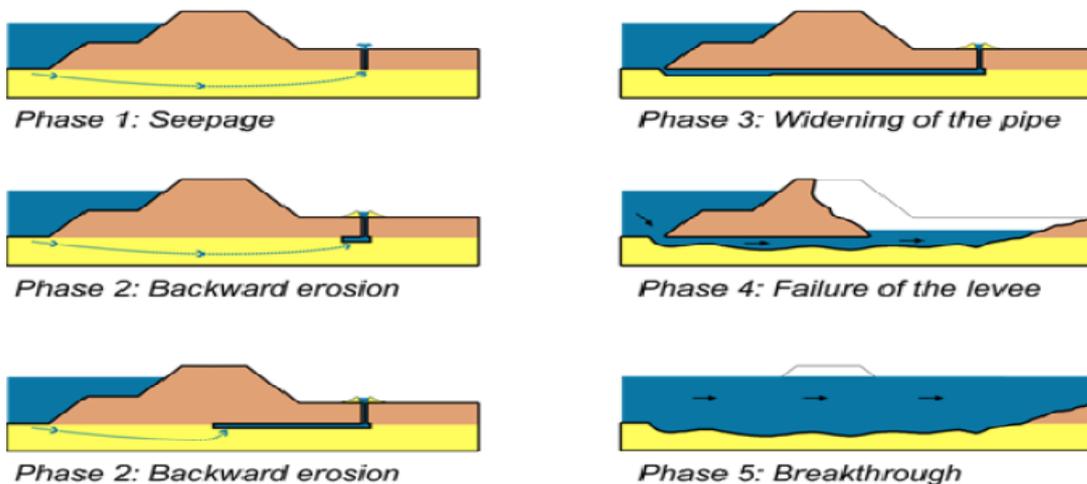


Figure (IV.2) : Illustration des différentes phases de progression de l'érosion interne (Beek *et al.*, 2011)

IV.4/Mode de transport des particules érodées

Comme il a été dit précédemment pour que le phénomène d'érosion apparaisse deux conditions doivent être respectées : l'arrachement des particules et leurs transports. La nature de transport va nous conduire à distinguer deux types fondamentaux pour ce phénomène :

- Le transport dans un conduit : Le renard.
- Le transport dans un milieu poreux inter-particulaire : La suffusion.

Ces types de transport diffèrent par leurs conditions géométriques et hydrauliques.

IV.4.1/Le renard (Piping)

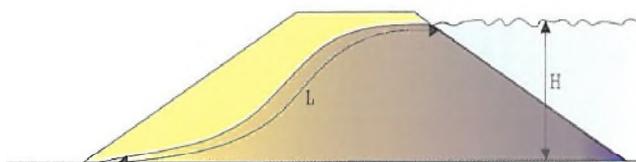
C'est le type de transport le plus dangereux, s'il n'est pas été pris en charge immédiatement, il peut provoquer la rupture du barrage dans une période très courte.

Ce terme évoque les trous laissés par les renards au sol lorsqu'ils creusent, et son équivalent en anglais veut dire conduite.

Il s'agit en fait d'un cheminement préférentiel le long duquel sont répartis un certain nombre de points faibles. Il se produit alors un arrachement régressif de particules qui prennent une trajectoire aléatoire, jusqu'à la formation d'un conduit continu.

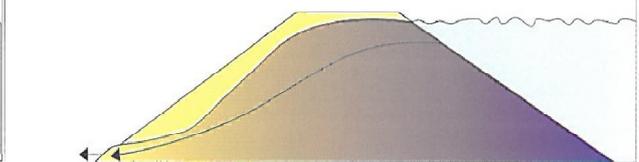
Mécanisme du renard hydraulique (ou érosion interne régressive) :

Avec l'augmentation du niveau d'eau amont (H), le remblai se sature progressivement. Le gradient hydraulique (H/L) augmente.



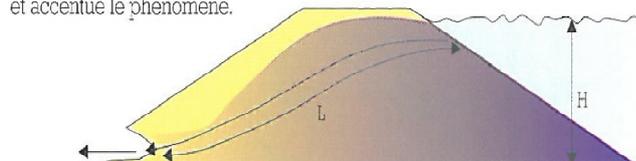
Quelques minutes après :

Le long des lignes de courant préférentiel, un écoulement se crée, générant une petite fuite à l'aval de l'ouvrage.



La fuite est établie

et des matériaux peu cohésifs du remblai sont entraînés par l'écoulement au débouché de la fuite. Progressivement, le chemin hydraulique se raccourcit, le gradient hydraulique (H/L) augmente et accentue le phénomène.



La fuite s'agrandit,

les matériaux entraînés par l'eau de fuite laissent un vide, développant une cavité qui se propage vers l'amont et s'élargit à l'aval. La galerie ainsi formée peut traverser entièrement l'ouvrage et conduire à sa ruine en une ou plusieurs crues successives.

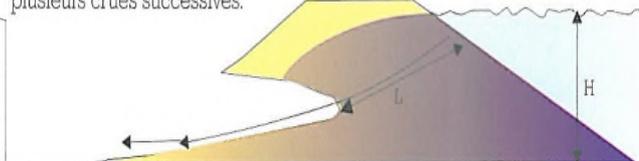


Figure (IV.3): Représentation du phénomène du Renard

IV.4.2/La suffusion (suffosion ; segregation piping)

Ce type de transport est sélectif ; les particules fines sont emportées par l'écoulement qui laisse en place les particules structurales, qui constituent le squelette du sol, dans un premier temps. Lorsque le gradient hydraulique est suffisamment important, ces particules seront à leur tour emportées.

La suffusion est le résultat d'une redistribution des particules fines dans le sol sans modification du volume solide du sol. Contrairement au renard, la suffusion agit beaucoup plus lentement, avec des vitesses d'écoulement initialement peu élevées et un transport solide en suspension en modifiant peu à peu la perméabilité du milieu, cela permet sa détection et sa limitation dans le temps.

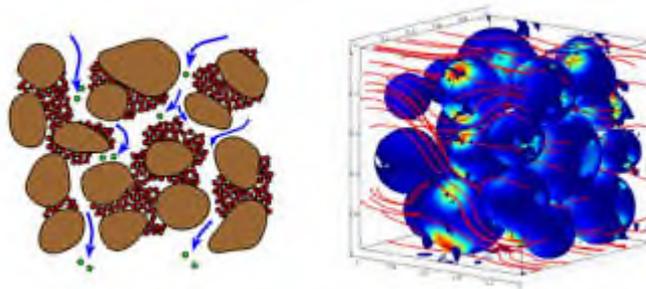


Figure (IV.4): Décrochage, transport et dépôt de la fraction solide fine d'un sol sous l'action érosive de l'eau au cours du phénomène de suffusion (à gauche) et modélisation par méthode couplée DEM-PFV (à droite)

IV.5/Critères pour l'estimation de l'initiation et le développement de l'érosion interne

Pour l'estimation de l'initiation et du développement de l'érosion plusieurs critères ont été proposés par des chercheurs dans le domaine, ces approches reposent principalement sur l'étude granulométrique des matériaux ou sur l'évaluation du gradient hydraulique.

IV.5.1/Critère granulométrique

Kenny *et al*, (1985) ont élaboré une méthode basée sur l'allure de la courbe granulométrique de matériaux granulaires ou à faible proportion de fines, en considérant la capacité des gros grains à s'opposer à l'érosion des grains plus petits, cette étude a été validée par la suite par d'autres chercheurs, exemple Monnet (1998).

Dans le but de réduire le risque d'érosion de trou (renard) un filtre est placé au parement aval du barrage, mais la présence de ce filtre peut aggraver la situation s'il n'est pas bien dimensionné c'est pourquoi la courbe granulométrique est utilisée, Lafleur (1999) a proposé de comparer l'ouverture des pores du filtre avec un diamètre des grains déterminé selon l'allure de la courbe granulométrique et le coefficient d'uniformité. Si l'ouverture du filtre est suffisamment petite, le phénomène de suffusion se produira avec colmatage du filtre. Une grande ouverture provoquera un renard, par contre une ouverture intermédiaire pourra s'accompagner d'une stabilisation de l'érosion en forme de voûte dite zone d'auto-filtration.

IV.5.2/Critère hydraulique

Pour caractériser l'initiation de l'érosion interne, plusieurs chercheurs ont donné des expressions du gradient hydraulique critique. Certaines formulations dépendent étroitement de la configuration étudiée et sont donc difficilement généralisables.

Les fortes incertitudes de ces expressions amènent les ingénieurs à prendre des valeurs élevées du coefficient de sécurité sur le gradient hydraulique qui peut dans certains cas atteindre 15. (Bendahmane *et al*, 2009)

IV.6/Typologie de l'érosion interne

On distingue quatre phénomènes tel que ça a été simplifié par Foster et Fell (2001) : l'érosion régressive, l'érosion de contact, la suffusion, l'érosion de trou (le renard).

IV.6.1/L'érosion régressive (backward erosion)

Ce phénomène est appelé ainsi puisqu'il commence en un point aval et se poursuit vers un point amont dans les ouvrages, on distingue deux types d'érosion régressive :

- **Le déchaussement (*revelling ou sapping*)** : Se produit dans les remblais. En pied de pente, les forces liées à l'écoulement résurgent provoquent la déstabilisation de matériaux qui forment le squelette du sol. Ces matériaux sont progressivement évacués par l'écoulement, ce qui déstabilise le remblai, dont le glissement fournit de nouveaux matériaux qui sont à leur tour entraînés. Le processus perdure par augmentation des gradients hydrauliques (diminution du chemin hydraulique) et/ou affaiblissement du remblai (augmentation de sa pente aval).
- **L'érosion régressive par conduits (*wormholes*)** : C'est le fait qu'un ou plusieurs conduits se développent dans de l'ouvrage à l'aval et progresse vers l'amont par érosion des matériaux.

IV.6.2/L'érosion de contact (contact erosion)

L'érosion de contact se produit à l'interface entre deux couches de sol à granulométries différentes ; sous l'effet d'un écoulement tangentiel, les particules du sol le plus fin peuvent être entraînées au travers des pores du sol le plus grossier. Si le phénomène apparait et perdure au sein de l'ouvrage il peut entraîner des tassements et éventuellement une rupture du barrage.

IV.6.3/La suffusion (suffosion ou sugregation piping)

Ce phénomène se traduit par une redistribution interne des particules fines dans le sol. La granulométrie globale du sol ne change pas, par contre la perméabilité diminue. Cette redistribution des particules provoque une surpression localisée en aval de l'écoulement et peut engendrer un glissement de sol. On distingue trois cas :

- **La suffusion interne** : Se développe au sein d'une masse de sol, dont la granulométrie n'assure pas l'auto-filtration.
- **La suffusion surfacique** : Se développe à l'interface d'un matériau grossier et d'un matériau fin, sous l'action d'un écoulement parallèle ou perpendiculaire à l'interface.
- **La suffusion externe** : Se développe à l'interface d'un matériau et de la rivière ou de l'air libre, sous l'action d'un écoulement parallèle, perpendiculaire ou incliné par rapport à l'interface.

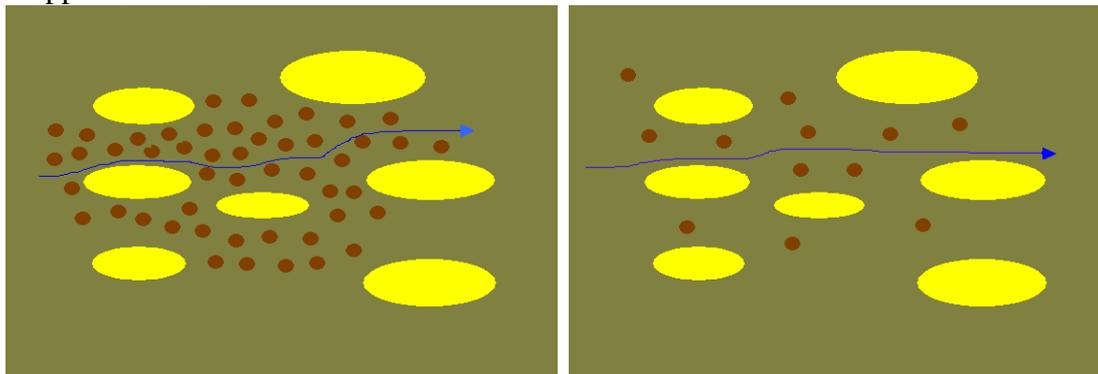


Figure (IV.5):Influence de la perméabilité sur l'écoulement

IV.6.4/L'érosion de trou ou renard (Piping erosion)

Ce phénomène provoque un arrachage régressif des particules de l'aval du sol vers un milieu extérieur en progressant vers l'amont, jusqu'à la formation d'un conduit continu. Il s'agit en fait d'un cheminement préférentiel le long duquel sont répartis un certain nombre de points

faibles. L'ampleur de ce phénomène est reliée à la vitesse de l'eau circulant dans la digue, donc au gradient hydraulique et à la perméabilité de la digue.

La figure suivante montre les différents mécanismes initiateurs de l'érosion interne dans une digue en terre.

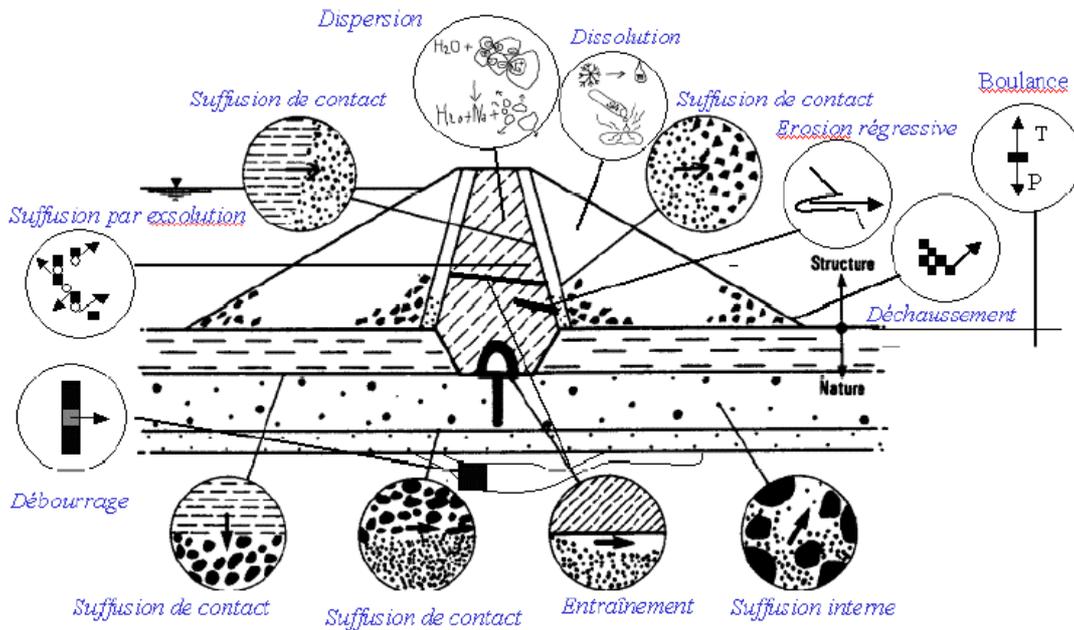


Figure (IV.6): Schéma représentatif des divers phénomènes initiateurs de l'érosion interne dans un barrage

IV.7/Origines du phénomène de l'érosion interne

Pour qu'un ouvrage hydraulique soit stable et réponde aux exigences, il doit répondre à deux fonctions principales : la résistance mécanique et l'imperméabilité de la structure. Ce qui n'est pas toujours le cas en présence de risques d'érosion interne puisque ce phénomène agit soit en affaiblissant la résistance mécanique de la structure ou en dégradant l'étanchéité par l'augmentation de la perméabilité de l'ouvrage.

On peut classer les origines de l'érosion interne en deux groupes ; le premier cumule tous les éléments qui tendent à affaiblir la résistance mécanique et l'autre se produit lorsque l'imperméabilité de la structure est dégradée.

L'affaiblissement de la résistance mécanique peut être due à :

- Un mauvais compactage.
- L'absence ou l'inadéquation d'un filtre dans l'ouvrage.
- L'utilisation de matériaux dispersifs (argile, limon...).

L'augmentation de la perméabilité est due aux problèmes d'une :

- Etanchéité inadéquate (mauvais choix des matériaux, mauvaise liaison avec le contour).
- Etanchéité endommagée (tassement différentiel, fracturation hydraulique).
- Existence d'un chemin privilégié pour l'écoulement (fissure préexistante, défauts géologiques).

Des études statistiques ont montrées que la plupart des causes principales des ruptures des barrages par érosion interne sont dues à un mauvais compactage, l'hétérogénéité des sols (présence de terriers d'animaux, tuyaux traversant) et le gradient hydraulique.

IV.8/Modes de rupture d'un barrage sous l'effet de l'érosion interne

La rupture des barrages en terre est la plus fréquente par rapport à celle des barrages en en béton, il est souvent difficile de déterminer la cause de la rupture d'un barrage puisque plusieurs processus pourraient intervenir on cite notamment une possibilité de défaut technique lors de la construction ; néanmoins, la rupture des ouvrages à cause de l'érosion interne est la plus répandu et la plus fréquente.

Foster *et al.*, (2000) ont fournit des indications utiles sur les facteurs qui contribuent aux incidents dans les barrages dues à l'érosion interne et à la stabilité des pentes, c'est pourquoi on peut citer deux types de rupture qui sont considérer les modes les plus importants:

- La rupture par renard.
- La rupture par suffusion.

IV.8.1/Rupture par renard

Une fois que le renard est formé, la rupture du barrage se produit selon trois phases :

- Elargissement du renard
- Cet élargissement peut être suivi par un effondrement du toit et donc par la formation d'une brèche
- Elargissement de la brèche.

IV.8.2/Rupture par suffusion

La rupture par suffusion peut se produire par :

- La formation à l'aval de l'ouvrage d'une zone où la vitesse d'écoulement est suffisamment importante pour qu'elle soit à l'origine de glissements successifs, voire d'un déchaussement.
- L'entraînement des matériaux provoque un affaissement local de l'ouvrage qui, dans certains cas de crues extrêmes, peut engendrer une surverse et provoquer la rupture de l'ouvrage.
- La formation d'une zone instable à l'aval de l'ouvrage, par augmentation des pressions interstitielles et création d'une zone de dépression. Cette zone provoque alors un affaissement des couches supérieures avant d'atteindre la crête : le fontis. Le fontis peut alors atteindre la crête du barrage et on assiste à la formation d'une brèche.

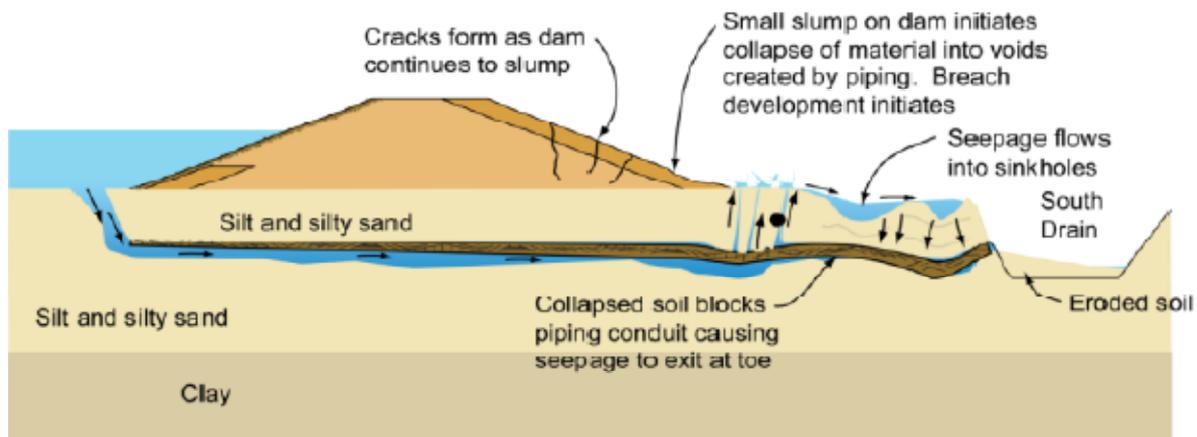


Figure (IV.7): Illustration des différents modes de rupture d'un barrage

IV.9/Méthodes de détection de l'érosion interne

Développer des méthodes dans le but de la détection du phénomène de l'érosion interne est une étape importante pour les chercheurs, car le développement de ce phénomène passe inaperçus à l'intérieur des remblais ce qui rend la fondation fragile et engendre une rupture brute ce qui entraine des conséquences dramatiques. La détection se fait en générale par :

IV.9.1/Etude préliminaire

Elle consiste à réunir le maximum d'informations reliées à l'historique du barrage, ses caractéristiques topographiques, la connaissance de la géologie locale et l'hydrodynamique de la région. Ceci demanderait un compte-rendu des activités entreprises comme la description du site d'approvisionnement des matériaux de construction, la localisation de brèches antérieures s'il y a eu lieu, et les moyens mis en jeu pour y remédier. Ceci est résumé dans le tableau suivant :

Tableau (IV.1): Etapes de la phase préliminaire et informations recherchées, tiré de Fauchard et Mériaux(2007)

Étapes proposées	Informations recherchées
Recherche historique	<ul style="list-style-type: none"> • Se renseigner sur les données disponibles (chez les opérateurs du barrage, dans les publications nationales, les cartes, les dessins topographiques et les photos,...). • Tenir compte de la localisation d'éventuelles brèches ou fissurations importantes antérieures. • Se renseigner sur les sites d'approvisionnements des matériaux.
Étude géologique	<ul style="list-style-type: none"> • Identifier les matériaux de construction. • Déterminer la nature de la fondation. • Décrire les arrangements et les caractéristiques des formations géologiques.
Analyse morphodynamique	<ul style="list-style-type: none"> • Identifier et caractériser les changements passés du canal du cours d'eau ou du système « barrage- cours d'eau ».
Données topographiques	<ul style="list-style-type: none"> • Consulter les sections transversales. • Consulter les cartes topographiques.

IV.9.2/Inspection visuelle

L'objectif de ces inspections est de pouvoir vérifier et compléter les informations recueillies durant le stade de recherche sur l'historique du barrage. Elles permettent ainsi d'identifier et de relier les aspects morphologiques externes au barrage, mais cette étape reste incertaine car le phénomène passe le plus souvent inaperçu et on le remarque que si c'est trop tard.

IV.9.3/Autres méthodes

Des méthodes supplémentaires sont couramment utilisées dans la mise au point des systèmes de surveillance de barrages. Il s'agit des dispositifs d'auscultation basés, par exemple, sur des mesures dans des piézomètres installés dans le barrage et au niveau des déversoirs de jaugeage, des essais géotechniques, des mesures réalisées en forage.

IV.10/Méthodes de caractérisation de l'érosion interne

La volonté de caractériser l'érosion interne pour maîtriser les cours des voies navigables est une préoccupation ancienne. Dans le folio 9v du Codex Leicester, Léonard de Vinci décrit deux essais à pratiquer dans un récipient en verre qu'il appelle « cuve ». Il propose déjà des expériences dirigées du genre : « comment un petit poids proche du fond d'une eau transparente et suspendue à un flotteur par un fil, peut expliquer la diversité des déplacements en dessous de la surface de l'eau » des particules de sol. Puis les méthodes se développent et plusieurs chercheurs ont mis au point de nouvelles installations expérimentales dans le but de caractériser ce phénomène.

IV.10.1/Essai d'érosion en canal (Hydraulic flume test)

L'essai consiste à faire s'écouler le fluide sur la surface de l'échantillon. Le schéma de l'appareillage est montré dans la Figure suivante. La force de traction est calculée par la mesure de vitesse d'écoulement. Le taux d'érosion est défini comme la pente de la courbe de masse érodée avec le temps. La masse érodée est la différence entre la masse sèche avant et après l'essai.

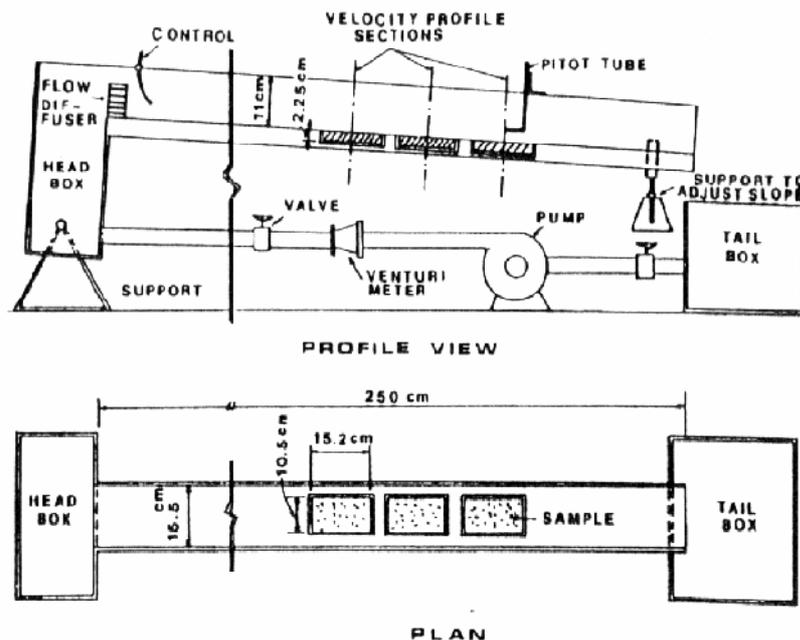


Figure (IV.8): Schéma de l'appareillage de type canal

IV.10.2/Essai d'érosion par cylindre tournant (« Rotating Cylinder Test »)

Ce type d'essai a été développé initialement par Moore et Masch (1962). Le dispositif utilisé pour le « Rotating cylinder test » est identique à celui d'un rhéomètre classique. Ce type d'écoulement est un écoulement de Poiseuille entre deux plans cylindriques. L'échantillon à tester est un cylindre. L'écoulement est recréé sur la surface externe de l'échantillon. Il est généré par une mise en rotation de l'eau grâce à un agitateur dans la partie située sous le cylindre (figure suivante)

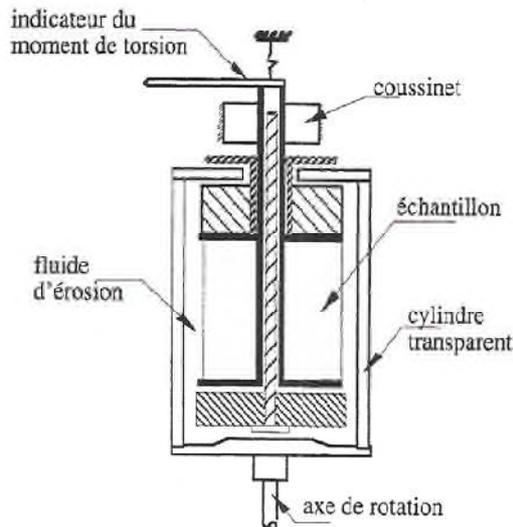


Figure (IV.9):Schéma de l'érosion par cylindre tournant

Ainsi, l'eau va se mettre à tourner autour du cylindre de sol et générer de l'érosion. Pour déterminer l'effort hydraulique, on mesure le couple appliqué sur le cylindre de sol et pour quantifier l'érosion induite, on arrête périodiquement l'essai et l'on mesure la masse perdue (Lim et Khalili, 2009).

IV.10.3/Pinhole test

Cet essai a été développé par Arulanandan et al. 1980 puis amélioré par ASTM, 1993. L'appareil pinhole test est constitué d'un cylindre et de deux couvercles en aluminium pour fermer le dispositif. L'échantillon de sol est compacté statiquement dans le cylindre, puis une aiguille de 1 mm de diamètre est enfoncée dans le sol pour initier l'érosion (figure 2b). Un cône positionné en amont sert de guide pour l'aiguille et canalise le fluide lors de l'essai. Il existe trois protocoles d'essais pour déterminer la dispersivité du sol. L'essai consiste à imposer différentes charges hydrauliques que l'on incrémente au cours du temps en fonction de la turbidité des effluents observée, à noter la couleur du fluide sortant de l'éprouvette de sol sous la charge hydraulique initiale, le débit et la taille finale du trou. Ces éléments fournissent les éléments nécessaires à la classification du sol en trois classes : non dispersif, peu dispersif, dispersif. Les résultats sont donc purement qualitatifs.



Figure (IV.10): Pinhole test

IV.10.4/Essai d'érosion de trou (« Hole Erosion Test »)

Ce type d'essai consiste à faire circuler un écoulement dans un trou préformé de l'échantillon à l'instar du pinhole test avec cependant un suivi instrumenté de l'essai, un gradient de pression est maintenu constant au cours de l'essai le long de la conduite. Dans le Hole Erosion Test la surface de contact est un cylindre dont le diamètre va augmenter avec l'érosion. Dans une première approche, seul le débit et la perte de pression ont été mesurés (Wan et Fell, 2002). Pour une perte de pression donnée l'augmentation du débit permet de calculer l'érosion correspondante. Plus récemment, ces mesures de débit ont été couplées avec une mesure de masse érodée cumulée (récolte) ou une évaluation du taux d'érosion instantané par la mesure de la turbidité de l'effluent (Pham, 2008).

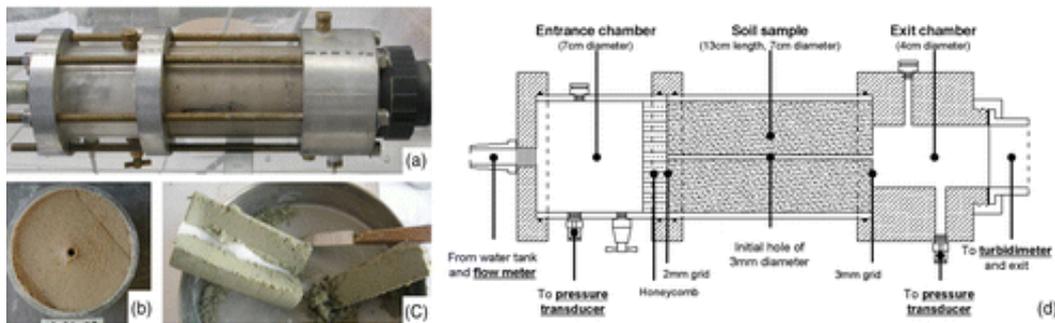


Figure (IV.11): Schéma de l'essai de l'érosion de trou

IV.10.5/Essai triaxial d'érosion (« Triaxial Erosion Test »)

Sanchez *et al.* (1983) ont mené des essais sur les matériaux de cinq barrages en terre grâce à l'appareil triaxial d'érosion (modifié à partir de l'appareil triaxial normal) (Figure IV.12). Afin de calculer la contrainte de cisaillement et le taux d'érosion, ils devaient faire une hypothèse sur l'évolution de la forme du trou préformé dans l'échantillon. Ils ont trouvé que la teneur en eau a une influence sur l'érosion d'un sol de type limon plus importante que sur un sol de type argileux. L'augmentation de la concentration en ions dans le fluide diminue le taux d'érosion d'un sol limoneux plus significativement que dans le cas d'un sol argileux.

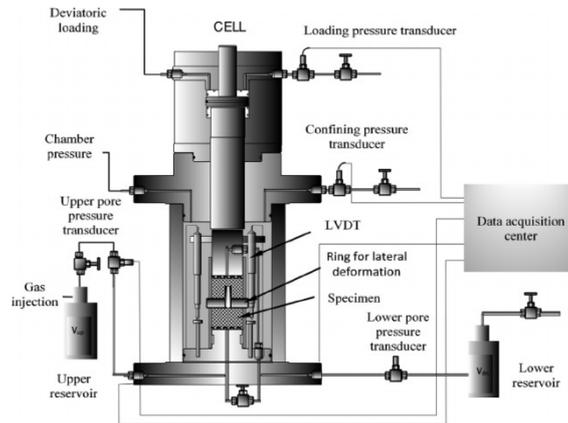


Figure (IV.12): Schéma de l'essai triaxial de l'érosion

Bendahmane (2005) ont mis en évidence l'existence d'un second gradient critique correspondant à une érosion interne par renard après initiation de l'érosion par suffusion. La diminution du pourcentage d'argile et de la pression de confinement amplifie la suffusion. La diminution du pourcentage d'argile et l'accroissement de la pression de confinement amplifie le phénomène de renard.

IV.11 / Conclusion :

L'érosion interne est l'une des principales causes de rupture des barrages en terre. La compréhension de ce phénomène nécessite une étude approfondie de l'interaction eau-sol. Les mécanismes d'apparition de ce phénomène sont très difficile à prédire surtout lorsqu'il s'agit de l'érosion de trou, son évolution est rapide et ses conséquences désastreuses.

Dans le but de bien comprendre l'érosion de trou on va essayer de faire une étude expérimentale qui sera représenté dans le chapitre qui va suivre.

Chapitre V :

Etude expérimentale de l'érosion de trou (HET)

V.1/ Introduction

Le test de l'érosion de trou (HET) permet de quantifier le taux d'érosion et son évolution dans le temps, qui se produit lorsqu'on fait passer un écoulement à travers un trou préalablement formé dans un échantillon de sol (Argile). L'érosion se fait sur les parois internes sous les forces hydrodynamiques exercées par un écoulement en charge. Ce test permet de simuler l'évolution d'une brèche à l'intérieur du barrage. Il permet aussi d'apprécier la successibilité à l'érosion du matériau testé.

Ce chapitre décrit les tests que nous avons effectués dans notre laboratoire d'Hydraulique générale. Le mode opératoire, le matériel utilisé et les caractéristiques de l'échantillon utilisé sont présentés dans les sections qui suivent.

V.2/Matériels utilisés

- Une colonne en plexi-glace de 210mm de longueur et d'un diamètre de 75mm dont les deux extrémités sont en téflon.
- Un tube pour diriger l'écoulement.
- Une aiguille d'un diamètre de 5mm pour créer le trou initial.
- Un réservoir d'eau pour contrôler la charge hydraulique.
- Deux tuyaux, l'un pour l'alimentation et l'autre pour l'évacuation de l'eau.
- Un turbidimètre manuel.
- Un chronomètre.
- Un échantillon de l'argile utilisé pour réaliser le noyau du barrage
- Du sable moyennement grossier.
- Une balance.

V.3/ Les hypothèses de base

- L'écoulement est permanent,
- L'échantillon d'argile est saturé,
- L'écoulement se fait uniquement à travers le trou créé,
- L'échantillon est parfaitement collé à la paroi interne de la colonne.

V.4/Caractéristiques de l'échantillon utilisé

Le matériau utilisé pour faire nos essais sur l'érosion interne est de l'argile prélevée directement du barrage Souk Tleta à Tizi Ouzou, c'est elle qui sert de noyau pour le barrage en question. Avant de commencer les expériences, il est nécessaire de connaître les caractéristiques de cette argile afin de mieux la manipuler. C'est pour cela que des tests pour la reconnaissance de propriétés ont été réalisés essentiellement dans le laboratoire du barrage durant le stage que nous avons effectué sur site.

V.4.1/Granulométrie

L'analyse granulométrique est réalisée à l'aide d'une série de tamis emboîtés les uns dans les autres dont les diamètres d'ouverture est décroissante de haut en bas. Ce teste est réalisé dans le but de savoir l'étendu de la granulométrie du matériau. Une fois qu'une quantité d'argile est passée d'un tamis à un autre la quantité restante nommé refus est pesée. La courbe obtenue est appelé la courbe granulométrique, elle représente le diamètre des tamis en fonction des tamisât cumulés en (%)

La distribution granulométrique de l'échantillon utilisé est présentée dans le graphe, et la série de tamis utilisé dans le test dans la photo suivante,

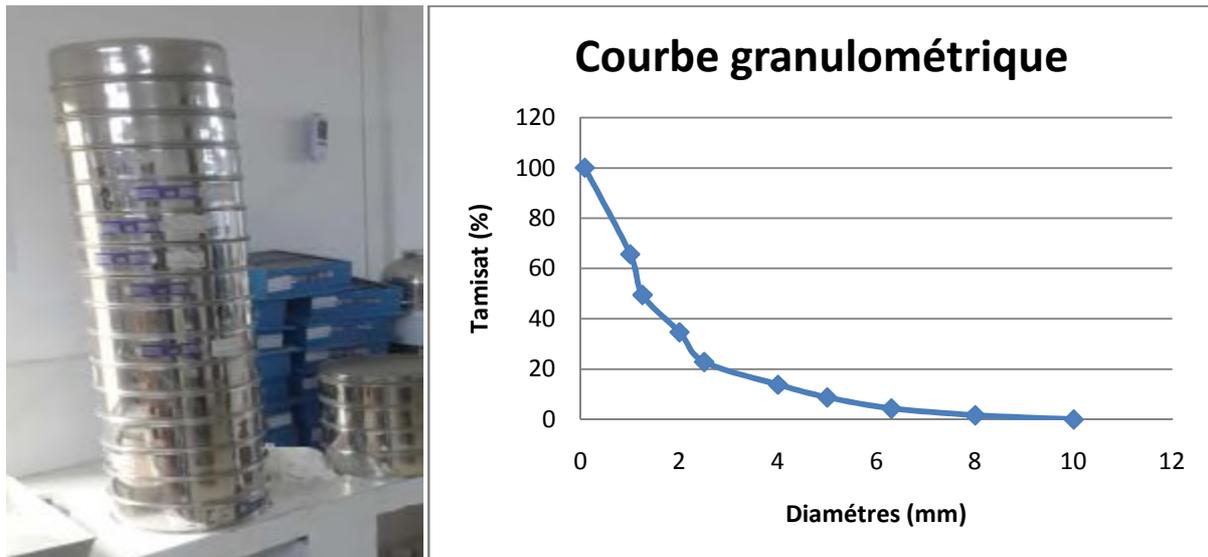


Figure (V.1): Photo représentant la série de tamis (à gauche), et graphe de la distribution granulométrique de l'argile (à droite)

Cette courbe montre que l'échantillon contient quelques gros grains et qu'il est constitué à plus de 50% de grains inférieur à 1mm. Une meilleure granulométrie s'obtient avec le test de sédimentométrie, cependant ce test n'a pas été réalisé pour matériel non disponible.

V.4.2/Limites d'Atterberg

V.4.2.1/Limite de liquidité

Elle marque le passage de l'état liquide à l'état plastique du matériau, elle se détermine à l'aide de l'appareil de Casagrande, pour le test on suit les étapes suivantes ; sur une plaque en verre on prépare le mortier de base d'argile et d'eau, on le mélange bien avec une spatule, on l'étale pour qu'il soit homogène.

Pour déterminer la limite de liquidité, on étend sur une coupelle une couche de mortier (fraction de sol) dans laquelle on trace une rainure au moyen d'un outil à rainures (spatule appropriée), puis on imprime à la coupelle des chocs semblables à l'aide de l'appareil de CASAGRAND. On compte le nombre de chocs (n) nécessaires pour fermer la rainure sur (1cm). On prend une quantité de pâte, on la mesure pour déterminer son poids total humide (P_h), après on passe la quantité mesurée à l'étuve pendant 24h puis on mesure son poids à la sortie de l'étuve c'est le poids total sec. A la fin on calcul la teneur en eau de la pâte.

Le résultat obtenu est : **WI=54,6%** dans notre cas.

L'appareil de casagrande est présenté dans la figure (II.3)



Figure (V.2):Appareil de CASAGRANDE

V.4.2.2/Limite de plasticité

Elle marque le passage de l'état plastique à l'état solide, pour l'essai on suit les étapes suivantes ; On prend une fraction de la poudre (la même que dans la partie liquidité) et on l'étale sur la plaque de verre puis on ajoute délicatement de l'eau, et on mélange le tout avec la spatule pour obtenir une pâte consistante.

On prend une partie de la pâte qu'on roulera sous la paume de la main, on s'arrête de rouler la pâte une fois qu'on obtient un rouleau qui se brise quand il atteint 3 mm de diamètre et de 10 centimètres de long après sa on met l'échantillon prélevé, dans une coupelle numérotée et préalablement pesée (à vide) qu'on met ensuite dans le four pendant 24 h.

Après 24h, on pèse les tares.

Le résultat obtenu est de : $W_p=23,3\%$

V.4.2.3/Indice de plasticité

C'est la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité ($I_p=W_L - W_p$).

Dans notre cas : $I_p=31,3\%$

D'après ces résultats on peu classer notre argile selon la valeur de I_p en suivant le tableau suivant (Essais de laboratoire et en place de mécanique des sols, 1973):

Tableau (V.1):Tableau représentant le classement de l'argile selon le degré de plasticité

I_p (%)	Degré de plasticité
0 - 15	Non - plastique
5 - 15	Peu plastique
15 - 40	Plastique
> 40	très plastique

Donc notre argile est **plastique**

V.4.3/L'essai Proctor

L'essai Proctor a pour but de déterminer la teneur en eau optimale pour un sol de remblai donné et des conditions de compactage à fixer, qui conduit au meilleur compactage possible ou encore à une capacité portante maximale.

Les conditions de compactage Proctor de l'argile sont déterminées à partir de l'essai Proctor normal. Le principe de cet essai consiste à humidifier l'argile avec différentes teneurs en eau pour chaque essai et à le compacter dans le marteau Proctor, pour chaque essai réalisé on détermine la masse volumique sèche de l'argile et cela dans le but de tracer une courbe de variation de la masse volumique en fonction de la teneur en eau utilisée eu début. La valeur la plus élevée de la masse volumique sera projeté sur l'axe représentant l'humidification.

D'après les résultats des essais l'humidité optimum est de **H=21,5%**, et la densité maximum est **D=1,605 g/cm³**

La figure suivante montre l'appareil utilisé pour l'essai Proctor,



Figure (V.3):Essai Proctor réalisé au laboratoire

V.4.4/La conductivité hydraulique

Le test de perméabilité a été réalisé in situ dans la digue du barrage en question. Il consiste à réaliser un puits de **15cm** de diamètre et d'une profondeur de **60cm** dans la largeur de la structure déjà réalisées en couches compactées et contrôlées puis un tube en PVC de **5,5cm** de diamètre est inséré dans le puits (il faut qu'il atteigne le fond), le vide entre les parois du tube et du puits est remplis par un filtre graveleux. On verse à l'aide d'un bidon de **20L** de l'eau dans le tube en commençant du fond (Voir le schéma joint), puis on laisse monter l'eau jusqu'à la limite supérieur du tube, on règle le débit jusqu'à atteindre un niveau constant. On enregistre à intervalle de temps réguliers le temps les données du débit d'eau pour garder le niveau constant, une fois le niveau constant atteint on observe et enregistre la chute de niveau à intervalle de temps régulier (le puits est maintenus plein jusqu'à la fin du test). Avec les valeurs obtenus (volumes, temps) on calcul le débit, et on calcul le coefficient de perméabilité.

La figure suivante montre le schéma du test

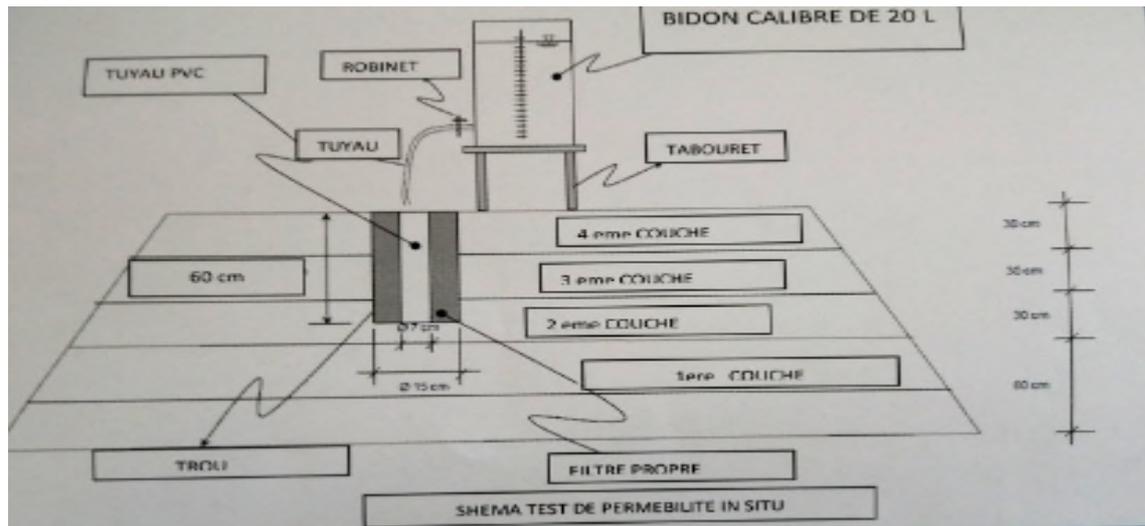


Figure (V.4): Schéma représentatif de l'essai de perméabilité in situ

Le résultat après calcul est : $K=1.02 \cdot 10^{-11}$ m/s

V.5/Présentation du modèle expérimentale

Pour mieux comprendre le phénomène d'érosion de trou, nous avons effectué une série d'essais avec différentes conditions de charge. Pour chaque essai nous avons récolté plusieurs échantillons du débit sortant de la colonne suivant des pas de temps qui varient d'un essai à un autre, pour chaque échantillon nous avons mesuré la turbidité dans le but de suivre son évolution en fonction du temps.

Le principe de cette expérience est de laisser circuler de l'eau à travers le trou perforé puis récolter l'eau sortante suivant un pas de temps pour mesurer sa turbidité. Enfin de chaque test on examine l'évolution de la forme du trou.

A cet effet nous remplissons le trou avec de la cire (bougies fondues) et on laisse sécher, ce qui nous permet de visualiser l'évolution du trou initialement percé et de mesurer son volume final.

L'image suivante représente le montage expérimental réalisé pour faire les essais ; il est constitué d'une colonne horizontale (en bas), de deux piézomètres reliés à la colonne, d'un réservoir d'eau pour maintenir la charge constante et d'un robinet d'alimentation.



Figure (V.5): Figure qui montre le procédé expérimentale

V.5.1/Préparation de l'échantillon d'argile

L'argile étant ramenée du chantier dans son état brut. Il était nécessaire de procéder à sa préparation avant de la mettre dans la colonne pour pratiquer des essais.

Premièrement on la cocasse manuellement à l'aide d'un marteau pour éliminer les grosses particules, puis on la met à l'étuve pendant 24h pour bien éliminer toute l'eau qu'elle contenait. A la fin on la passe au broyeur pour la transformer en particule très fines (poudre) et la rendre homogène.

Les photos suivantes décrivent toutes ces étapes,



Figure (V.6): Etapes de préparation de l'argile

Après que cette argile soit transformée en une poudre, on va procéder à la préparation de l'échantillon qui sera utilisé pour nos essais ; et pour cela, on va peser une quantité qui est de **500g** et on va lui ajouter de l'eau en suivant les résultats obtenus lors de l'essai Proctor soit **21,5%**. Après avoir bien malaxé le mélange on le laisse reposer pendant une période de **24h** dans un sac en plastique pour qu'il soit bien homogène lors la manipulation.

Les photos suivantes montrent les étapes de préparation de l'argile,

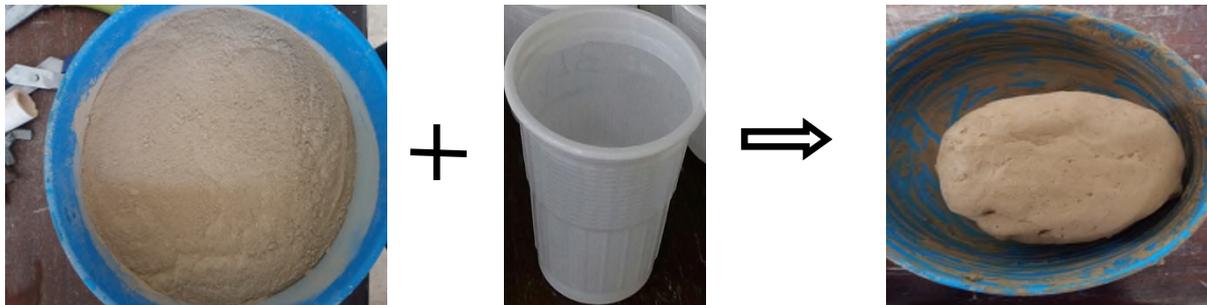


Figure (V.7): Etapes de préparation de l'échantillon d'argile à utiliser

V.5.2/Préparation de la colonne

Une fois que notre échantillon d'argile soit bien homogène, on procède à la préparation de la colonne avec laquelle on va faire nos essais.

- (a) On va d'abords remplir la colonne de gravier jusqu'au niveau de l'entrée du premier piézomètre puis on va faire un filtre très fin pour filtrer les particules d'argile,
- (b) On ensuite mettre l'échantillon d'argile qu'on a préparé couche par couche et cela dans le but de bien le compacter, une fois que toute les couches d'argile soit bien compacter et qu'on n'observe pas de vide dans la colonne on pose un autre filtre par-dessus puis on rajoute une quantité de sable et cela dans le but de stabiliser l'écoulement avant son arrivé dans le sol.
- (c) Puis on fait un trou au centre de l'échantillon à l'aide d'une aiguille de **5mm** de diamètre et de **30cm** de longueur et on doit faire attention que le trou soit bien au centre
- (d) A la fin on ferme la colonne à l'aide du couvercle en téflon et on le serre bien pour éviter les infiltrations des deux cotés.

Les photos suivantes montrent toutes ces étapes,



(a)

(b)

(c)

(d)

Figure (V.8):Etapes de préparation de la colonne

V.5.3/Instruments de mesure

Pour prendre les mesures lors des essais, on a utilisé :

- *Un b cher et un chronomètre*

Dans le but de mesurer le débit on recueille des échantillons d'eau a la sortie de la colonne dans des gobelets en plastique et qu'on mesure après leur volumes dans un b cher, et avec un chronomètre on mesure le temps de remplissage. Pour chaque prélèvement, on mesure le volume recueilli avec le b cher et le temps de la recueille avec le chronomètre.

- *Un turbidimètre manuel*

Pour mesurer la turbidité de l'eau sortant de la colonne (mélange eau + particules d'argiles). Le principe de son utilisation est de prendre un échantillon de cette eau à l'aide d'une seringue et de le verser dans une fiole de **10ml** puis de le positionner dans l'emplacement prévu sur l'appareil puis attendre que le résultat s'affiche. Le turbidimètre fournit des mesures en FTU que nous avons transformé en concentration à l'aide de l'étalonnage préalablement effectué.



Figure (V.9):Appareil de mesure de la turbidité

- **Des bougies fondues**

Dans le but de reproduire et de visualiser la forme finale du trou réalisé au début par rapport au temps de l'essai, on fait fondre plusieurs bougies et on les verse dans le trou puis on les enlève après refroidissement.

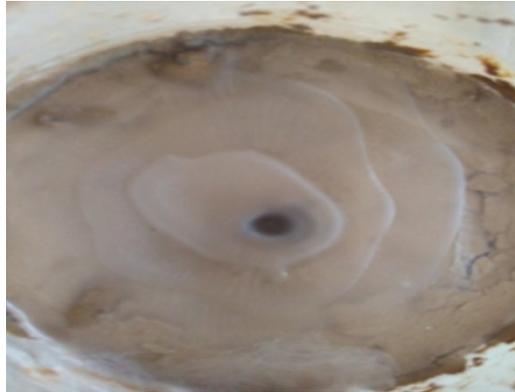


Figure (V.10): Photo qui représente le remplissage du trou après les essais

V.6/Procédure des essais de l'érosion de trou

Lors de ce projet, trois différents essais on était réalisés afin de bien pouvoir quantifier le taux d'érosion et cela en changeant a chaque fois les différents paramètres utilisés comme la charge hydraulique, le débit et le temps de prise de mesure. Les détails du protocole suivit sont les suivants,

V.6.1/Mise en place du matériel

Après avoir préparé la colonne en suivant les étapes énoncée précédemment pour les différents essais, on procède à la mise en place de tous le matériel d'essai, et cela en accordant les deux piézomètres à la colonne dans le but de s'assurer que l'écoulement ne se fait pas dans toute la colonne mais seulement dans le trou. Puis on va brancher l'entrée de la colonne au réservoir d'eau qui permet de maintenir la charge constante et on alimenter ce dernier avec un débit prédéfini. Du coté de la sortie on place les gobelets un part un pour les prélèvements.

V.6.2/Déroulement des essais

Après l'installation du dispositif expérimental, on procède aux essais. Et cela, en fixant une charge et un débit précis et constant pour chaque essai. On surveille ensuite les piézomètres pour s'assurer que l'essai se déroule normalement, puis on récolte le débit sortant de la colonne en suivant un pas de temps définit.

Pour notre expérience, on a réalisé quats essais avec différentes conditions initiale (charge), dans le but de comparer les résultats. A la fin de chaque essai, on enlève l'échantillon d'argile après avoir pris la forme finale du trou, puis on le remplace pour l'essai qui va suivre.

V.7/Résultats

Les résultats obtenus lors des différents essais et leurs interprétations seront présentés en détails dans le prochain chapitre.

V.8/Conclusion

Ce dispositif expérimental élaboré permet de bien reproduire le phénomène d'érosion de trou dans un laboratoire et de suivre son évolution en fonction du temps et de le caractériser. La réalisation de plusieurs essais nous a permis de bien illustrer les différentes caractéristiques du phénomène. Les résultats expérimentaux seront représentés dans le chapitre suivant.

Chapitre VI :

Résultats expérimentaux et discussions

VI.1/Introduction

Dans cette partie du mémoire, nous présentons l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus lors de l'étude de l'érosion de trou. On analysera également l'érodabilité de l'argile utilisé lors des essais et déterminer le taux d'érosion en calculant l'indice d'érosion de l'argile utilisé dans le projet de réalisation du barrage Souk Tlata à Tizi Ouzou.

VI.2/Résultats expérimentaux et discussions

Comme le dispositif expérimental à été expliqué précédemment. Nous procéderons dans chaque essai à mesurer la variation de la turbidité en fonction du temps afin de déterminer la concentration des particules d'argile dissoutes à la sortie de la colonne. Cela va nous permettre de tracer la variation de la concentration en fonction du temps pour chaque essai. Nous allons aussi visualiser l'évolution du trou en versant des bougies fondus dans le trou après chaque essai.

VI.2.1/L'étalonnage

Dans le but de trouver une relation entre la turbidité mesuré en **FTU** et la concentration en **(g/l)**, on a procédé à l'étalonnage des valeurs et cela en faisant un essai de turbidité sur de l'eau clair (eau du robinet) mélangé avec de l'argile en suivant les étapes suivantes :

Dans **1l** d'eau on met **10g** d'argile on mélange bien puis on mesure la turbidité. On verse ensuite la moitié de ce mélange qui donc **0,5l** dans un récipient et on rajoute de l'eau jusqu'à obtenir **1l**. On mélange bien puis on mesure la turbidité de nouveau. On refait les mêmes étapes en divisant à chaque fois le mélange en deux, rajoutant de l'eau et mesurant la turbidité du mélange. Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau (VI.1): Résultats obtenus lors de l'essai d'étalonnage

C (g/l)	FTU 1	FTU 2	FTU 3	Moyenne
2,5	1000	1000	998	999,333333
1,25	454	411	462	442,333333
0,625	200	180	207	195,666667
0,3125	100	91	95	95,333333
0,15625	42,89	43,35	43,56	43,266667
0,078125	22,09	20,1	23,02	21,736667
0,0390625	11,11	10,64	12,53	11,426667
0,01953125	6,62	7,91	5,42	6,65

Remarque : Le turbidimètre qu'on a utilisé ne peut pas mesurer des valeurs supérieures à 1000 FTU

Le graphe suivant montre la relation entre la turbidité et la concentration du mélange eau+argile « $C (g/l)=f(FTU)$ ».

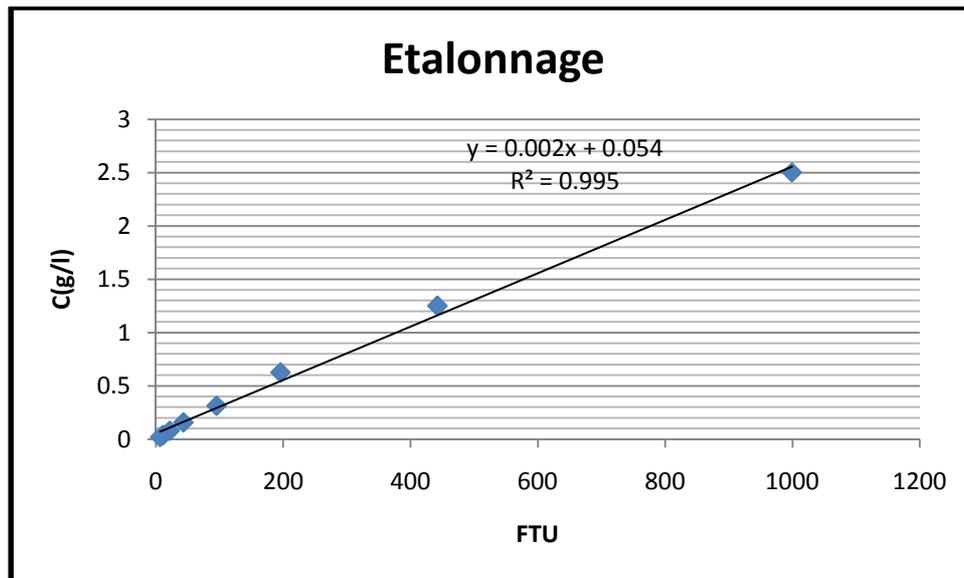


Figure (VI.1): Etalonnage des valeurs

VI.2.2/Essai n° 1

Dans le premier essai, nous avons fixé la charge à **340 cm**. L'échantillon a été préparé selon la procédure expliquée dans la section V.5.2 (CH.II). La figure suivante montre le montage expérimental réalisé pour cet essai,



Figure (VI.2): Dispositif expérimental à 340 cm

Après avoir l'ouverture du robinet d'alimentation, l'échantillon s'est effondré et l'écoulement s'est fait dans toute la colonne vu la forte charge observée dans les deux piézomètres.

On en déduit que la charge était trop forte et l'écoulement ne pouvait pas être évacué par le trou. A cet effet, nous avons réduit la charge et pour les prochains essais et nous avons ajouté un tube pour diriger l'écoulement de l'eau uniquement dans le trou.

Ce détail est représenté dans les photos suivantes :



Figure (VI.3): Photos représentant le tube utilisé pour diriger l'écoulement

VI.2.3/Essai n°2

Suite à la technique que nous avons élaborée pour diriger l'écoulement vers le trou réalisé cet essai s'est déroulée sans effondrement de l'échantillon et la charge hydraulique a été réduite et fixée à **33 cm** tel que le montre la photo suivante,



Figure (VI.4): Dispositif expérimental à 33 cm

Nous avons obtenu les résultats suivants :

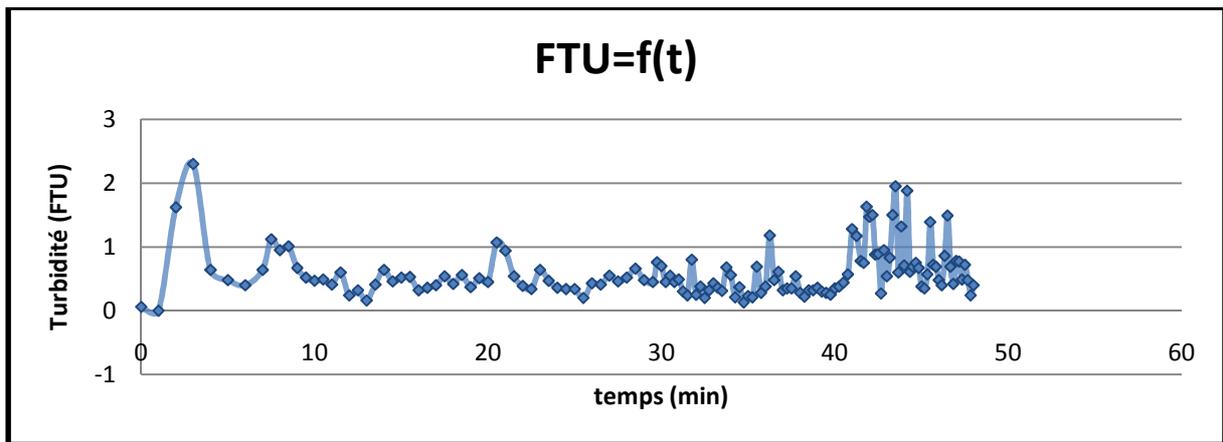
❖ *La variation de la turbidité en fonction du temps :*

Figure (VI.5): Graphe représentant la variation de la turbidité en fonction du temps du 2eme essai

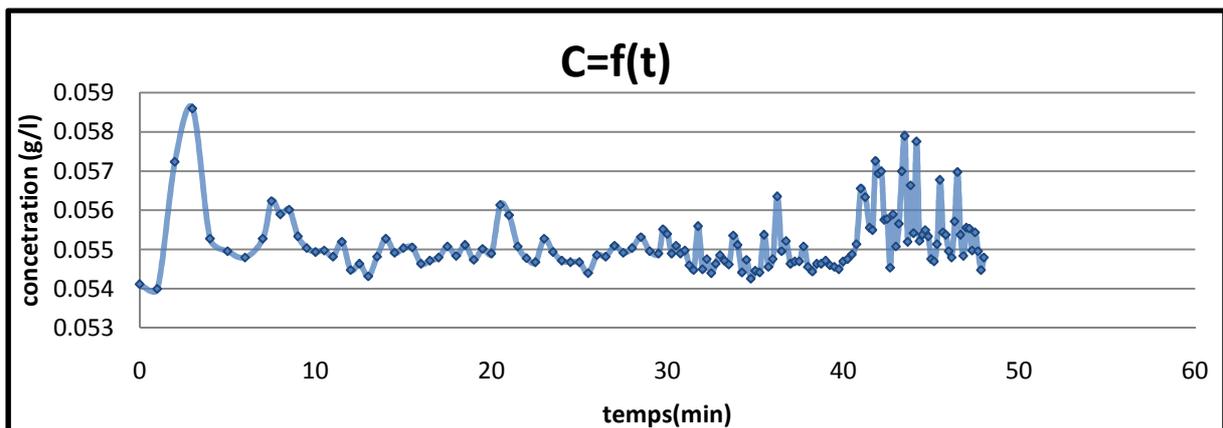
❖ *La variation de la concentration en fonction du temps :*

Figure (VI.6): Représentation de la variation de la concentration du 2eme essai

Dans cet essai, nous nous sommes uniquement concentrés sur les prélèvements de la turbidité, les mesures effectuées sont représentées sur la figure (VI.5). La relation d'étalonnage nous permet de déduire les variations de la concentration comme le montre la figure (VI.6)

On remarque que la variation de turbidité et de la concentration de l'argile dans l'eau après érosion est plus ou moins stable à part les premières valeurs (1.62, 2.3) où la turbidité était très élevée et cela est dû au lavage du trou.

Les courbes représentent plusieurs pics notamment vers la fin de l'essai, qui correspondent à la migration d'ensemble de grains. Le trou semble s'éroder par départ en paquet discret et non continu.

❖ La forme finale du trou :

A la fin de l'essai, nous avons fait sécher l'échantillon, pour combler le trou avec de la cire fondue afin de visualiser la forme finale du trou. La photo suivante montre l'aspect de la cire après solidification.



Figure (VI.7): La forme finale du trou après le 2eme essai

Cette forme montre l'irrégularité de la paroi interne du trou, on remarque une concentration de l'érosion à l'entrée. Les bosses de la cire correspondent à des creux dans les parois internes visualisant les arrachements en paquet des particules.

❖ Le volume final du trou :

A la fin de l'essai, on a mesuré le volume final de la cire ce qui correspond au volume du trou après détachement des particules, le résultat obtenu est de :

$$V_f = 2161,5 \text{ ml}$$

Le volume initial étant de **2158 ml**, on déduit que le volume érodé est de **V=3,5ml**

D'après ces résultats, on remarque que le volume érodé est faible et cela est dû à la charge employée dans cet essai.

VI.2.4/ Essai n°3

Dans cet essai on a augmenté la charge hydraulique, fixé à **92 cm** et suivi le même processus que dans le deuxième essai, la photo suivante montre le dispositif de cet essai



Figure (VI.8): Dispositif expérimental à 92 cm

Les résultats obtenus sont les suivants :

❖ La variation de la turbidité en fonction du temps :

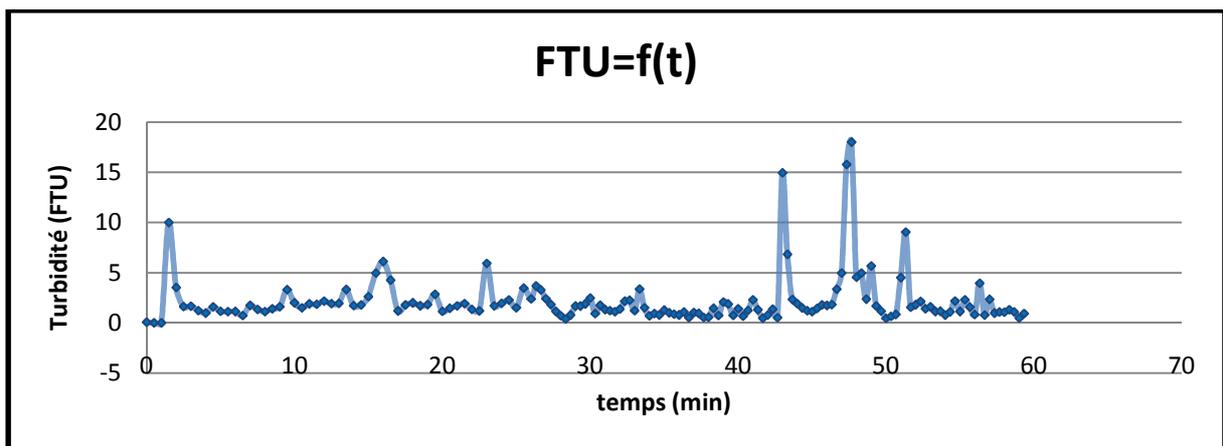


Figure (VI.9): Variation de la turbidité (essai 3)

❖ La variation de la concentration en fonction du temps

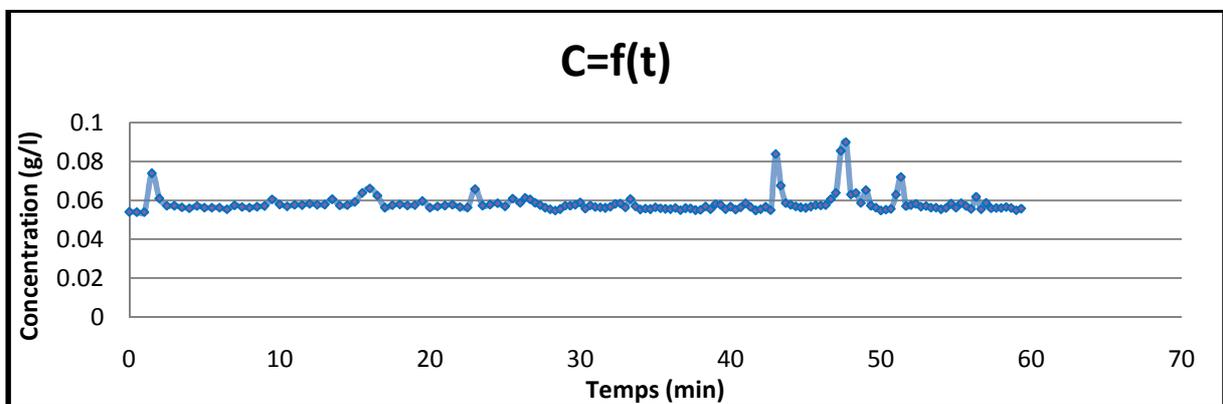


Figure (VI.10): Variation de la concentration (essai 3)

Dans cet essai, on a pris les mêmes mesures que précédemment c'est-à-dire ; la variation de la turbidité montré dans la figure (VI.9), qu'on a transformé en concentration (fig VI.10)

Dans ce cas, on remarque aussi que la turbidité et la concentration reste stable à part les première qui correspondent au lavage du trou, mais les valeurs sont plus élevé que l'essai précédent et cela est du a la charge qu'on a augmenté.

❖ *La forme finale du trou :*

Après séchage du trou, et comblement avec de la cire fondu on obtient la forme suivante :



Figure (VI.11): La forme finale du trou après l'essai 3

Cette forme montre bien les irrégularités sur la paroi. Et on peu bien visualiser les bosses sur la cire solidifier du au fort arrachage des particules qui sont plus apparentent que dans le cas précédent.

❖ *Le volume final du trou :*

A la fin de cet essai, le volume final du trou est de :

$$V_f = 5192,5 \text{ ml}$$

Donc le volume érodé est de $V = 7,5 \text{ ml}$. On note bien qu'elle est plus conséquente que le premier cas.

VI.2.5/Essai n°4

Après ces essais ou on a compris le comportement de l'échantillon en fonction de la variation de la charge, on a voulu faire une expérience plus démonstrative de ce phénomène et cela en essayant de varier le débit entrant dans la colonne dans l'essai.

Donc on a modifié le processus en installant une vanne l'entrée de la colonne dans le but de contrôler le débit entrant dans la colonne, et aussi on a pris la mesure du débit sortant de la colonne. La charge est de **88cm**, la photo suivante montre le montage utilisé pour cet essai,



Figure (VI.12): Dispositif expérimental à 88 cm

Les mesures du débit sortant sont montrés dans la figure suivante ;

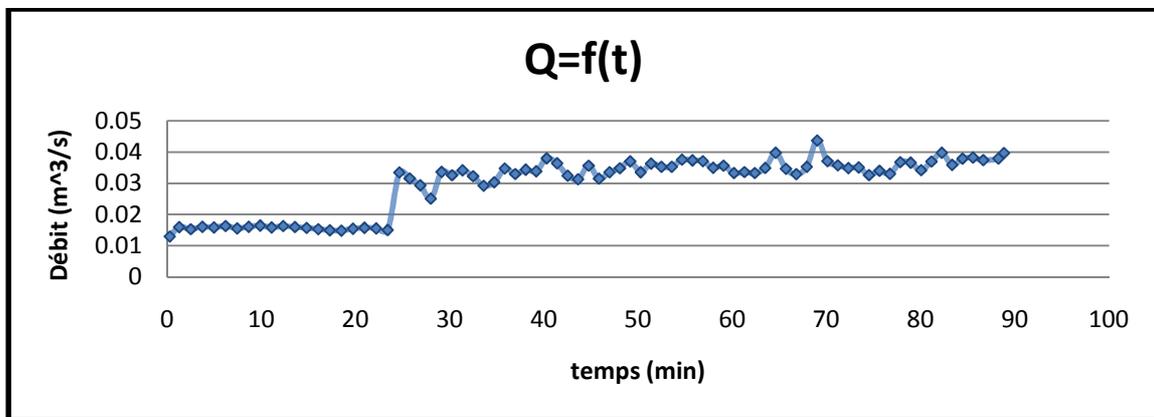


Figure (VI.13): Variation du débit en fonction du temps

Les résultats obtenus sont les suivants :

❖ La variation de la turbidité en fonction du temps :

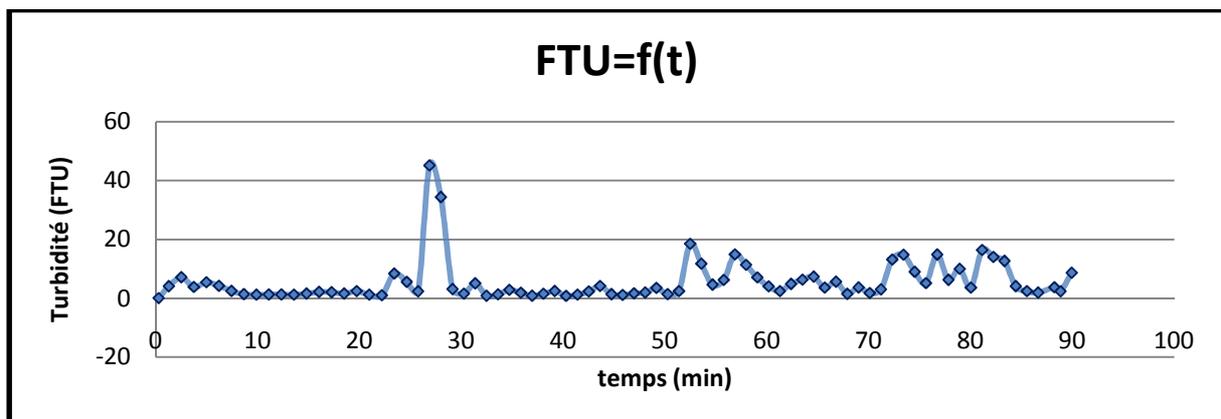


Figure (VI.14): Représentation de la variation du débit (essai 4)

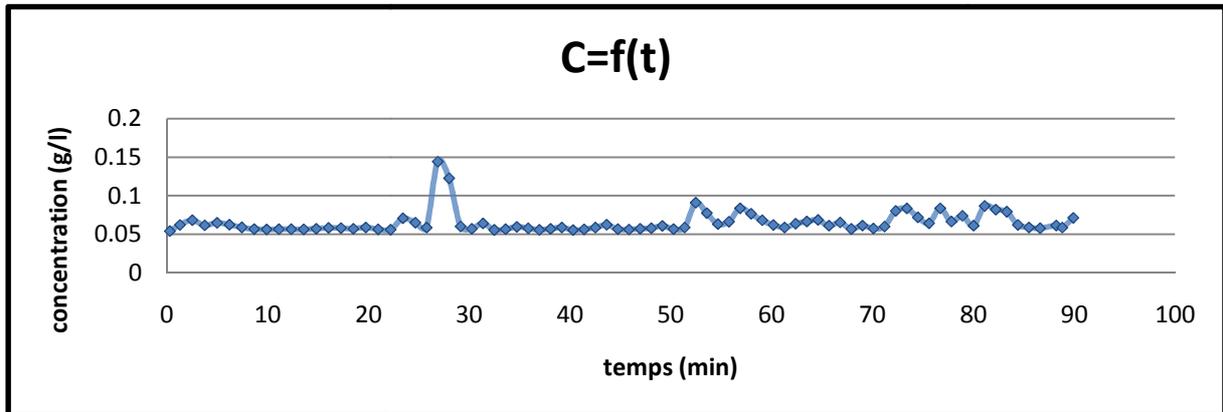
❖ *La variation de la concentration en fonction du temps :*

Figure (VI.15): Variation de la concentration (essai 4)

❖ *La forme finale de la bougie après le quatrième essai*

Figure (VI.16): Forme finale de la bougie après l'essai

Les résultats sont donnés en termes de turbidité en fonction du temps (figure VI.14). Mis à part une petite valeur de turbidité mesurée en début d'essai et qui correspond au lavage du trou dans ce cas aussi, on constate qu'après les deux premiers paliers de débit durant lesquels la turbidité reste quasi nulle, indiquant que l'érosion est faible, celle-ci augmente rapidement lors de l'application du troisième palier où on constate une nette augmentation. Cette brusque évolution témoigne bien de l'apparition du phénomène d'érosion dans l'échantillon qui signifie que le débit appliqué dans ce cas est un débit important qui dépasse le taux de résistance des particules à l'écoulement. Par contre, la turbidité décroît progressivement jusqu'à atteindre une valeur négligeable autour de laquelle elle se stabilise. Tant que le débit n'est pas augmenté, l'érosion semble se stabiliser. Une fois qu'un nouveau palier est appliqué, on assiste à une nouvelle apparition de l'érosion avec un pic de turbidité puis une régression et une stabilisation, concernant la concentration on constate qu'elle est stable et qu'il y a juste des petits pics lorsqu'on augmente le débit après elle tend à se stabiliser. La forme finale de la bougie nous montre qu'il y a une forte érosion dans ce cas par rapport au premier cas mais un peu moins comparant à l'essai 3.

VI.3/Calcul de la masse de l'échantillon érodée :

Dans le but d'évaluer la quantité d'argile érodée en fonction du temps à partir de l'échantillon utilisé dans l'essai, on procède au calcul suivant :

$$dm(t)=C.dv \quad (III.1)$$

$$dm(t)=C.Q.dt \quad (III.2)$$

$$m=\int_0^T C.Q.dt \quad (III.3)$$

On obtient alors le résultat suivant :

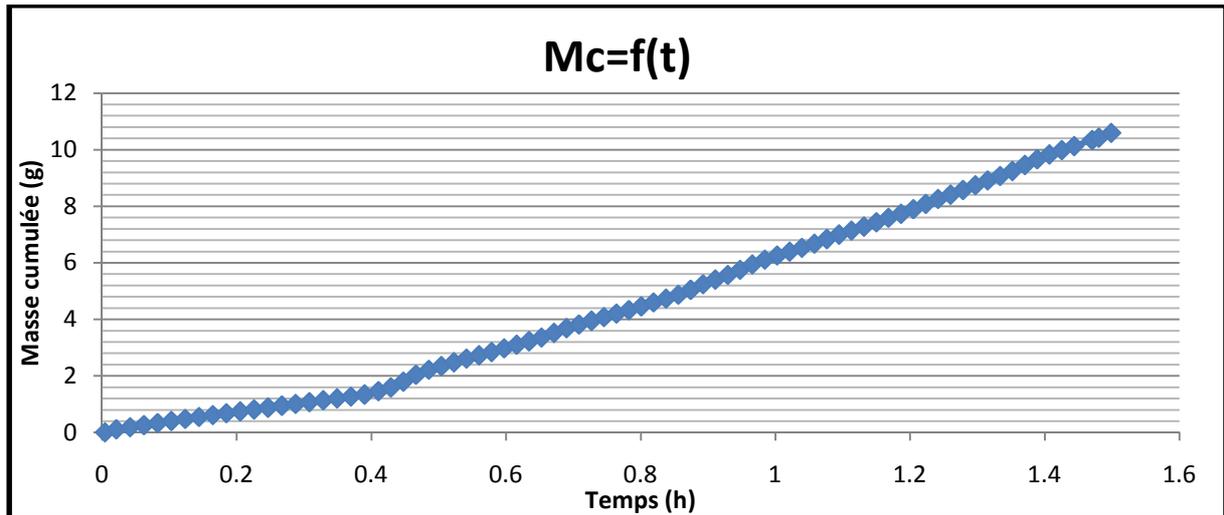


Figure (VI.17): Evolution de la masse érodée cumulée en fonction du temps

On remarque que la quantité du sol érodée évolue linéairement en fonction du temps, et la masse totale érodée à la fin de notre essai est de l'ordre de : **Mt=10.59g**

Calcul de la quantité de matière érodée dans ce cas :

$$V_{\text{érodé}} = \frac{Mt}{\rho} \quad (VI.1)$$

Avec : Mt c'est la masse totale érodée et ρ c'est la masse volumique de l'argile

$$\text{Donc : } V_{\text{ér}} = \frac{10,59 \text{ g}}{2000 \text{ kg/m}^3} = \frac{10,59 \text{ g} \cdot 1000 \text{ l}}{2000 \cdot 1000 \text{ g}} = 0,005295 \text{ l}$$

$$V_{\text{ér}} = 5,3 \text{ ml}$$

Calcul du volume final du trou :

$$V_{\text{final}} = V_{\text{initial}} + V_{\text{érodé}} \quad (VI.2)$$

$$V_{\text{initial}} = \frac{\pi d^2}{4} * L \quad (VI.3)$$

Avec : L c'est la longueur de l'échantillon (110mm) et d c'est le diamètre initial du trou (5mm)

$$\text{Donc : } V_i = \frac{3,14 * (5)^2}{4} * 110 = 2158 \text{ mm}^3$$

$$V_i = 2158 \text{ ml}$$

$$\text{D'où : } V_f = 2158 + 5,3$$

$$V_f = 2163,3 \text{ ml}$$

Calcul du volume érodé en pourcentage :

On a le volume initial du trou $V_i=2158$ ml

Et le volume érodé est de $V_e=5,3$ ml

$$\text{Donc } V_e(\%) = \frac{5,3}{2158} * 100 = 0,245\% \quad (\text{VI.4})$$

$$V_e=2,4\text{‰}$$

Calcul du diamètre final du trou :

$$\text{On a: } D_f = \sqrt{V_f * \frac{4}{\pi * L}} \quad (\text{VI.5})$$

$$D_f=5,00526648 \text{ mm}$$

VI.4/Variation du taux d'érosion en fonction du temps :

Les mesures de la concentration des particules solides arrachées lors du passage de l'écoulement dans le trou, permet de calculer le taux d'érosion de l'échantillon, $q_s(t)$, défini par la masse érodée par unité de temps ou appelé aussi débit solide (Marot, et al. 2009)

$$q_s(t) = C(t) * q_w(t) \quad (\text{VI.6})$$

Avec : $q_s(t)$ est la masse érodée ou le débit solide

$C(t)$ est la concentration (g/l)

$q_w(t)$ est le débit du fluide (l/s)

Le traçage du taux d'érosion de fait en fonction du temps, la figure suivante montre le résultat obtenu

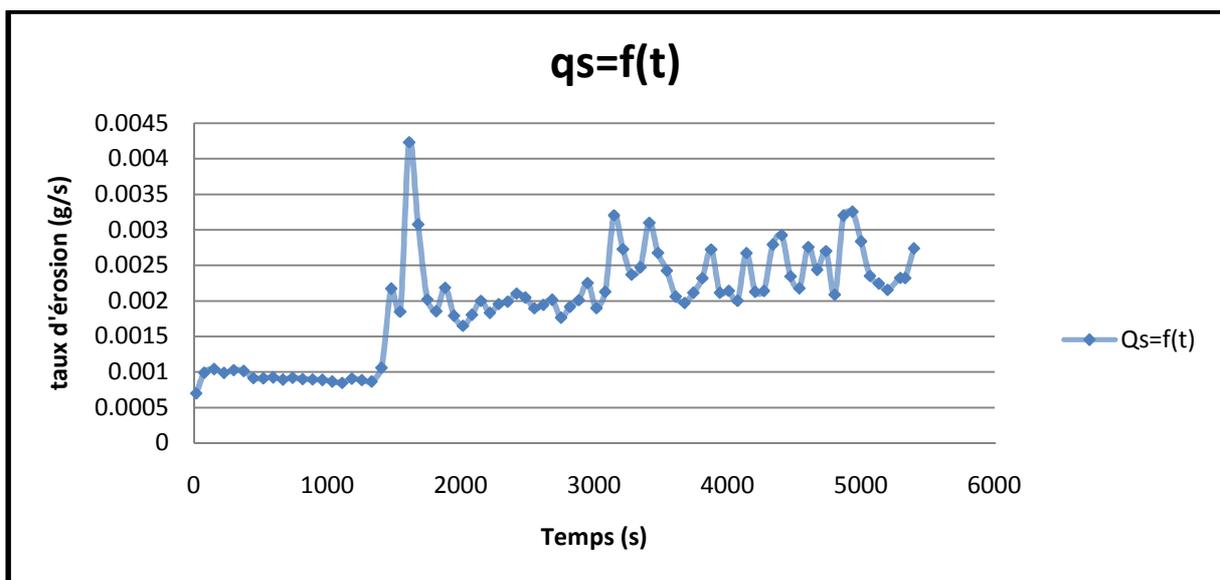


Figure (VI.18): Variation du taux d'érosion en fonction du temps

VI.5/Estimation de l'érodabilité du sol

L'érodabilité des sols est souvent décrite en termes de taux d'érosion lorsque le sol est soumis à des contraintes de cisaillement hydrauliques. Il existe une relation approximativement linéaire entre le taux d'érosion et la contrainte de cisaillement hydraulique appliquée par l'écoulement.

$$\dot{\varepsilon} = C_e(\tau - \tau_{cr}) \quad (\text{VI.7})$$

Avec : $\dot{\varepsilon}$ est le taux d'érosion donnée par le rapport entre le débit massique maximal en particules érodées et la surface totale du vide poral sur laquelle l'érosion se produit ($\varepsilon = C_m Q_m / S_p$), ou : S_p est la surface du trou

Et : τ est la contrainte tangentielle exercée par le fluide sur la paroi, calculé par la formule de (Wan et Fell 2004) :

$$\tau = \frac{\Delta H}{L} \rho g \frac{\phi}{4} \quad (\text{VI.8})$$

Ou : $\Delta H/L$ est le gradient hydraulique, ρ densité du fluide, g accélération, ϕ diamètre du trou

La loi d'érosion à seuil est purement expérimentale, elle est la plus utilisée pour l'estimation de la valeur de la contrainte de cisaillement critique τ_{cr} et du coefficient d'érosion interne C_e . Dans l'évaluation du taux d'érosion, la valeur maximale de la concentration est utilisée, certains auteurs proposent d'autres mesures (Guidoux, Y-H., Beguin, & Ho, 2010) cité par (Seghir, 2012-2013).

Et C_e représentant la constante de proportionnalité C_e (s/m) est le coefficient du taux d'érosion du sol. L'indice d'érosion est défini par : (Regazzoni et Marot 2013)

$$I = -\log(C_e) \quad (\text{VI.9})$$

VI.6/Estimation de l'indice d'érosion de cette argile :

Pour estimer le taux de progression de l'érosion de trou durant le processus d'érosion interne d'une digue de barrage, une équation permet de prédire la nature du sol utilisé et cela en calculant l'indice d'érosion en se basant sur les formules suivantes : (Wan et Fell 2004)

Pour des sols de grains grossiers :

$$I_{\text{HET}} = 6.62 - 0.016\rho_d - 0.10\rho_d/\rho_{\text{dmax}} - 0.044W - 0.074\Delta W_r + 0.11S + 0.061\text{Clay (U.S)} \quad (\text{VI.10})$$

Pour les grains fins:

$$I_{\text{HET}} = -10.20 + 9.57\rho_d - 0.042\rho_d/\rho_{\text{dmax}} + 0.10W + 0.0097\Delta W_r - 0.0056\text{Fines} + 0.042\text{Clay(U.S)} - 0.09L_t + 0.11L_p + 0.44\text{Pinhole} \quad (\text{VI.11})$$

Avec:

I_{HET} : Indice d'érosion pour HET

ρ_d : densité sèche du sol (mg/m^3)

$\rho_d/\rho_{\text{dmax}}$: degré de compactage (%)

W : teneur en eau (%)

ΔW_r : taux de teneur en eau (%)

Clay (U.S) : fraction de masse de particule de diamètre < 0.005 (%)

S : degré de saturation

Fines : teneur en particules fines < 0.0075 (%)

L_l : limite de liquidité (%)

L_p : limite de plasticité (%)

Pinhole : Classification faite selon le HET

L'argile est un sol constitué de particules très fines, donc la formule à utilisé pour le calcul de l'indice d'érosion est (VI.10), en remplaçant ces paramètres on trouve :

$$I_{\text{HET}} = 5.6$$

A partir des tests sur érosion de trous, (Wan et Fell 2004) ont suggéré des orientations basées sur les valeurs de l'indice d'érosion pour estimer la prédisposition des sols à l'érosion, et ils ont classé ces sols on leurs aptitude à l'érosion du plus érosif au sol qui à le moins de risque, le tableau suivant montre ce classement en fonction de la valeur de l'indice d'érosion :

Tableau (VI.2): Classement des sols selon l'indice d'érosion

Group number	Erosion rate index	Description
1	< 2	Extremely rapid
2	2-3	Very rapid
3	3-4	Moderately rapid
4	4-5	Moderately slow
5	5-6	Very slow
6	> 6	Extremely slow

D'après ce tableau et le résultat de l'indice d'érosion calculé on déduit que l'érosion interne dans ce sol (argile) s'elle parvenait à apparaitre serait **très faible**

VI.7/Conclusion :

D'après les essais faits on conclut que le phénomène d'érosion de trou est très complexe à reproduire et à détecter dans le cas d'un barrage réel, car il entre en interaction avec beaucoup d'autres paramètres tels que la perméabilité et la porosité.

Et d'après les résultats obtenus, on constate que le sol utilisé pour la construction du noyau d'argile du barrage Souk Tleta est un sol très faible en terme de risques d'érosion interne, mais la prévention et l'entretien restent indispensables pour éviter tout les risques liées a ce phénomène.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les écoulements à travers les milieux poreux, notamment à travers la digue d'un barrage en terre est un phénomène très complexe car il est soumis à plusieurs paramètres fondamentaux, essentiellement l'interaction eau-sol. Plusieurs études ont été faites dans ce domaine on cite notamment Darcy.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour la résolution des problèmes liées à ce phénomène. Dans ce travail, on a choisi de se diriger vers la méthode numérique, qui est une méthode réalisable sous le logiciel Comsol pour la résolution de l'équation de Darcy en utilisant les éléments finis. Avec cette méthode, les résultats de traçage des lignes de courants, la ligne de saturation et la détermination du débit de fuite ont été obtenus.

On conclut dans ce cas que l'écoulement à travers une digue de barrage est soumis à trois paramètres : la conductivité, le gradient hydraulique et la vitesse de l'écoulement.

Ces écoulements peuvent influencer la distribution des particules de sol dans la digue, ce qui engendre le phénomène de l'érosion interne qui est aussi un phénomène très complexe et difficilement détectable puisqu'il se passe à l'intérieur du sol néanmoins, il existe des méthodes comme : l'essai d'érosion de trou, essai triaxiale, essai en canal pour caractériser ce phénomène et permettre une connaissance approfondie et une meilleure compréhension du mode de fonctionnement de l'érosion interne.

Pour caractériser ce problème majeur nous avons réalisé une expérience au laboratoire qui consiste à reproduire l'essai d'érosion de trou (HET) pour quantifier ce phénomène en utilisant un échantillon prélevé du noyau argileux de la digue du barrage de Souk Tleta à Tizi Ouzou qui est un barrage en cours de construction et connaître l'érodabilité de l'argile employé dans cette digue.

Grace à cette expérience, nous avons pu quantifier et caractériser l'érosion interne en suivant l'évolution de la concentration des particules en suspension de l'argile dans l'eau, et en visualisant la forme finale du trou initialement formé. Dans ces résultats on remarque que le diamètre du trou initialement préformé a augmenté et l'érosion de l'échantillon d'argile est bien visible. Avec l'aide de ces résultats on a pu classer cet argile grâce à l'indice d'érodabilité calculé, ce qui nous a mené à déduire que, dans la digue de col du barrage de Souk Tleta, l'érosion interne est très faible or que le suivi et l'entretien sont indispensables car ce phénomène peut progresser rapidement dans le temps.

Ces deux phénomènes interconnectés sont difficiles à cerner, des études approfondies et détaillées dans ce sens doivent être réalisées pour enrichir nos connaissances.

Une modélisation numérique du phénomène d'érosion de trou peut se faire pour bien comprendre ces mécanismes et ces paramètres.

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

ALBITAR, A. (2007). *Modélisation des écoulements en milieu poreux hétérogènes 2D / 3D, avec couplages surface / souterrain et densitaires*. Université de Toulouse: Thèse de doctorat Université de Toulouse.

Alexandre, E. (2005). *Aide-memoire, éléments finis*. France: CHIRAT.

Armelle, L. (2010). *Détection de fuite dans les barrage en remblai par la méthode de polarisation spontanée et par topographie électrique: Cas de la jonction de deux barrages en remblai*. Canada : Université de Montréal.

BEGUIN, R., GUIDOUX, C., FAURE, Y.-H., & PHILIPPE, P. (2009). Erosion de contact entre un filtre granulaire et divers sols fins, en présence d'un écoulement d'eau parallèle à l'interface. *19ème Congrès Français de Mécanique*. France.

Benamar, A., & Seghir, A. (2017). Physical and analytical modeling of internal erosion of fine particles in cohesionless soils. *Journal of Porous Media*, 205–216.

Bendahmane, F. (2005). *Influence des interactions mécaniques eau-sol sur l'érosion interne*. Thèse de doctorat Université de Nantes.

Bendahmane, F., Marot, D., Alexis, A., & Thomas, P. (2009). Etude expérimentale de l'évolution par érosion interne des matériaux d'ouvrages hydrauliques en terre. *Rencontre universitaire génie civil*, 8.

BERNI, N., & OULD ELHACEN, Y. (2012). *Étude numérique d'un écoulement dans un milieu poreux*. Mémoire de master Université de Ouargla.

BLAIS, J.-P. (s.d.). Typologie de l'érosion interne et érosion interne des digues fluviales. *Une courte revue bibliographique*, 201-211.

Bonelli, S., & Benahmed, N. (2007). *Etude expérimentale de l'érosion interne d'une kaolinite*. Bordeaux: 25e rencontres de l'AUGC.

Bonelli, S., Brivois, O., & Benahmed, N. (2007). *Modélisation du renard hydraulique et interprétation de l'essai d'érosion de trou*.

Bonelli, S., Golay, F., & Helluy, P. (2006/2009). *Modélisation numérique diphasique d'une interface solide/fluide avec érosion, application à l'érosion interne*. Projet de thèse Cemagref Aix-en-Provence.

Bouchelghoum, F., & Aid, M. (2002). Etude numérique des écoulements souterranis par la méthode des éléments finis (Application au cas d'un barrage en terre). *mémoire de fin d'étude*. Université A-Mira de Béjaia.

- Carlier, M. (1980). *Hydraulique générale et appliqué*. France: Eyrolles.
- Cherif, S. M., & Bouhassane, M. C. (2013). *Etude comparative des barrages à noyau central*. Mémoire de fin d'études, Université de Tlemcen.
- Damien, L., Bonelli, S., & Brivois, B. (2007). *Modélisation de l'érosion par renard hydraulique*. 25e rencontres de l'AUGC, 23-25 mai 2007, Bordeaux.
- Essais de laboratoire et en place de mécanique des sols. (1973, juin). Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées LCPC, France.
- Fry, J.-J. (2010). *Erosion interne des ouvrages hydrauliques*. France.
- Jouhansson, S. (s.d.). Detection of Internal Erosion in Embankment Dams – Possible Methods in Theory and Practice. 24.
- KISSI, B., EL BAKKALI, L., KHAMLICH, A., BEZZAZI, M., DUBUJET, P., PARRON VERA, M., (2009). *Modélisation 2D de l'essai d'érosion de tube (HET)*. Marseille: 19ème Congrès Français de Mécanique.
- Lakshmi, N., & Bonala, R. a. (1997). Critical shear stress and its relationship with cohesion for sand–kaolinite mixtures. *Can. Geotech.* , 26-33.
- Lominé, F. (2007). *Écoulement de particules dans in milieu poreux*. Université de Rennes: Thèse de doctorat.
- M, S. (2012). *Écoulement à travers un milieu poreux, étude stochastique*. Thèse de magistère Université de Tizi Ouzou.
- MAROT, D., BENDAHDANE, F., ROSQUOET, F., & ALEXIS, A. (2009). Internal Flow Effects on Isotropic Confined Sand-Clay Mixtures. *Soil & Sediment Contamination* , 294–306.
- Mestat, P. (1997). *Maillage d'élément finis pour les ouvrages de géotechnique conseils et recommandations*.
- Mouali, L., & Harzouz, S. (2015). *Etude expérimentale et simulation numérique des infiltrations à travers les barrages en terre*. Béjaia: Mémoire de master Université A-Mira.
- Othman, H. C. (2013). *Les écoulements dans les milieux poreux partiellement saturé*. Mémoire de master, Université de Tlemcen.
- Pascal, J., & Paul-Louis, G. (1999). *Maillages: Application aux éléments finis*. Paris: HERMES Sciences Publicitaire.
- PHAM, T. L. (2008). *Erosion et dispersion des sols argileux par un fluide*. Thèse de doctorat Université de Paris.
- Reddi, L. N., & Bonala, M. V. (1997). Critical shear stress and its relationship with cohesion for sand–kaolinite mixtures. *Can. Geotech.* , 26-33.

Regazzoni, P.-L., & Marot, D. (2013). A comparative analysis of interface erosion tests. *Nat Hazards*,

Rosquét, F., Bendahmane, F., Marot, D., & Alexis, A. (2005). Caractérisation expérimentale des phénomènes d'érosion interne sur des échantillons sablo-argileux. *Rencontres universitaire de génie civil*, 8.

Rousselet, R. (2007). *Modelisation de l'érosion interne dans les barrages en remblai*. Projet de fin d'étude INSA de Strasbourg.

Seghir, A. (2005-2014). *Cours méthodes des éléments finis*.

Seghir, A. (2012-2013). Modelisation et validation experimentale des transferts en milieu poreux. *Rapport de recherche Post-Doctorat*.

Seghir, A., Benamar, A., & Wang, H. (12 Mars 2014). Effects of Fine Particles on the Suffusion of Cohesionless Soils. Experiments and Modeling. *Springer Science*.

Wan, C. F., & Fell, R. (Avril 2004). Investigation of Rate of Erosion of Soils in Embankment Dams. *JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING*, 373-380.

WHITAKER, S. (1986). *Flow in Porous Media I: A Theoretical Derivation of Darcy's Law*. U.S.A: University of California

