

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

**Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master**

Spécialité : Génie Civil

Option : VOA

Présenté par :

M<sup>r</sup> : BENSALD Abdelkarim

M<sup>r</sup> : KHALILI Tayeb

*Sujet du mémoire*

**Étude bibliographique du processus  
de filtration dans les milieux poreux**

*Soutenu publiquement le / 06 / 2023 devant le jury composé de :*

M<sup>r</sup> BOUAKKAZ Khaled

Président

M<sup>r</sup> KHILOUN Mokhtar

Rapporteur

M<sup>r</sup> CHIKH Abdelbaki

Examineur

M<sup>r</sup> BELMAHI Samir

Examineur

PROMOTION : 2022 – 2023

وقال صلى الله عليه وسلم  
يا أيها الناس اذكروا الله  
الذي خلقكم فمن غاب عن طاعة  
الله فقد غاب عن نفسه



## **Dedicace**

A mes très chers parents,  
À mes frères et sœurs,  
A toutes mes amies

BENSAID Abdelkarim



## **Dédicaces**

A mes très cher parents

A mes chères frères et sœurs

A tous les professeurs et enseignants

A toute ma promotion de génie civil

A mon binôme Abdelkarim

A tous mes amis et mes collègues

**KHALILI Tayeb**

# Remerciement

Avant tout, on remercie Dieu le tout puissant d'avoir nous donner l'envie, le courage et la force pour mener à terme ce travail.

En second lieu, Nous aimerons adresser nos plus sincères remerciements à notre encadreur KHILOUN Mokhtar, pour l'intérêt qu'il a accordé à notre travail de manière approfondie, ainsi que pour son soutien, ses multiples conseils.

Nous aimerons remercier très chaleureusement monsieur BOUAKKAZ Khaled le président de jury ainsi que les examinateurs monsieur CHIKH Abdelbaki et monsieur BELMAHI Samir, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger ce travail.

Nous remercions aussi toutes les personnes qui ont contribués de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Enfin nous tenons à remercier toute la promotion de génie civil.

# Résumé

La filtration dans les milieux poreux est un processus complexe qui implique la séparation des particules en suspension dans l'eau en les piégeant dans les pores du milieu poreux. Ce processus est utilisé dans de nombreux domaines, tels que le traitement de l'eau, la filtration des eaux usées.

Les paramètres qui influencent l'efficacité de la filtration dans les milieux poreux comprennent la taille des pores, la porosité, la perméabilité, la charge de filtration et la concentration de particules en suspension.

La taille des pores et la porosité affectent la capacité du milieu poreux à piéger les particules, tandis que la perméabilité détermine la vitesse d'écoulement de l'eau à travers le milieu poreux. La charge de filtration et la concentration de particules en suspension influencent la quantité de particules piégées dans le milieu poreux.

L'étude des mouvements d'eau dans les milieux poreux est un problème important pour le géotechnicien, car ces mouvements peuvent modifier au cours du temps la distribution des pressions interstitielles exercées dans les massifs de sol,

Les infiltrations ont toujours constitué des contraintes pour les concepteurs du fait que les conséquences sont de deux natures : hydrauliques en relation avec les valeurs admissibles des débits de fuites, mécaniques par rapport aux pressions interstitielles développées en liaison avec les états de contraintes et aux gradients hydrauliques élevés provoquant des phénomènes d'entraînement des grains des sols.

# Abstract

Filtration in porous media is a complex process that involves separating suspended particles in water by trapping them in the pores of the porous medium. This process is used in various fields, such as water treatment and wastewater filtration.

Parameters that influence the efficiency of filtration in porous media include pore size, porosity, permeability, filtration load, and suspended particle concentration.

Pore size and porosity affect the ability of the porous medium to trap particles, while permeability determines the flow rate of water through the porous medium. Filtration load and suspended particle concentration influence the amount of particles trapped in the porous medium.

Studying water movement in porous media is an important issue for geotechnical engineers because these movements can modify the distribution of interstitial pressures exerted within soil masses over time.

Infiltration has always presented challenges for designers due to two types of consequences: hydraulic consequences related to acceptable leakage flow rates and mechanical consequences related to interstitial pressures developed in connection with stress states and high hydraulic gradients causing soil grain entrainment phenomena.

## ملخص

الترشيح في الوسط المسامي هو عملية معقدة تنطوي على فصل الجسيمات المعلقة في الماء عن طريق احتجازها في المسامات الوسط المسامي. تستخدم هذه العملية في العديد من المجالات مثل معالجة المياه وتنقية مياه الصرف الصحي

المعلمات التي تؤثر على كفاءة الترشيح في الوسط المسامي تشمل حجم المسامات والتسامح والنفاذية وحمل الترشيح وتركيز الجسيمات المعلقة

حجم المسامات والتسامح يؤثران على قدرة الوسط المسامي على احتجاز الجسيمات، بينما النفاذية تحدد سرعة تدفق الماء خلال الوسط المسامي. حمل الترشيح وتركيز الجسيمات المعلقة يؤثران على كمية الجسيمات التي تحتجز في الوسط المسامي

دراسة حركة الماء في الوسط المسامي مسألة مهمة للمهندسين الجيوتقنيين نظرًا لأن هذه الحركات يمكن أن تعدل توزيع الضغوط الفجوية التي تمارس على الكتل الأرضية مع مرور الوقت

التسربات دائمًا ما تشكل تحديات للمصممين بسبب نوعين من التبعات: تبعات هيدروليكية تتعلق بقيم تدفق التسرب المقبولة وتبعات ميكانيكية تتعلق بالضغوط الفجوية المتولدة في ارتباط مع حالات الإجهاد والتدرجات الهيدروليكية العالية التي تتسبب في ظواهر تجريف حبيبات التربة

## Liste des abbreviations

$V_a$  : volume de l'air

$V_w$  : volume de l'eau

$V_s$  : volume des grains solide

$V$  : volume total

$V_v$  : volume du vide

$W_w$  : poids de l'eau,

$W_s$  : poids de la colonne du sol

$W$  : poids total

$n$  : *volume de vide*

$d_{50}$  : le diamètre moyen des grains

$\nu$  : la viscosité cinématique du fluide.

$S$  : section de l'échantillon,

$L$  : longueur

$\Delta h$  : perte de charge piézométrique à travers l'échantillon

$K$  : coefficient de perméabilité.

$Q$  : débit total

$q$  : débit traversant chaque couche élémentaire  $i$

$N_h$  : Nombre de chutes d'équipotentialité

$N_c$  : Nombre de canaux d'écoulement

$dq$  : débit dans un canal d'écoulement (entre deux lignes de courant adjacentes)

$\Delta h$  : perte de charge entre deux lignes équipotentiels adjacentes

$a$  : distance entre deux lignes de courants

$b$  : distances entre deux lignes équipotentiels

$y_0$  : est l'ordonnée du point de sortie de la surface libre.

$U_{M_2}$  Pression de l'eau

$Z_{M_2}$  Côte du point  $M_2$  par rapport à un plan arbitraire fixé.

A : valeur moyenne de la section mouillée du filtre

$K_r$  : perméabilité du remblai du barrage [m/s]

q : débit de fuite [m<sup>3</sup>/s/ml]

n : Porosité du sol en fonction d'unité

$K_F$  : Coefficient de perméabilité du filtre.

$K_N$  : Coefficient d'infiltrations du remblai de la digue

q : débit d'infiltration (m<sup>3</sup>/s/ml)

I : gradient hydraulique

K : Coefficient de perméabilité.

A : Section d'infiltration par unité de longueur.

$\Delta H$  : perte de charge dans le corps de la digue.

$\delta n$  : épaisseur moyenne de la digue.

$I_{adm}$  : gradient hydraulique admissible

$K_s$  : coefficient de sécurité

$J_f$  : gradient d'infiltration dans la fondation du barrage

$T_c$  : profondeur de calcul de la zone d'infiltration de la fondation

L : largeur du barrage à la base

$\Delta H$  : la différence du niveau d'eau amont aval

m : coefficient de débit dépend de la forme de déversoir

b : largeur du déversoir en m.

H : charge d'eau sur le déversoir dépend de la vitesse d'approche d'eau.

# Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I Généralités sur les écoulements.....	4
I .1. Introduction.....	4
I .2. Différents types d'écoulement.....	4
I .3. Classification des écoulements .....	4
I .3.1. Ecoulements permanents et non permanents .....	4
I .3.2. Écoulement compressible ou incompressible .....	5
I .4. Différent type de fluides.....	5
I .4.1. Fluide visqueux .....	5
I .4.2. Fluides parfaits .....	5
I .5. Nombre de Reynolds.....	5
I .5.1. Régime Laminaire .....	6
I .5.2. Régime transitoire.....	6
I .5.3. Régime turbulent.....	6
I .6. Equations de mouvement.....	6
I .6.1. Equation de continuité.....	6
I .6.2. Equation de conservation de la quantité de mouvement.....	6
I .6.3. Equation de Navier-Stokes.....	7
Chapitre II : Description et propriétés d'un milieu poreux.....	9
II .1. Définition d'un milieu poreux.....	9
II .2. Les paramètres physiques.....	9
II .3. Les phases du sol .....	13
Chapitre III Propriétés hydrauliques des sols.....	16
III.1. Généralités sur les sols.....	16
III.2. L'eau dans le sol.....	16
III.3. Écoulement à travers un sol.....	18
III.3.1. Etat de l'eau dans les milieux poreux.....	18
III.3.2. Facteur influençant sur les infiltrations .....	20
III.3.3. Vitesse de l'eau dans le sol.....	20
III.3.4. Charge hydraulique.....	20
III.3.5. Gradient hydraulique.....	21

III.4. Loi de DARCY.....	21
III.4.1. Surfaces équipotentiellles.....	22
III.5. Permeabilite du sol.....	23
III.5.1. Coefficient de perméabilité.....	23
III.5.2. Perméabilité moyenne fictive horizontale et verticale des terrains lités..	25
III.6. Différents types de filtration.....	27
III.7. Sites de rétention des particules.....	29
III.8. Influence de la concentration des particules.....	30
III.9. Influence des milieux poreux.....	31
III.10. Conclusions.....	33
Chapitre IV : Étude des infiltrations à travers la digue d'un barrage en terre (cas du Barrage Dahmouni).....	35
IV.1. Introduction.....	35
IV.2. Réseau d'écoulement dans le cas des barrages en remblai .....	35
IV.3. Débit defuite.....	37
IV.4. Pressions interstitielles et renards.....	39
IV.5. Débit unitaire et épaisseur du drain tapis.....	43
IV.6. Étude des infiltrations à travers la digue (cas du Barrage Dahmouni).....	44
IV.6.1. Localisation.....	44
IV.6.2. Caractéristiques hydrologiques.....	45
IV.6.3. Caractéristiques de la retenue.....	45
IV.6.4. Caracteristiques techniques du barrage de DAHMOUNI.....	46
IV.6.5. Choix du drain.....	48
IV.6.6. Choix du filtre.....	49
IV.6.7. Protection de la digue.....	49
IV.6.8. Détermination de l'épaisseur minimale de la couche d'enrochement....	49
IV.6.9. Protection de la crête.....	50
IV.6.10. Étanchéité de la fondation.....	50
IV.6.11. Drainage du barrage.....	51
IV.7. Étude des infiltrations.....	55
IV.8. Laminage des Crues .....	62
Conclusion générale.....	64
Bibliographie.....	67

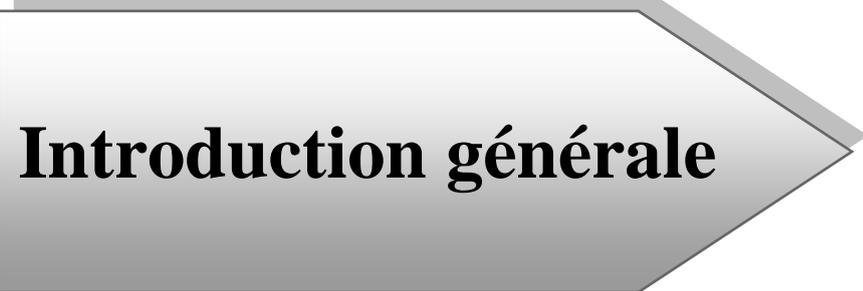
# Liste des figures

Figure II.1 : Une portion du sol.....	9
Figure II.2 : porosité d'interstice .....	11
Figure II.3 : porosité à fissure.....	11
Figure II.4 : Différents types de pores.....	12
Figure II.5 : les différents états d'eau dans le sol.....	13
Figure III.1: Différents états de l'eau dans le sol.....	17
Figure III.2 : Infiltration de l'eau dans le sol en condition non saturée.....	19
Figure III.3 : Infiltration de l'eau dans le sol en condition saturée.....	19
Figure III.4 : Définition du gradient hydraulique.....	21
Figure III.5 : Zones d'écoulement laminaire et d'écoulement turbulent.....	22
Figure III.6 : Cas d'une nappe avec écoulement.....	23
Figure III.7 : Ecoulement de l'eau à travers l'échantillon AB.....	24
Figure III.8 : Perméabilité verticale moyenne des sols .....	25
Figure III.9 : Perméabilité horizontale moyenne des sols .....	26
Figure III.10 : Différents types de filtration.....	27
Figure III.11 : Sites de rétention .....	29
Figure III.12: Effet de la concentration des particules sur la chute de la perméabilité...31	
Figure III.13: Images du dépôt de colloïdes dans les micromodèles .....	32
Figure IV.1 : Tracé du réseau d'écoulement dans le cas de barrage homogène sur sol imperméable sans drain.....	35
Figure IV.2 : Tracé du réseau d'écoulement dans le cas de barrage homogène avec drain horizontal sur sol impermeable.....	36
Figure IV.3 : Tracé du réseau d'écoulement dans le cas de barrage homogène avec drain horizontal sur sol perméable de même perméabilité que le massif...36	
Figure IV.4 : Réseau d'écoulement.....	37
Figure IV.5 : Détermination de la pression interstitielle.....	39
Figure IV.6: Renard dans le corps de l'ouvrage .....	40
Figure IV.7: phénomène de boullance.....	41
Figure IV.8 : phénomène de boullance (cas général d'un écoulement souterrain).....	41
Figure IV.9 : Débit unitaire et épaisseur du drain tapis.....	43

Figure IV.10 : Barrage de DAHMOUNI.....	46
Figure IV.11: Courbe de Casagrande pour la détermination du paramètre alpha.....	57
Figure IV.12 : Correction de la ligne de saturation avec le parement aval.....	58
Figure IV.13 : Schéma de calcul d'infiltration.....	61

## Liste des tableaux

Tableau III.1 : caractéristiques correspondant à diverses valeurs de K.....	24
Tableau III.2 : Caractéristiques hydrauliques typique des milieux poreux.....	24
Tableau IV.1: Analyse granulométrique du remblai.....	47
Tableau IV.2 : Epaisseur mini de la couche d'enrochement en fonction de la hauteur des vagues.....	50
Tableau IV.3 : Différentes caractéristiques de la digue.....	52
Tableau IV.4 : Coordonnées de la parabole de KOZENY .....	57
Tableau IV.5 : Classification des barrages.....	59
Tableau IV.6 : Gradient admissible à travers le remblai terreux.....	60
Tableau IV.7 : Détermination du gradient d'Infiltration admissible.....	60
Tableau IV.8 : Détermination de coefficient de sécurité.....	61



**Introduction générale**

# Introduction générale

L'étude bibliographique du processus de filtration dans les milieux poreux vise à comprendre les mécanismes de filtration dans les milieux poreux, tels que les sols, les roches, les filtres et autres matériaux poreux. Cette discipline est importante pour de nombreux domaines, notamment la science des matériaux, l'ingénierie civile, l'hydrologie.

Les milieux poreux sont des matériaux ayant une structure complexe de petits canaux, de cavités et de vides qui peuvent permettre le passage de fluides et de particules solides. Le processus de filtration dans ces milieux dépend de nombreux facteurs, tels que la taille des pores, la viscosité du fluide, la concentration des particules et la pression appliquée.

La filtration est un procédé de séparation permettant de séparer les constituants d'un mélange qui possède une phase liquide et une phase solide au travers d'un milieu poreux.

Une différence de pression force le liquide à passer à travers le filtre pendant que les particules solides sont retenues à la surface.

La filtration est souvent accompagnée de deux phénomènes:

- Le colmatage : est provoqué par des particules qui se déposent à la surface du filtre mais surtout par leur pénétration dans les interstices de la matière filtrante. Ce colmatage modifie totalement la porosité et ralentit la filtration.
- L'adsorption : La matière filtrante possède une certaine charge électrique. Ainsi, certains produits peuvent être retenus bien que leurs dimensions permettent leur passage à travers les pores du filtre.

L'infiltration d'eau au travers du corps ou de la fondation des ouvrages en remblai est un problème qui peut devenir préoccupant. Le phénomène de l'infiltration de l'eau est évolutif et il peut mettre en péril la pérennité ou la stabilité de ces ouvrages et par conséquent la sécurité du public.

La pérennité des ouvrages hydrauliques en terre (digues, barrages) et de leur fondation nécessite la caractérisation de la résistance des sols aux fuites excessives et à l'érosion interne. L'érosion interne peut en effet conduire très rapidement à la rupture de l'ouvrage.

Les ruptures et les endommagements des barrages montrent que l'érosion interne, provoquée par des infiltrations, représente un risque important pour la stabilité et la sécurité, des digues et des barrages. Cette forme d'érosion est d'autant plus dangereuse qu'elle peut subitement provoquer, sans signe, une destruction de l'ouvrage lorsque le réservoir est plein.

## Introduction générale

Les zones d'infiltrations dans les fondations des barrages sont souvent soumises à des procédés d'érosion. Par conséquent, il est nécessaire pour la sécurité des retenues de pouvoir détecter et délimiter des zones d'infiltrations dès leur premier stade de développement.

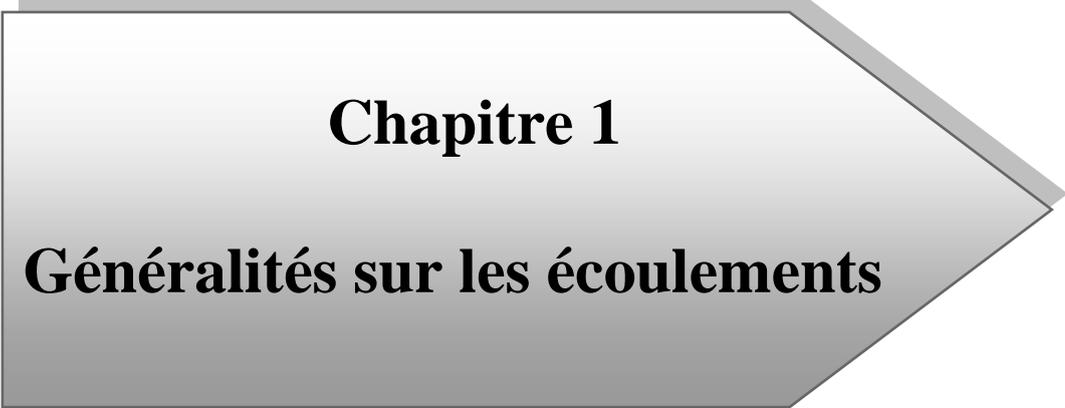
Les paramètres qui conditionnent les écoulements dans les sols saturés sont la gravité et les forces de frottement au niveau des grains. Ces paramètres sont dus essentiellement à la viscosité, tandis que les écoulements dans les sols non saturés mettent en jeu les interactions entre les trois phases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

IL existe des forces de surface importantes qui interviennent au niveau des interfaces eau- air- solide. Ces dernières sont généralement fonction des degrés de saturation en eau et en air, de la nature des liaisons chimiques, de la température et de la pression.

La description quantitative du processus d'écoulement devient très complexe, en allant d'un milieu saturé à un milieu non saturé, à cause des variations de l'état hydrique du sol pendant l'écoulement. Ces variations impliquent des relations complexes entre les différents paramètres de l'écoulement.

Notre étude est répartie en quatre chapitres précédée par une introduction générale

- Le premier chapitre présente les généralités sur les écoulements
- Le deuxième chapitre traite la description et propriétés d'un milieu poreux
- Le troisième chapitre décrit les propriétés hydrauliques des sols
- Le quatrième chapitre porte sur les théorie sur les écoulements dans les milieux poreux
- Enfin une conclusion générale



**Chapitre 1**  
**Généralités sur les écoulements**

## Chapitre I Généralités sur les écoulements

### I .1. Introduction :

Les écoulements représentent une partie essentielle du cycle hydrologique. L'eau précipitée sur un bassin versant va se répartir en eau interceptée, évaporée, infiltrée et écoulee. La quantité d'eau collectée puis transportée par la rivière résultera des précipitations directes à la surface même du cours d'eau et des écoulements de surface et souterrain parvenant à son exutoire

### I .2. Différents types d'écoulement :

On distingue dans un premier temps deux grands types d'écoulements, à savoir : les écoulements de surface « rapides » et par opposition, les écoulements souterrains qualifiés de « lents » qui représentent la part infiltrée de l'eau de pluie transitant lentement dans les nappes vers les exutoires.

**a. L'écoulement de surface** ou ruissellement est constitué par la frange d'eau qui, après une averse, s'écoule plus ou moins librement à la surface des sols. L'importance de l'écoulement superficiel dépend de l'intensité des précipitations et de leur capacité à saturer rapidement les premiers centimètres du sol, avant que l'infiltration et la percolation, phénomènes plus lents, soient prépondérants.

**b. L'écoulement de subsurface** comprend la contribution des horizons de surface partiellement ou totalement saturés en eau ou celle des nappes perchées temporairement au-dessus des horizons argileux. Ces éléments de subsurface ont une capacité de vidange plus lente que l'écoulement superficiel, mais plus rapide que l'écoulement différé des nappes profondes.

### I .3. Classification des écoulements :

Nous classons les écoulements de fluides comme suit:

#### I .3.1. Ecoulements permanents et non permanents :

En général les propriétés du fluide en un point donné de l'espace varient avec le temps, l'écoulement est appelé non permanent ou instationnaire (par rapport au référentiel envisagé).

Parfois ces propriétés en un point fixe ne varient pas avec le temps, (les particules qui passent successivement en ce point y présentent donc les mêmes propriétés), l'écoulement est alors appelé permanent ou stationnaire.

## Chapitre I Généralités sur les écoulements

Quand l'écoulement est permanent, les trajectoires sont des courbes fixes, confondues avec les lignes de courant, et les lignes d'émission. Enfin il existe une très importante catégorie d'écoulements non permanents, dont cependant, en un point fixe, les propriétés moyennes temporelles sont constantes.

### I.3.2. Écoulement compressible ou incompressible :

Un écoulement est considéré comme compressible ou incompressible en fonction du niveau de variation de la masse volumique pendant l'écoulement. L'incompressibilité est une approximation et un fluide est considéré comme incompressible si la masse volumique reste presque constante tout le temps. Par conséquent, le volume de chaque portion de fluide reste inchangé durant le déplacement si l'écoulement (ou le fluide) est incompressible.

### I.4. Différent type de fluides :

#### I.4.1. Fluide visqueux :

Les diverses couches d'un fluide en mouvement ne peuvent pas glisser librement les unes sur les autres. Tout se passe comme si des frottements au sein du fluide s'opposaient aux mouvements relatifs des lignes de courant voisines. Cette résistance au glissement ou à la déformation caractérise la viscosité d'un fluide; elle est la propriété inverse de la fluidité.

#### I.4.2. Fluides parfaits :

Un fluide parfait est un fluide dépourvu de contrainte tangentielle qu'il soit au repos ou en mouvement. De ce fait les différentes couches du fluide peuvent glisser librement les unes sur les autres et ne présentent de résistance ni au cisaillement ni au repos ni au mouvement. La force de viscosité est donc identiquement nulle. Il est à noter que la notion de fluide parfait n'a aucune relation avec celle de gaz parfait, elle signifie simplement que le fluide n'est le siège d'aucun frottement.

### I.5. Nombre de Reynolds :

Le nombre de Reynolds peut être considéré comme un facteur proportionnel au rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité qui s'exercent sur une particule fluide, il est donc défini comme suit:

$$Re = \frac{\text{Forces d'inertie}}{\text{Forces de viscosité}} = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} \quad (I.1)$$

## Chapitre I Généralités sur les écoulements

On ne peut, naturellement, songer à étudier en détail l'écoulement autour de chaque régime mais certaines analogies se manifestent pour des régimes cependant différents. On est amené à les classer en trois catégories :

### I .5.1. Régime Laminaire $Re < 2000$ :

On appelle laminaire le mouvement très ordonné d'un fluide dont les couches qui le caractérisent sont lisses. Le mot laminaire provient de la stratification des particules de fluide.

### I .5.2. Régime transitoire $2000 < Re < 3000$ :

On appelle transitoire un régime qui apparaît lorsque l'on fait passer un circuit d'un régime permanent (continu ou périodique) à un autre, et disparaît quand le nouveau régime permanent est atteint.

### I .5.3. Régime turbulent $Re > 3000$ :

Les turbulences résultantes des forces d'inerties qui deviennent plus importantes que les forces de viscosité et la structure du fluide tendent à se transformer de manière irréversible et importante.

## I .6. Equations de mouvement :

### I .6.1. Equation de continuité :

Cette équation exprime la conservation de la masse contenue dans le volume de base. On l'appelle également l'équation de continuité.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0 \quad (\text{I .2})$$

### I .6.2. Equation de conservation de la quantité de mouvement :

L'équation de conservation de l'impulsion du fluide newtonien est dérivée de la relation de base de la dynamique (également connue sous le nom de deuxième loi de Newton) en l'appliquant au continuum :

L'équation de conservation de la quantité de mouvement peut être obtenue à partir de la loi de Newton :

$$\frac{d(m\vec{q})}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{v.c} \rho \vec{q} dV + \int_{s.c} \rho \vec{q} (\vec{q} \cdot \vec{n}) dS = \sum F_{ext} \quad (\text{I .3})$$

Généralement deux types de forces agissent sur le fluide : les forces volumique; et les forces surfaciques

$$F_V = \int_{V.C} \rho \vec{f} dV$$

$$F_S = \int_{S.C} \bar{P} \vec{n} dS \quad (I.4)$$

$$\text{Avec } \bar{P} = -p\bar{I} + \bar{\tau}$$

$$(I.5)$$

$\bar{P}$ : Tenseur de contraintes surfacique.

$p\bar{I}$ : Tenseur de contraintes associées à la pression.

$\bar{\tau}$ : Tenseur de contraintes visqueuses.

En remplaçant par les expressions (I.3) et (I.4) dans l'équation (I.5), on obtient :

$$\frac{d}{dt} \int_{V.C} \rho \vec{q} dV + \int_{S.C} \rho \vec{q} (\vec{q} \cdot \vec{n}) dS = \int_{V.C} \rho \vec{f} dV - \int_{S.C} P \cdot \vec{n} dS + \int_{S.C} \bar{\tau} \cdot \vec{n} dS \quad (I.6)$$

Considérant un volume de contrôle fixe et en utilisant le théorème de Green-Ostrogorski, l'équation (I.2) peut s'écrire sous la forme différentielle (locale) suivante :

$$\underbrace{\rho \frac{\partial \vec{\vartheta}}{\partial t}}_{\text{Accélération locale}} + \underbrace{\rho (\vec{\vartheta} \cdot \nabla) \vec{\vartheta}}_{\text{Accélération convective}} = \underbrace{-\nabla P}_{\text{Gradient de pression}} + \underbrace{\gamma \rho}_{\text{Terme de force coronorelle}} + \underbrace{\mu \nabla^2 \vec{\vartheta}}_{\text{Terme visqueux}} \quad (I.7)$$

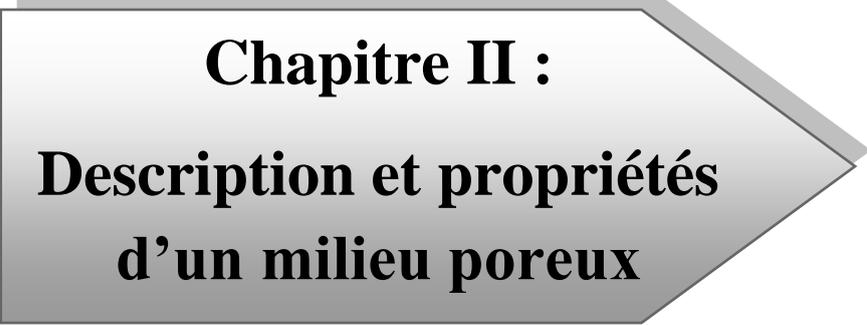
### I.6.3. Equation de Navier-Stokes :

Et à partir de là, nous écrivons l'équation de Navier-stokes :

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + u \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{u}}{\partial y} + \omega \frac{\partial \vec{u}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (I.8)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + u \frac{\partial \vec{v}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{v}}{\partial y} + \omega \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (I.9)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{\omega}}{\partial t} + u \frac{\partial \vec{\omega}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{\omega}}{\partial y} + \omega \frac{\partial \vec{\omega}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (I.10)$$



**Chapitre II :**  
**Description et propriétés**  
**d'un milieu poreux**

## Chapitre II : Description et propriétés d'un milieu poreux

### II .1. Définition d'un milieu poreux

Un milieu poreux est généralement composé d'un empilement de particules solides dans lequel un fluide peut s'écouler librement dans les pores formés entre ces particules.

Un milieu poreux est caractérisé principalement par deux propriétés macroscopiques liées entre elles et qui sont la porosité et la perméabilité. Du fait que la disposition et la taille des pores sont irrégulières, la variation des paramètres régissant cet écoulement, elle sera aussi irrégulière.

le milieu poreux peut être un massif de sol naturel (diffusion de polluants, infiltration, écoulement et rabattement de nappe), un massif autour d'un ouvrage (fondation, tunnel, rideau de palplanches, paroi moulée, etc.) ou d'un sol d'apport (digues et barrages en terre, remblai, etc.).

Un milieu poreux peut se présenter sous plusieurs formes :

- Non consolidés : sables, grains, ...
- Consolidé formé de grains ou de fibres cimentées entre eux (roches, briques, bétons...)
- Saturé : contenant une seule phase fluide
- Non saturé : contenant plusieurs phases fluides

### II .2. Les paramètres physiques

#### a. Le volume

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

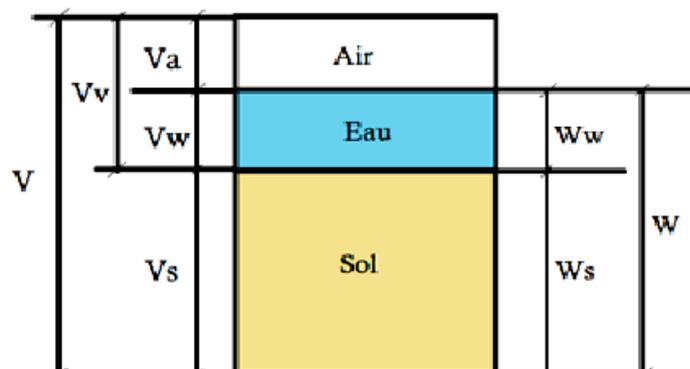


Figure II.1 : Une portion du sol.

$V_a$  : Le volume de l'air

$V_w$  : Le volume de l'eau

$V_s$  : Le volume des grains solide

## Chapitre II : Description et propriétés d'un milieu poreux

$V$  : Le volume total

$V_v$  : Le volume du vide

### b. Les poids

Ce sont les poids de chaque phase comme montré dans la figure II.1

$W_w$  : Le poids de l'eau,

$W_s$  : Le poids de la colonne du sol

$W$  : Le poids total

### c. Les poids volumiques du milieu poreux

Nous avons plusieurs poids volumiques définis sont comme suit :

#### - Le poids volumique apparent :

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

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

$$\gamma = \frac{W_w + W_s}{V_a + V_w + V_s} \quad (\text{II.1})$$

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

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_a + V_w + V_s} \quad (\text{II.2})$$

#### - Le poids volumique absolu des grains solides :

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

$$\gamma_s = \frac{\text{Le poids des grains solide}}{\text{Le volume des grains solide}} = \frac{W_s}{V_s} \quad (\text{II.3})$$

### d. La teneur en eau :

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

$$\omega = \frac{\text{Le poids de l'eau}}{\text{Le poids des grains solides}} = \frac{W_w}{W_s} \quad (\text{II.4})$$

## Chapitre II : Description et propriétés d'un milieu poreux

### e. La porosité

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

$$n = \frac{\text{Le volume de vide}}{\text{Le volume totale}} = \frac{V_v}{V} \quad (\text{II.5})$$

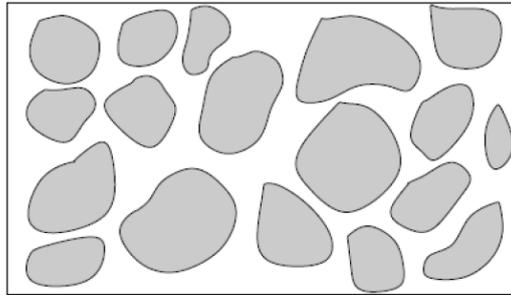
$n$  = Le volume de vide

Le volume totale =  $V_v$

Selon les pores, on distingue :

#### - Porosité d'interstice :

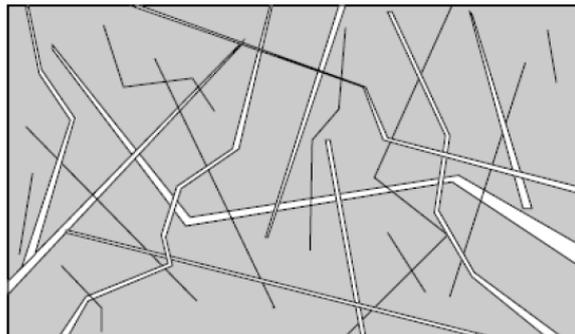
La porosité d'interstice représente les vides autour des particules solides plus ou moins liés les uns aux autres



**Figure. II.2** : porosité d'interstice

#### - Porosité à fissure :

La porosité à fissure correspond à des fractures (fissures) dans la matrice.



**Figure. II.3** : porosité à fissure

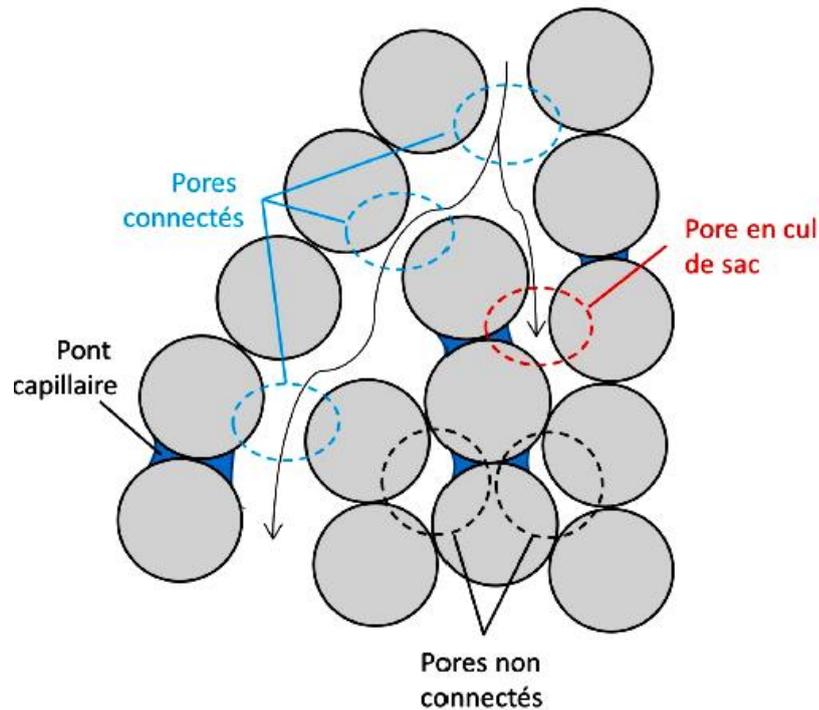


Figure. II.4 : Différents types de pores

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

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

$$e = \frac{\text{Le volume de vide}}{\text{le volume des grains solide}} = \frac{V_v}{V_s} \quad (\text{II.6})$$

**g. Le degré de saturation :**

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

$$Sr = \frac{\text{Le volume de l'eau}}{\text{Le volume de vide}} = \frac{V_w}{V_v} \quad (\text{II.7})$$

**g. Le degré de saturation :**

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

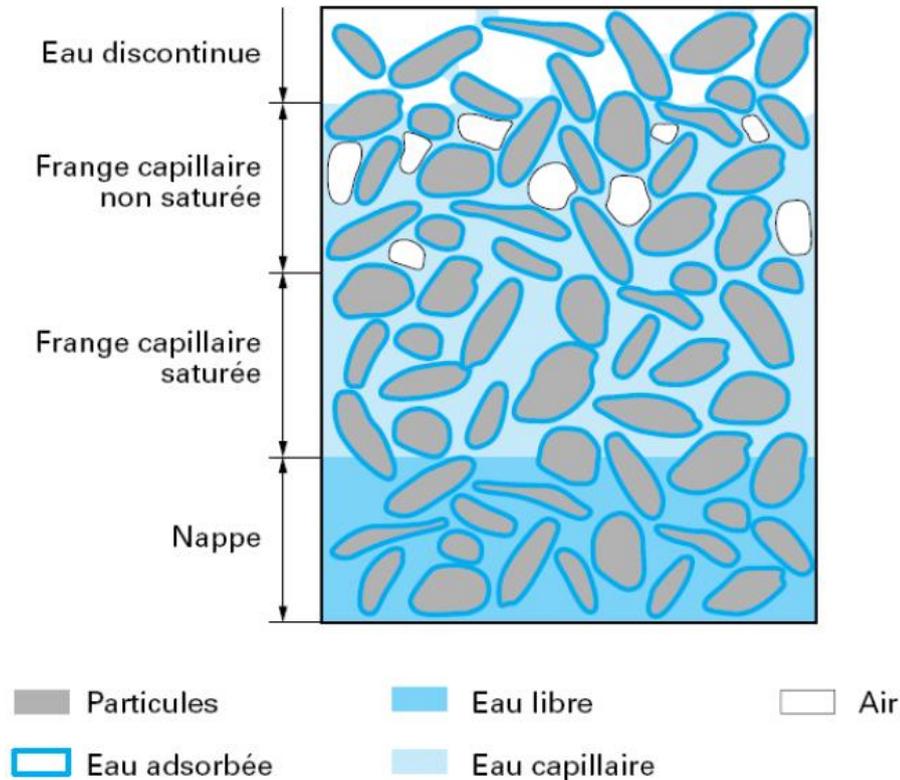
- $Sr = 1$  : Un sol saturé
- $Sr = 0$  : Un sol sec

## Chapitre II : Description et propriétés d'un milieu poreux

-  $0 < SR < 1$  : Un sol partiellement saturé

### II .3. Les phases du sol :

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



**Figure. II.5 :** les différents états d'eau dans le sol

#### a. La Phase solide

Qui se visualise sous forme de grains résultants de l'alternation de différents types de roches et formés de particules solides non cimentées de composition minéralogique variable (qui dépend de la roche mère) ; ces particules sont généralement classées en 4 catégories :

Matériaux primaires, Matériaux secondaire, sel, Matière organique.

#### b. La phase liquide

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

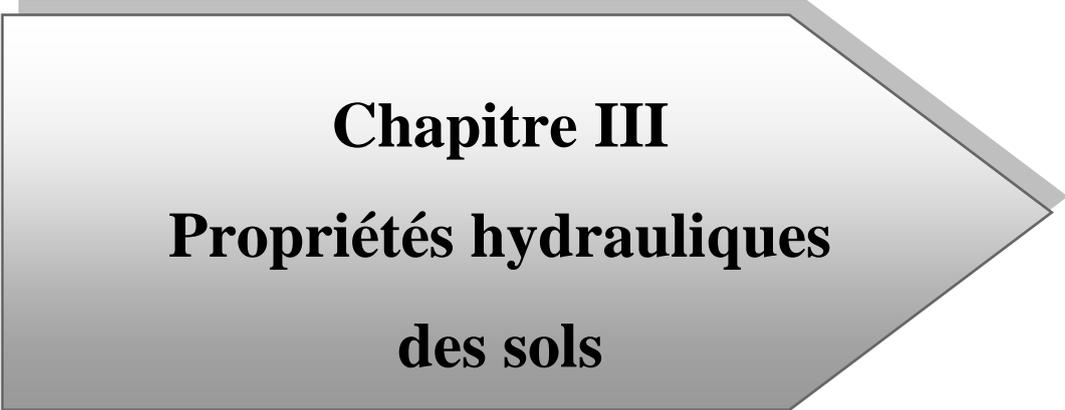
- L'eau de constitution : cette eau n'a aucune influence sur le comportement du sol sauf si elle est soumise sous une température élevée de  $400^{\circ}\text{C}$ .

## Chapitre II : Description et propriétés d'un milieu poreux

- L'eau adsorbé : Une eau à viscosité élevée qui est orientée par les forces d'attractions moléculaires.
- L'eau capillaire : C'est une eau qui ne circule pas librement, rencontré dans les sols non saturés et reste en contact avec les particules dans les canaux fines du sol.
- L'eau libre : L'eau gravitaire qui circule librement et qui obéit à la loi de DARCY dont son effet sur le comportement du sol se manifeste par une pression hydraulique, donc le cas dynamique (un écoulement) le charriage de matériaux fine est possible.

### c. La phase gazeuse

Dans les sols non saturés le reste des vides est remplis par du gaz, généralement un mélange de l'air de la vapeur, du gaz carbonique.



**Chapitre III**  
**Propriétés hydrauliques**  
**des sols**

## Chapitre III Propriétés hydrauliques des sols

### III.1. Généralités sur les sols

Le sol est un système complexe qui se constitue de particules dont la composition chimique et minéralogique diffère et dont la taille, la forme et la disposition varient.

L'agencement de ces particules détermine les caractéristiques de l'espace poreux dans lequel l'eau et l'air circulent ou sont retenus. La séparation des trois phases : sol, eau, air n'est pas facile car elles sont interdépendantes et sont extrêmement liées l'une à l'autre. Cependant pour pouvoir analyser leur effet dans le système complexe qu'ils constituent ; on les considère arbitrairement comme des constituants indépendants.

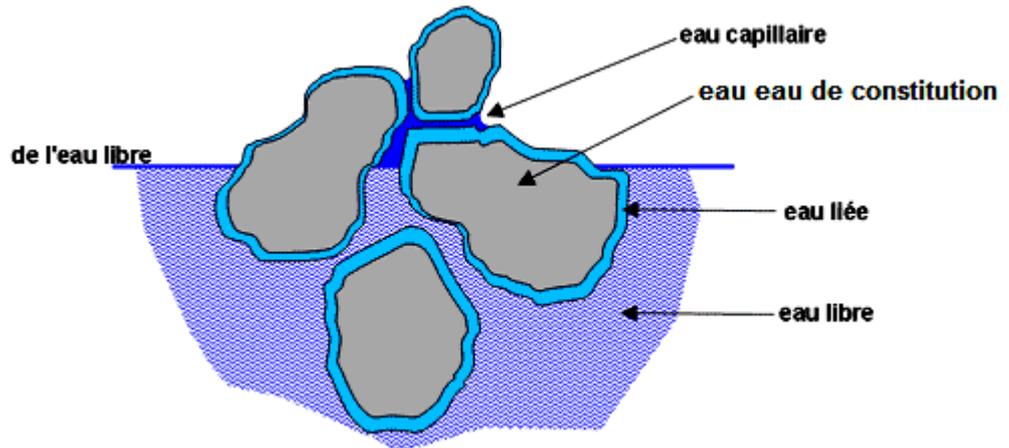
L'expression de la texture du sol renseigne sur la gamme de la taille des particules du sol. Plusieurs classifications textuelles sont utilisées pour caractériser un sol qui est basé en général sur la division des particules en trois gammes de tailles connues : sable, limon et argiles.

### III.2. L'eau dans le sol

A l'intérieur d'un sol, l'eau peut se trouver dans plusieurs états, suivant l'intensité des forces liant ses molécules aux particules solides. On distingue :

- **L'eau de constitution**, qui entre dans la composition chimique des minéraux dont les particules de sol sont formées
- **L'eau liée ou absorbée**, à la surface des grains très fins, qui est orientée par les forces d'attraction moléculaire et les forces électrostatiques ; elle a une viscosité élevée et ne transmet pas les pressions
- **L'eau libre**, qui circule librement dans les pores du sol sous l'effet des forces de pesanteur ;
- **L'eau capillaire**, qui, dans les sols non saturés, en présence d'air ou d'autres gaz, est retenue dans les canaux les plus fins du sol par les forces capillaires.

Ces liaisons de l'eau avec les particules du sol dépendent de la nature minéralogique des particules et de leurs dimensions.



**Figure III.1:** Différents états de l'eau dans le sol

Par ailleurs, pour étudier l'écoulement de l'eau dans les sols, nous admettrons les hypothèses suivantes :

L'eau interstitielle est incompressible , il en est de même pour les grains solides,

La masse d'eau interstitielle se conserve,

En effet si l'on considère un volume  $V$  de sol saturé, la quantité d'eau  $V_1$  qui rentre dans ce volume en un instant donné est égale au volume  $V_2$  qui en sort, si bien qu'à tout instant le volume d'eau contenu dans le sol est le même.

C'est-à-dire :  $V_1 = V_2$

Si  $\vec{V} (v_x, v_y, v_z)$  est la vitesse d'écoulement de l'eau dans le sol, la condition de conservation de la masse d'eau interstitielle s'écrit :

$$\text{div } \vec{V} = 0 \rightarrow \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (\text{III.1})$$

- a) Les contraintes totales  $\sigma$  et effectives  $\sigma'$  ainsi que la pression de l'eau ( $u$ ) restent liées par la relation de TERZAGHI :  $\sigma = \sigma' + u$  et  $\tau = \tau'$

### III.3. Écoulement à travers un sol

#### III.3.1. Etat de l'eau dans les milieux poreux

Dans la théorie des milieux poreux, on caractérise généralement l'eau liquide par deux variables : sa quantité et son état énergétique

La quantité est représentée par la teneur en eau volumique qui est le rapport volumique d'eau contenue dans un solide sur le volume de ce solide.

$$\theta = \frac{V_{eau}}{V_{total}} \quad (\text{III.2})$$

On dit que le milieu est saturé d'eau lorsque la teneur en eau volumique est égale à la porosité, c'est à dire, quand tous les pores sont remplis d'eau.

L'infiltration qualifie le transfert de l'eau à travers les couches superficielles du sol, lorsque celui-ci reçoit une averse ou s'il est exposé à une submersion. L'eau d'infiltration remplit en premier lieu les interstices du sol en surface et pénètre par la suite dans le sol sous l'action de la gravité et des forces de succion

Lorsque les sols sont saturés, que l'eau est libre de circuler et qu'un gradient hydraulique apparaît, on parle alors de nappe souterraine.

En particulier, on distingue :

- **Les terrains aquifères** dans lesquels l'eau circule avec des débits importants. Ils sont constitués de sols ou de roches perméables
- **Les terrains aquifuges** qui sont si peu perméables que les débits sont insignifiants. Ils se comportent donc comme des sols ou roches imperméables
- **Surface de la nappe**, surface de l'eau limitant la partie supérieure de la nappe
- **Nappe libre**, nappe où la pression interstitielle de l'eau au niveau de la surface est nulle
- **Nappe phréatique**, première nappe libre rencontrée depuis la surface. La surface de cette nappe s'appelle le **niveau phréatique**
- **Nappe artésienne**, nappe pour laquelle la pression de l'eau à la surface de la nappe est positive.

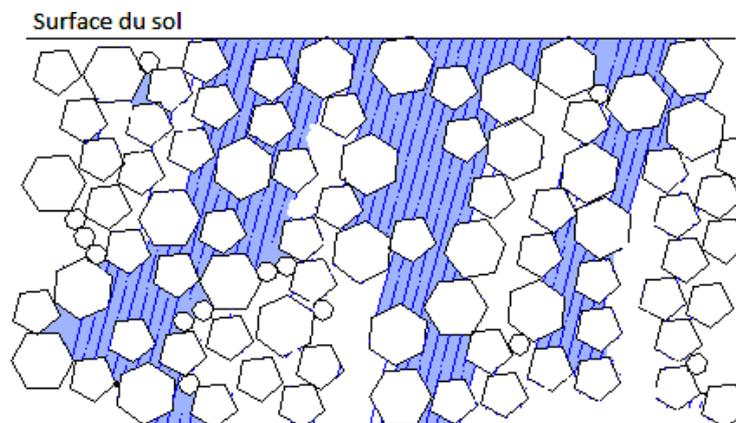
### Chapitre III Propriétés hydrauliques des sols

Une telle nappe est généralement prisonnière entre deux couches de terrains aquifuges

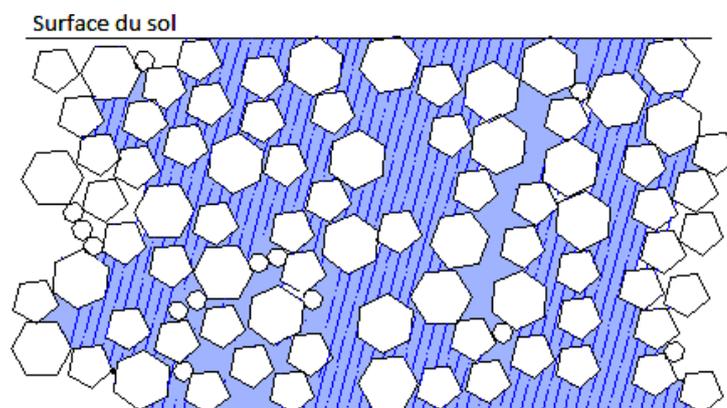
- *Nappes artificielles*, ce sont des nappes créées par l'homme, telles celles qui existent à l'intérieur du corps d'un barrage en terre

L'eau dans le sol peut se présenter sous trois formes différentes :

- *Eau de constitution* : c'est l'eau de cristallisation
- *Eau adsorbée* : c'est l'eau de mouillage des grains solides. Elle est fixée à la surface de ceux-ci en formant un film mince,
- *Eau libre* : contrairement aux cas précédents, pour lesquels l'eau est solidaire des grains solides, l'eau libre remplit les interstices formés par les grains solides et peut y circuler.



**Figure III.2** : Infiltration de l'eau dans le sol en condition non saturée



**Figure III.3** : Infiltration de l'eau dans le sol en condition saturée

L'état énergétique correspond lui à la charge hydraulique. On caractérise ainsi son énergie potentielle et on néglige l'énergie cinétique étant donné les vitesses d'écoulement très

## Chapitre III Propriétés hydrauliques des sols

faibles.

### III.3.2. Facteur influençant sur les infiltrations :

- Le type de sol (structure, texture, porosité)
- La couverture du sol
- La topographie et la morphologie
- Le débit d'alimentation
- La teneur en eau initiale du sol

### III.3.3. Vitesse de l'eau dans le sol

Soit  $Q$  le débit à travers  $S$ . la vitesse apparente  $v$  de l'eau est par définition :

$$v = \frac{Q}{S} \quad (\text{III.3})$$

Cette définition bien que la plus utilisée, donne une vitesse fictive car en réalité l'eau ne circule que dans les pores de surface  $n.S$  ( $n$  étant la porosité du sol) d'une part et d'autre part, les trajectoires sont vraisemblablement tortueuses. On définit la vitesse moyenne  $v'$  par le rapport :

$$v' = \frac{Q}{nS} \quad (\text{III.4})$$

### III.3.4. Charge hydraulique

En hydrodynamique, on appelle charge hydraulique en un point  $M$  la quantité :

$$h_M = \frac{u_M}{\gamma_w} + z_M + \frac{v^2}{2g} \quad (\text{III.5})$$

Dans les sols les vitesses d'écoulement sont si faibles que l'on peut négliger la quantité  $\frac{v^2}{2g}$

La charge hydraulique s'écrit alors :  $h_M = \frac{u_M}{\gamma_w} + z_M$  (III.6)

### III.3.5. Gradient hydraulique

On définit le gradient hydraulique  $i$  entre deux points A et B par le rapport :

$$i = \frac{h_A - h_B}{L} \quad (\text{III.7})$$

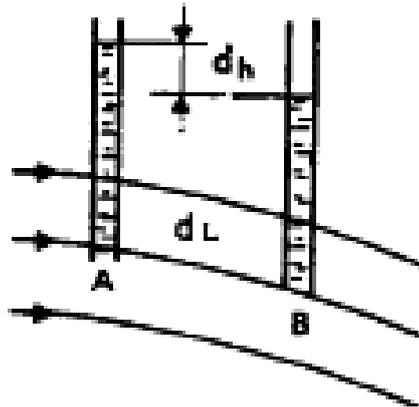


Figure III.4 : Définition du gradient hydraulique

### III.4. Loi de DARCY

La loi de DARCY est la loi fondamentale de l'hydraulique des sols, elle exprime la proportionnalité entre la vitesse d'écoulement et le gradient hydraulique. C'est une loi expérimentale :

$$\mathbf{V} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{i} \quad (\text{III.8})$$

La loi de Darcy n'est valable que dans les conditions suivantes :

- Milieu homogène isotrope ;
- Ecoulement en régime laminaire ;
- Ecoulement permanent.

Le nombre de Reynolds en milieu poreux est défini par :

$$\text{Re} = \frac{U_{d50}}{\nu} \quad (\text{III.9})$$

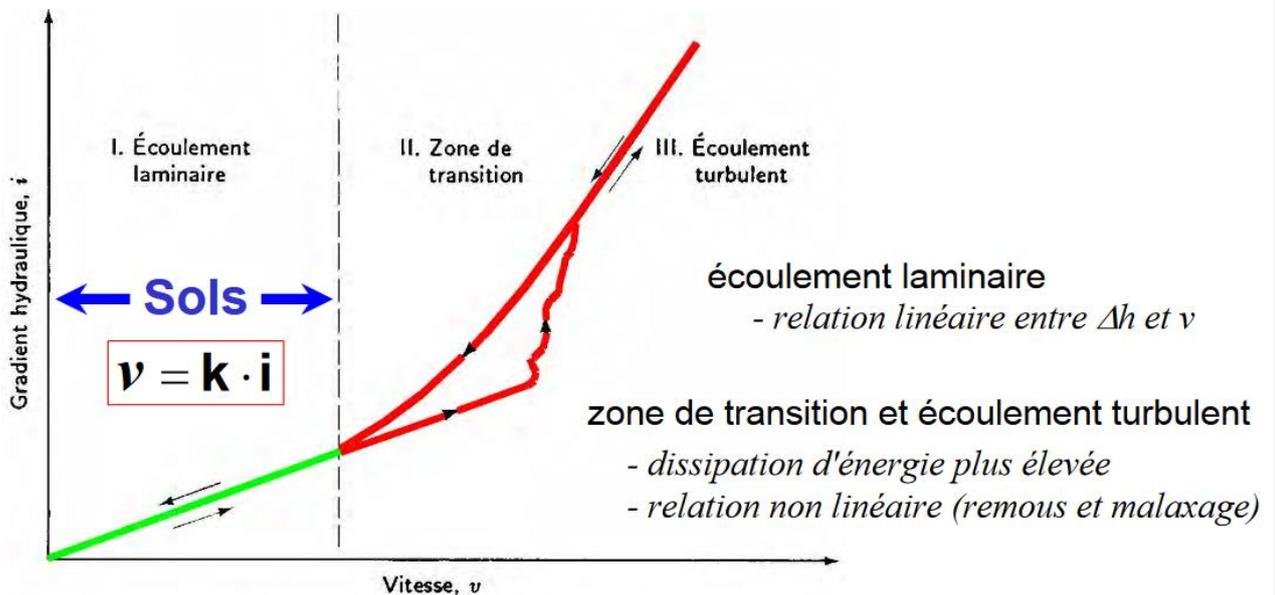
Avec :

$d_{50}$  : le diamètre moyen des grains

$\nu$  : la viscosité cinématique du fluide.

## Chapitre III Propriétés hydrauliques des sols

De nombreuses études ont montré que la loi de Darcy est applicable tant que le nombre de Reynolds ( $R_e$ ) ne dépasse pas une certaine limite (entre 1 et 10) où la vitesse d'écoulement influe directement sur ce nombre [Bear, 1979] et [Marsily, 1981].



**Figure III.5** : Zones d'écoulement laminaire et d'écoulement turbulent. (d'après Taylor, 1948)

A noter :

1. La loi de DARCY se vérifie en générale très bien à condition de rester en régime laminaire, c'est - à dire quand les vitesses restent faibles ;
2. Le coefficient de proportionnalité  $k$  est appelé coefficient de perméabilité du sol. Il s'exprime en cm/s ;
3. L'équation du débit à travers une section  $S$  de sol, s'écrit alors en fonction de  $i$  et  $K$  :

$$Q = K \cdot i \cdot S \quad (\text{III.10})$$

### III.4.1. Surfaces équipotentiellles

Dans le cas d'une nappe d'eau stagnante, la charge hydraulique est alors la même en tout point.

Par contre, s'il y a un écoulement (Figure III.6), caractérisé par les lignes ou filets d'eau (a,b,c, ...), les points (A,B,C, ...) perpendiculaire à ces lignes d'écoulement et sur un même plan, ont la même charge hydraulique. Ces surfaces portent le nom de surfaces équipotentiellles.

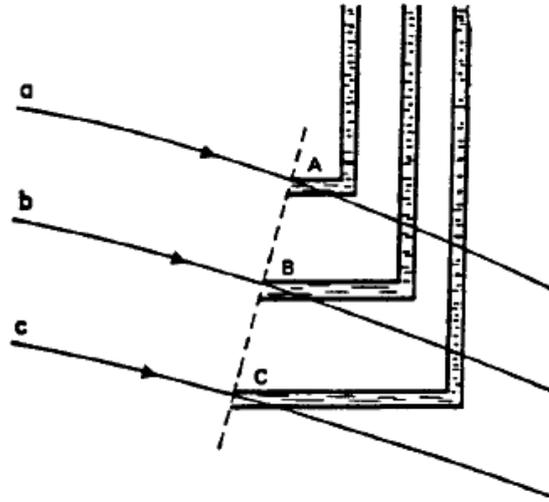


Figure III.6 : Cas d'une nappe avec écoulement

### III.5. Permeabilité du sol

#### III.5.1. Coefficient de perméabilité

L'expérience de Darcy montre que le débit  $Q$  d'eau qui passe à travers cet échantillon peut être donné par une formule de la forme :

$$Q = K.S.\frac{h_1 - h_2}{L} = K.S.\frac{\Delta h}{L} \quad (\text{III.11})$$

Avec :

$S$  : section de l'échantillon,

$L$  : sa longueur,

$h_1, h_2$  : niveaux piézométriques respectivement en A et B,

$\Delta h$  : différence piézométrique ou perte de charge piézométrique à travers l'échantillon,

$K$  : coefficient de proportionnalité qui dépend de la nature du sol et qu'on désigne par coefficient de perméabilité.

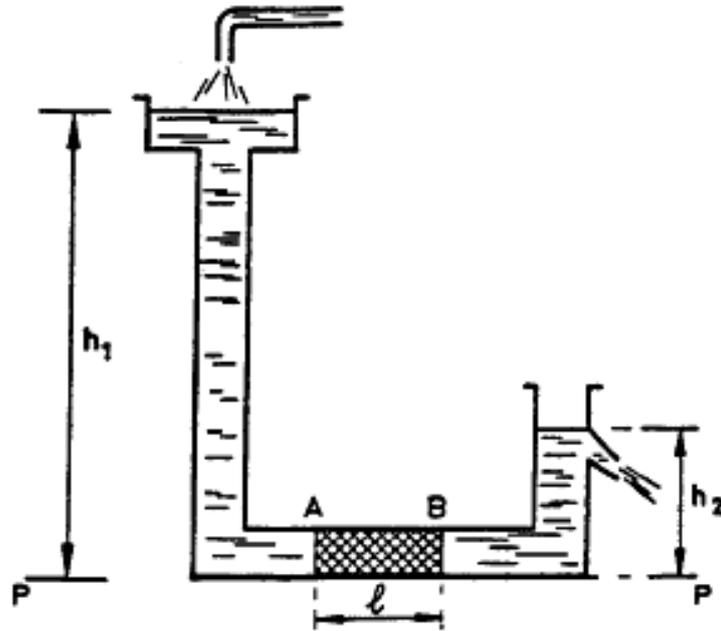


Figure III.7 : Ecoulement de l'eau à travers l'échantillon AB

Le tableau ci-après donne quelques caractéristiques correspondant à diverses valeurs de K :

$k$ (cm/s)	10	1	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$	$10^{-9}$
Drainage	Bon				Mauvais			Pratiquement imperméable			
Type de sol	Gravillon		Sable		Silt et mélange Sable et argile				Argiles		
Travaux	Zones perméables				Zones imperméables						

Tableau III.1 : caractéristiques correspondant à diverses valeurs de K

Type de sols	Volume total de vide	Porosité P
Sols argileux et silteux	40-60%	0.5
Sable fins	40-50%	0.4
Sables moyens	35-40%	0.3
Sables grossiers	25-35%	0.2
Graviers	20-30%	0.2

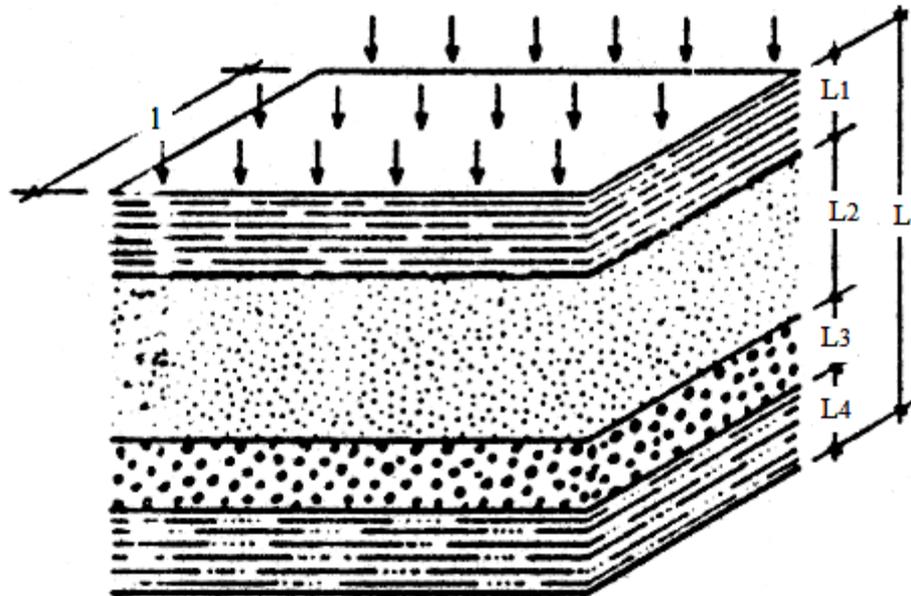
Tableau III.2 : Caractéristiques hydrauliques typique des milieux poreux

Source : physique de sol, A Mermoud page 8

**III.5.2. Perméabilité moyenne fictive horizontale et verticale des terrains lités**

La plupart des sols sont lités (succession de roches altérées de différentes origines). Il apparaît que la perméabilité est beaucoup plus forte dans le sens des lits que dans le sens perpendiculaire aux lits.

**a) Perméabilité moyenne verticale**



**Figure III.8 :** Perméabilité verticale moyenne des sols

l'équation de conservation de la masse d'eau interstitielle :

$$v = \frac{H}{L} k_v = k_1 i_1 = k_2 i_2 = k_n i_n \Rightarrow i_i = \frac{H}{L} \frac{k_v}{k_i}$$

Avec :

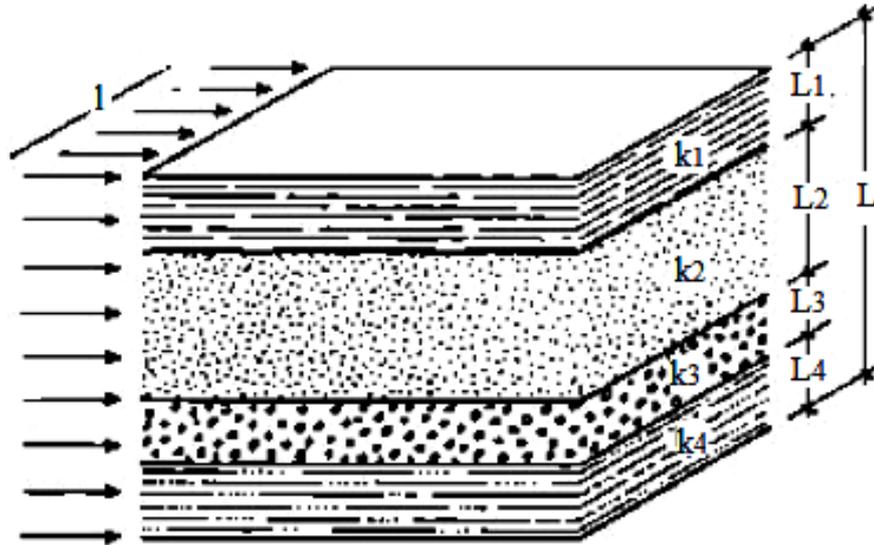
$$H = l_1 i_1 + l_2 i_2 + \dots + l_n i_n = \sum_{i=1}^n l_i \frac{H}{L} \frac{k_v}{k_i} = \frac{H}{L} k_v \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{k_i}$$

D'où :

$$k_v = \frac{L}{\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{k_i}} \quad (\text{III.12})$$

**b) Perméabilité moyenne horizontale**

Le débit total est la somme des débits dans chaque couche pour une tranche d'épaisseur unité et pour un gradient hydraulique  $i$ .



**Figure III.9 :** Perméabilité horizontale moyenne des sols

Soient :

$Q$  : le débit total

$q$  : le débit traversant chaque couche élémentaire  $i$

$$Q = k_h \cdot i \cdot L = \sum_{i=1}^n q_i = \sum_{i=1}^n v_i \cdot L_i = \sum_{i=1}^n k_i \cdot i \cdot L_i = i \cdot \sum_{i=1}^n k_i \cdot L_i$$

D'où :

$$k_h = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \cdot L_i}{L} \quad (\text{III.13})$$

**c) Coefficient de perméabilité équivalent**

Nous sommes dans le cas d'un écoulement vertical et horizontal. On définit alors la grandeur suivante :

$$k_{\text{équivalent}} = \sqrt{K_h \cdot K_v} \quad (\text{III.14})$$

## Chapitre III Propriétés hydrauliques des sols

La direction d'écoulement dans les terrains sédimentaires est importante. En effet, les dépôts successifs étant horizontaux, l'eau circule plus facilement horizontalement que verticalement.

### III.6. Différents types de filtration

Lors de la filtration de particules à travers un milieu poreux, un dépôt de particules entraîne une obturation. De ce fait, il est nécessaire de positionner les paramètres qui influencent la rétention de particules, dans le but de maintenir la pérennité du filtre le plus longtemps possible.

Les paramètres à imposer et à contrôler sont :

1. Le milieu poreux : décrit par la porosité, le diamètre et la forme des pores, le diamètre et la forme des grains dans le cas d'un filtre granulaire ;
2. Les particules présentes dans la suspension : elles sont caractérisées par leur concentration, leur taille, leur forme et leur densité ;
3. Le fluide : il est caractérisé par le débit d'écoulement, la viscosité, la densité, la force ionique et la température dans le milieu.

Suivant les différents types de particules, ainsi que leurs propriétés, Ghidaglia (1994) et Nadji (1998) mettent en avant quatre types de filtration afin de procéder à la séparation particules - fluide (Figure III.10). Elles sont présentées dans les paragraphes suivants :

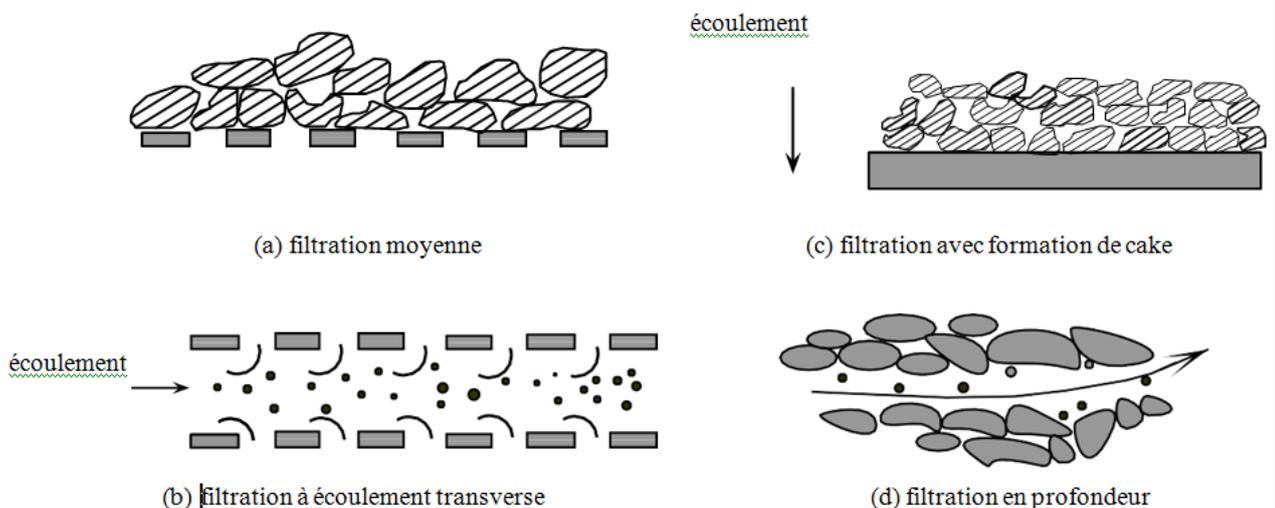


Figure III.10 : Différents types de filtration

### a) Filtration moyenne

Dans ce procédé, on choisit une taille des pores plus petite que les particules de la suspension

à filtrer. Pour les particules de dimensions supérieures à  $50\mu\text{m}$ , le filtre est utilisé comme un tamis. Pour les petites particules, on utilise le plus souvent des membranes dont la taille de pores est bien déterminée. Cette méthode de filtration conduit à une obturation très rapide du filtre ce qui nécessite des arrêts réguliers du processus de filtration pour nettoyer le filtre.

### b) Filtration transverse

Dans ce procédé, on choisit une direction de l'écoulement de la suspension parallèle à la surface du milieu filtrant. Cela est assuré par un taux de cisaillement de manière à éviter le dépôt de particules dans les pores. Ce choix préserve la continuité du procédé de filtration en évitant le colmatage du milieu poreux.

### c) Filtration avec formation de cake

Ce procédé de filtration est utilisé pour les suspensions fortement concentrées.

Il comporte deux étapes :

Les particules solides s'accumulent tout d'abord dans les pores ;

La filtration à travers le paquet de particules solides déjà déposées, dans ce cas le dépôt de particules est important et le filtre se colmate rapidement.

### d) Filtration en profondeur

Ce procédé de filtration a été utilisé pour la clarification des eaux. Dans ce cas, la filtration des particules en suspension est appliquée pour des concentrations inférieures ou égales à  $0,5\text{g/l}$  (Tien et Payatakes, 1979) et pour des particules de dimensions inférieures à  $30\mu\text{m}$ . Ces particules en suspension de tailles inférieures à la taille des pores pénètrent dans le milieu poreux et y circulent suivant les lignes d'écoulement. Certaines de ces particules sous l'action de forces multiples se déposent à différentes profondeurs du milieu filtrant d'où le nom de filtration en profondeur.

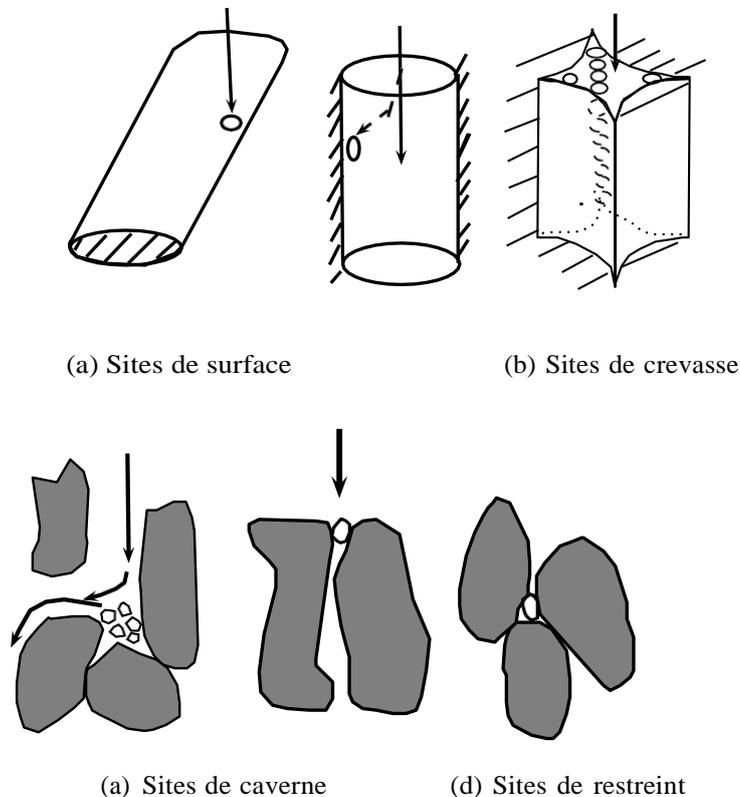
## Chapitre III Propriétés hydrauliques des sols

Développée par Herzig et al. (1970), la théorie repose sur l'étude des profils de concentration et de rétention à l'intérieur des lits poreux.

Les particules qui circulent dans le milieu poreux peuvent subir certains blocages dans des sites de rétention. Une particule indépendante se dépose soit sous l'effet des forces d'attraction exercées, soit par blocage physique lors de la filtration dans des passages trop étroits. On peut avoir l'interaction de plusieurs facteurs de blocage instantanément. Les différents facteurs intervenant lors d'un blocage d'une particule dans un milieu poreux sont détaillés dans les prochains paragraphes.

### III.7. Sites de rétention des particules

Les sites de rétention des particules en milieux poreux ont été distingués par Delanchambre (1966). Il décrit quatre types principaux (Figure III.11), selon le blocage de la particule à l'entrée du milieu ou en profondeur dans les couches du milieu, qui sont :



**Figure III.11** : Sites de rétention (Delanchambre, 1966).

Sites de surface (Figure III.11a) : la rétention de la particule se fait sur la surface du milieu poreux. Lorsque la surface du milieu est orientée normalement à la direction d'écoulement de la suspension, la pression cinétique peut appliquer la particule encore en suspension contre cette surface et ainsi contribuer à la stopper.

Sites de crevasse (Figure III.11b) : la particule en suspension se trouve au voisinage de la ligne de contact entre deux surfaces convexes. La particule peut être retenue par coinçage mécanique dans la crevasse.

Sites de caverne (Figure III.11c) : les sites ont des formes concaves et se trouvent généralement dans les coudes des pores, de sorte que le fluide qui s'y trouve soit immobile et ne participe pas à l'écoulement.

Sites de restreint (Figure III.11d) : les sites qui se trouvent en amont d'un rétrécissement de pores dont les dimensions sont inférieures à celles des particules en suspension.

Le site le plus fréquent est formé par trois grains convexes en contact.

### III.8. Influence de la concentration des particules

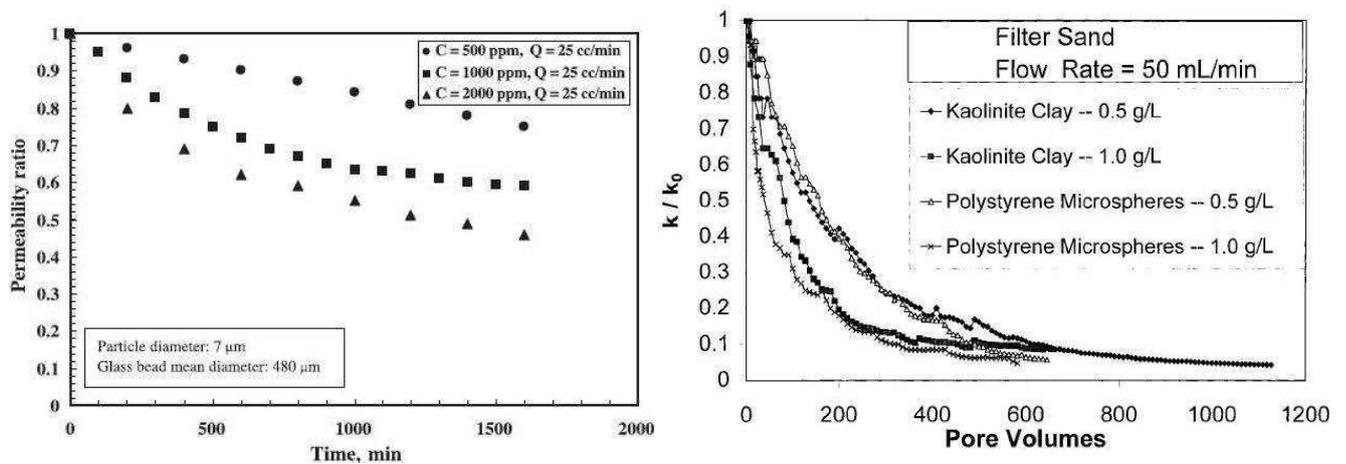
Selon les études précédentes, plus la concentration des particules est élevée plus les taux de dépôts sont importants. Une concentration élevée engendre un dépôt important, de telle sorte que les particules qui sont entraînées vers des pores vont former des ponts plus rapidement et ainsi engorger les pores. Moghadasi et al. (2004) dans leur étude ont introduit des particules fines de  $7\mu\text{m}$  dans un milieu en billes de verre pour différentes concentrations 500, 1000, 2000ppm. La figure III.12a montre les résultats des perméabilités qui diminuent avec le temps pour les différentes concentrations. En augmentant la concentration de particules solides dans l'injection de fluide, la capture et donc le colmatage se produisent plus rapidement, et par conséquent, le rapport de perméabilité diminue plus rapidement. Par ailleurs, nous remarquons

qu'une chute de perméabilité est beaucoup plus importante en passant d'une concentration de 500 à 1000 ppm en comparaison au passage d'une concentration de 1000 à 2000ppm. En parallèle, nous citons les travaux de Reddi et al. (2000) (Figure III.12b), les auteurs injectent dans des colonnes de sables, des particules de différentes

## Chapitre III Propriétés hydrauliques des sols

tailles pour différentes concentrations (0,5-1)g/l. Nous remarquons que les particules de taille plus grande avec une concentration de 0,1g/l vont subir une diminution de la perméabilité plus importante. Pour les mêmes particules avec les concentrations de 0,5 et 1g/l, nous remarquons évidemment que la chute de perméabilité dépend de la concentration la plus élevée mais aussi que la chute de perméabilité est différente entre les petites et les grosses particules. Cela veut dire que la taille des particules est importante, de tel sorte que le dépôt en surface va être prépondérant pour les petites particules, alors que la formation de pont à l'entrée des pores sera la cause principale du colmatage des pores pour les grosses particules.

Par ailleurs, Ghidaglia (1994) compare dans son étude le transport d'une particule et le transport d'un paquet de particules. Il en déduit que l'augmentation du nombre de particules pouvait augmenter la profondeur d'investigation dans le milieu. Les résultats montrent que les particules indépendantes les unes des autres pénètrent plus en profondeur quand elles sont à plusieurs par effet hydrodynamique. De telle manière que par collision entre elles, une particule piégée peut être relarguée.



(a) Résultats d'études de Moghadasi et al. (2004) (b) Résultats d'études de Reddi et al. (2000)

**Figure III.12:** Effet de la concentration des particules sur la chute de la perméabilité.

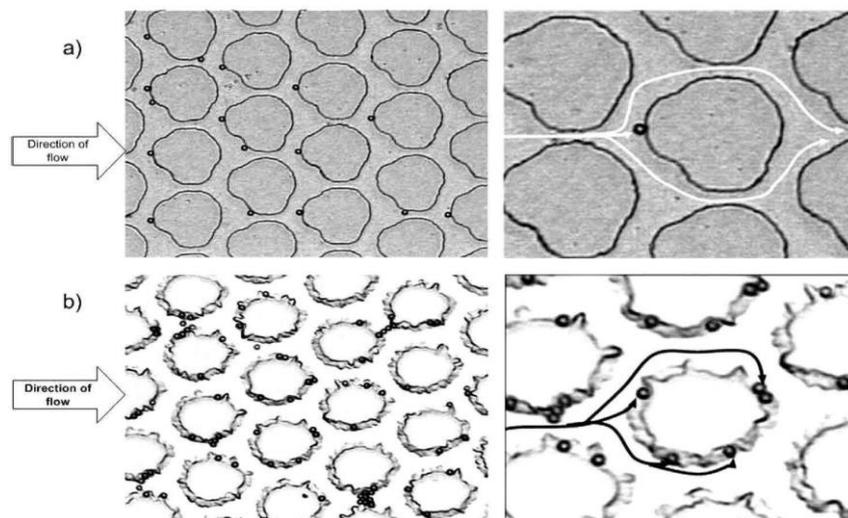
### III.9. Influence des milieux poreux

Quelques recherches sont faites sur la différence de forme des particules qui constituent le milieu. Des expériences en colonne dans les mêmes conditions hydrauliques et chimiques sont réalisées avec la seule différence la forme du milieu (e.g. billes de verre, sables, graviers). En maintenant la même porosité, Benamar et

### Chapitre III Propriétés hydrauliques des sols

al. (2007) utilisent deux milieux poreux saturés (gravier siliceux et billes de verre). Les courbes de restitution des particules montrent un taux plus important dans le milieu constitué de billes de verre, ce qui met en évidence l'importance de la structure porale dans la rétention des particules.

Dans le même principe, Auset et Keller (2006) réalisent des expériences dans des micro-modèles transparents afin de comprendre la rétention de colloïde pour différents paramètres : tailles de particules, rugosité de surface des grains, force ionique de la solution et les débits. Ils ont observé le dépôt de colloïdes à l'échelle du pore pour des surfaces lisses et des surfaces rugueuses. Les colloïdes déposés dans le micromodèle lisse se situent en amont du grain (Figure III.13 cas a). Par contre, les colloïdes déposés dans le micromodèle rugueux sont plus nombreux et se déposent autour du grain (Figure III.13 cas b) dans des sites de rétention créés par les aspérités de la surface rugueuse. Cet aspect de rugosité de la surface peut être un facteur très important que les études jusqu'à présent n'ont pas intégré dans la détermination de l'efficacité de collision dans un collecteur. Auset et Keller (2006) proposent d'inclure un facteur de forme des grains dans le calcul de l'efficacité du collecteur. La forme des colloïdes peut elle aussi jouer un rôle



**Figure III.13:** Images du dépôt de colloïdes dans les micromodèles : a- micromodèle lisse ; b- micro-modèle rugueux (les lignes de courant sont dessinées à la main pour montrer le chemin suivi par les colloïdes) (Auset et Keller, 2006).

Dans l'interception dans des sites de rétention formés par les aspérités. Un nombre considérable d'études ont été réalisées afin de voir l'influence de chaque paramètre sur

## Chapitre III Propriétés hydrauliques des sols

le dépôt de particules fines. Cependant, la plupart des études ont été menées dans des milieux modèles constitués de billes de verre avec des surfaces uniformes et lisses ; en injectant des colloïdes de formes sphériques. Il peut y avoir des différences significatives entre les relations empiriques du dépôt issues de modèles poreux simplifiés et les observations du dépôt pour des milieux constitués du sol rugueux.

### III.10. Conclusions

La discussion du rôle que les particules solides jouent dans les milieux poreux, présentée ci-dessus (transport facilité des contaminants, érosion interne et colmatage et la filtration), montre qu'elles vont influencer sur la perméabilité de l'interface et ensuite, une fois introduites dans le sol, elles pourront soit se comporter comme des vecteurs de pollution soit comme des freins par leur dépôt cette constatation est confirmée par l'ensemble des chercheurs dans ce domaine.

**Chapitre IV**  
**Étude de filtration à**  
**travers la digue d'un**  
**barrage en terre**  
**(cas du Barrage Dahmouni)**

## Chapitre IV : Étude de filtration à travers la digue d'un barrage en terre (cas du Barrage Dahmouni)

### IV.1. Introduction

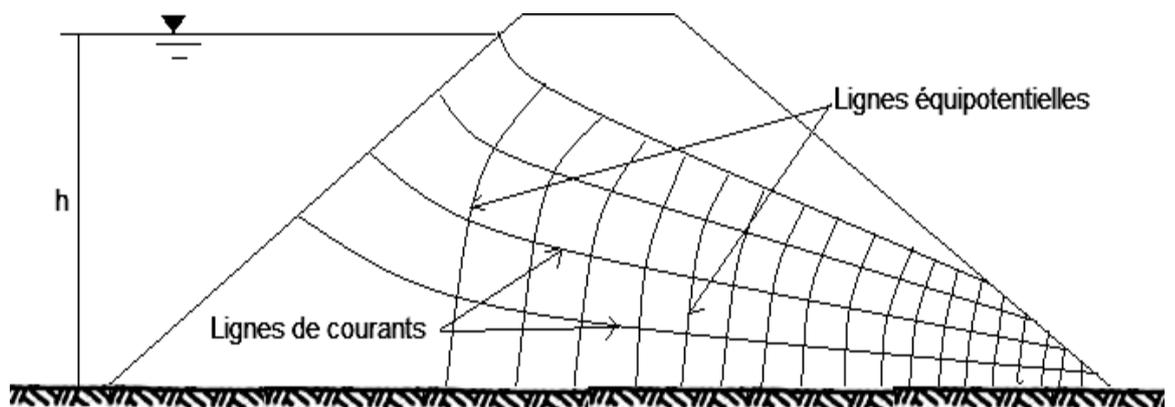
La présence d'une charge hydraulique à l'amont du remblai engendre une infiltration d'eau dans le barrage et ses fondations.

L'écoulement de l'eau à une grande influence sur l'équilibre des matériaux de recharge, Toutes les incidents qui sont produits à travers le temps sont du majoritairement aux infiltrations à travers la digue, la fondation et au ruissèlement des eaux sur la surface du barrage.

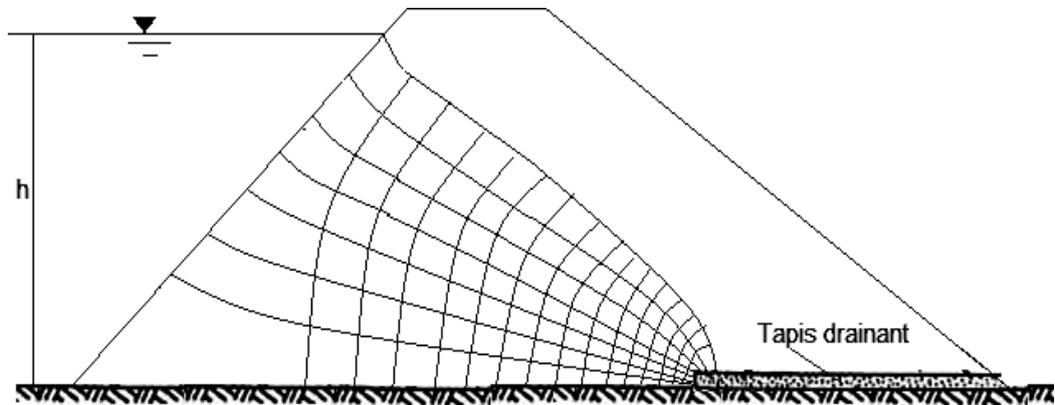
### IV.2. Réseau d'écoulement dans le cas des barrages en remblai

La solution graphique du problème d'infiltration des barrages en remblai se ramène donc à tracer un réseau de lignes orthogonales, les conditions aux limites étant connues. Dans le cas d'un massif homogène reposant sur une assise imperméable, la ligne de saturation et la ligne au contact massif- assise sont deux lignes de courant.

Le parement amont est une équipotentielle (Figure IV.1). Si le massif comporte un tapis drainant, la ligne équipotentielle au côté du drain est une ligne à pression atmosphérique (Figure IV.2).

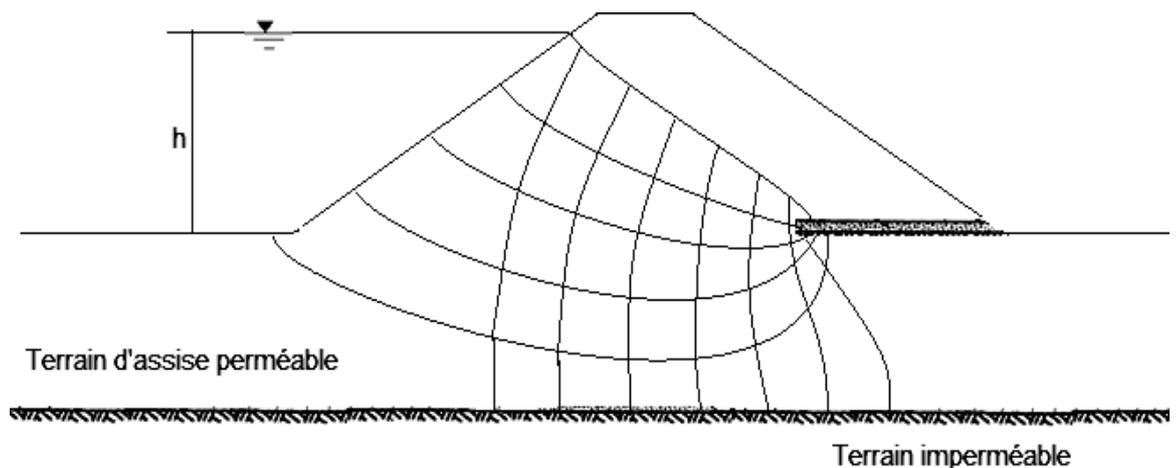


**Figure IV.1 :** Tracé du réseau d'écoulement dans le cas de barrage homogène sur sol imperméable sans drain



**Figure IV.2 :** Tracé du réseau d'écoulement dans le cas de barrage homogène avec drain horizontal sur sol imperméable

Si les terrains d'assise sont perméables sur une hauteur finie avec une perméabilité semblable à celle du massif du barrage, la ligne de saturation et la ligne limitant la partie inférieure de la couche perméable sont des lignes de courants limites constituant les frontières du système considéré (Figure IV.3).



**Figure IV.3 :** Tracé du réseau d'écoulement dans le cas de barrage homogène avec drain horizontal sur sol perméable de même perméabilité que le massif

### IV.3. Débit de fuite

La loi de Darcy permet d'évaluer le débit de fuite connaissant le réseau d'écoulement.

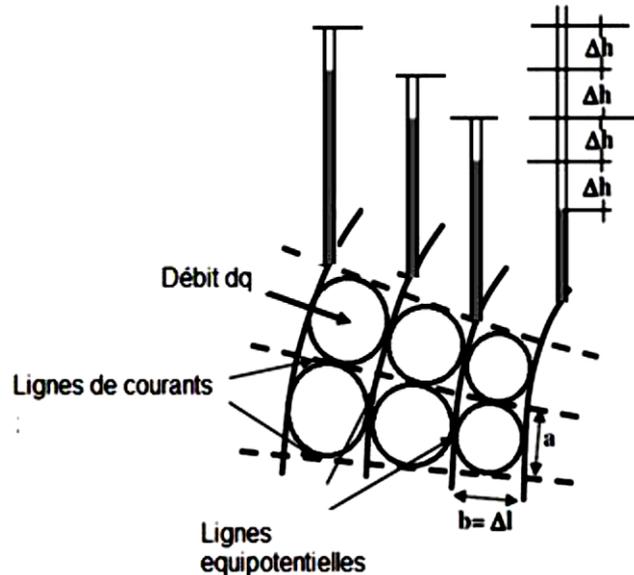


Figure IV.4 : Réseau d'écoulement

D'après la figure IV.4 les termes suivants sont définis comme suit :

$N_h$  = Nombre de chutes d'équipotentialité,

$N_c$  = Nombre de canaux d'écoulement,

$dq$  = débit dans un canal d'écoulement (entre deux lignes de courant adjacentes)

$\Delta h$  = perte de charge entre deux lignes équipotentielle adjacentes

Considérons une maille du réseau de dimension  $a \times b$  par unité de largeur tel que :

$a$  = distance entre deux lignes de courants,

$b$  = distances entre deux lignes équipotentielle,

La perte de charge est :  $\Delta h = \frac{h}{N_h}$  et le gradient hydraulique est :  $i = \frac{\Delta h}{\Delta l} = \frac{\Delta h}{b}$

D'où 
$$i = \frac{h}{b.N_h} \quad (IV.1)$$

D'après la loi de DARCY le débit est :  $dq = v.S = K.i.S = K.\frac{h}{b.N_h}.a$

Le débit total par unité de largeur sera :  $Q = K.\frac{h}{b.N_h}.a.N_c$  (IV.2)

En général, les réseaux d'écoulement sont tracés avec :  $a = b$

Dans ce cas, le débit total est.  $Q = K.h\frac{N_c}{N_h}$

Ce calcul a été effectué par unité de largeur. Pour une digue de largeur L, le débit de fuite total est :

$$Q = K.h\frac{N_c}{N_h}.L \quad (IV.3)$$

La méthode de calcul exposée ci-dessus est générale. D'autres méthodes tenant compte de l'angle  $\alpha$  que fait le talus aval avec l'horizontale et basées également sur la loi de Darcy sont appliquées pour le calcul du débit de résurgence (Rolley, Kreitmann et al. 1977).

$$\text{Si } \alpha < 30^\circ \quad Q = K.b.\sin^2 \alpha \quad (IV.4)$$

$$\text{Avec } b = OD = \sqrt{h^2 + d^2} - \sqrt{d^2 - h^2 \cot^2 \alpha} \quad (IV.5)$$

$$\text{Si } 30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \quad Q = K.y_0$$

$y_0$  est l'ordonnée du point de sortie de la surface libre.

#### IV.4. Pressions interstitielles et renards

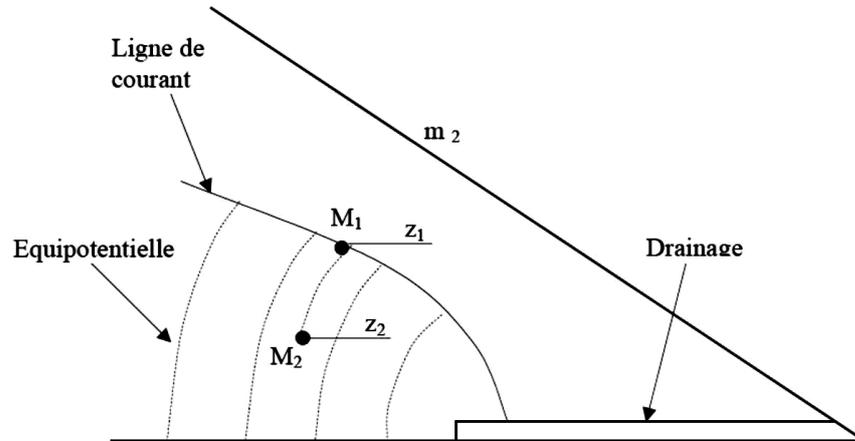


Figure IV.5 : Détermination de la pression interstitielle

Quand on dispose de réseau d'équipotentielle, il est facile d'en déduire la pression de l'eau en chaque point.

D'après la Figure IV.5 la charge  $H_{M_2}$  hydraulique au point  $M_2$  est égale à :

$$H_{M_2} = \frac{U_{M_2}}{\gamma_w} + Z_{M_2} \quad (\text{IV.6})$$

$U_{M_2}$  et  $z_{M_2}$  sont respectivement la pression de l'eau et la cote du point  $M_2$  par rapport à un plan arbitraire fixé.

$$\text{d'où : } U_{M_2} = (H_{M_2} - z_{M_2}) \gamma_w$$

$$\text{De même } U_{M_1} = (H_{M_1} - z_{M_1}) \gamma_w$$

$$U_{M_1} = 0$$

et comme (le point  $M_1$  se trouve sur la ligne de saturation)

$H_{M_1} = H_{M_2} = z_{M_1}$  alors la pression au point  $M_2$  se calcule par:

$$U_{M_2} = (z_{M_1} - z_{M_2}) \gamma_w \quad (\text{IV.7})$$

$z_2$  est la cote d'un point du barrage et  $z_1 = H$  la charge hydraulique donnée par la parabole interpolée de Kozeny.

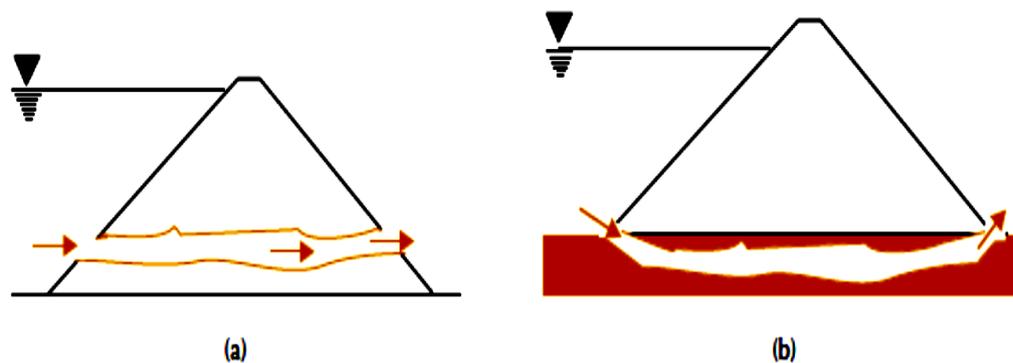
Sur la ligne de saturation  $u = 0$  car  $z_2 = 0$

Cette pression doit être minimisée pour des raisons de stabilité. En effet, si cette pression est trop

élevée, cela signifie qu'il y a beaucoup d'eau, il y a alors un risque de formation de renards

(Figure IV.6) ; surtout dans la partie amont qui est en général la plus soumise à de forts gradients

hydrauliques.



**Figure IV.6:** Renard dans le corps de l'ouvrage (a) ou dans la fondation (b)

Les renards surviennent quand le gradient hydraulique dépasse la valeur critique :

$$\frac{\gamma_i}{\gamma_w} = \frac{\text{poids volumique immergé du terrain}}{\text{poids volumique de l'eau}}$$

Si le gradient dépasse cette valeur critique, cela signifie que ce gradient est ascendant et vertical, il s'oppose alors aux forces de pesanteur ; la résultante de ses deux forces est dirigée vers le haut, les grains en surface sont alors entraînés. Les grains situés en dessous ne supportant plus le poids des grains supérieurs, sont entraînés à leur tour. Il se forme un petit tunnel où la circulation des eaux est aisée. La distance de percolation à travers le terrain diminue, le gradient hydraulique augmente ce qui va accentuer l'effet de renard qui va alors déboucher dans la retenue amont. Une fuite brutale et énorme va alors être déclenchée et va amener à la destruction du barrage.

### La boullance

Dans un écoulement la composante verticale ascendante de la force d'écoulement génère un gradient hydraulique  $i$  vertical ascendant. Cette composante verticale de la force d'écoulements'oppose directement à la pesanteur (figure IV.7) ; avec  $i$  suffisamment élevé, les grains sont entraînés par l'eau : c'est le phénomène de boullance.

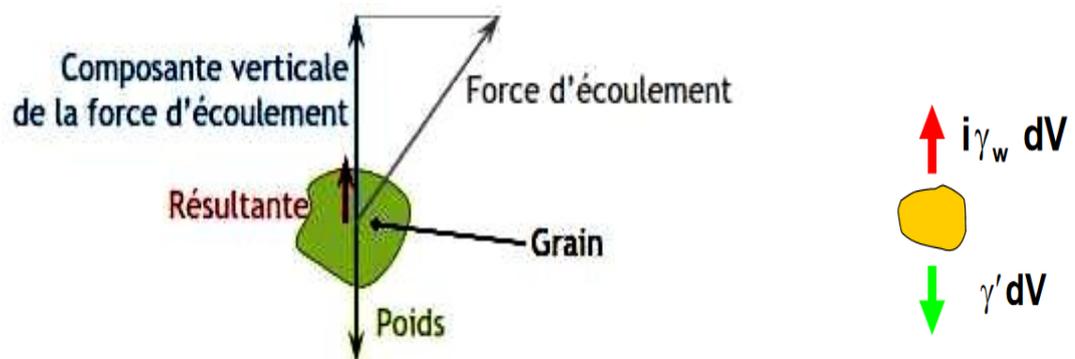


Figure IV.7: phénomène de boullance

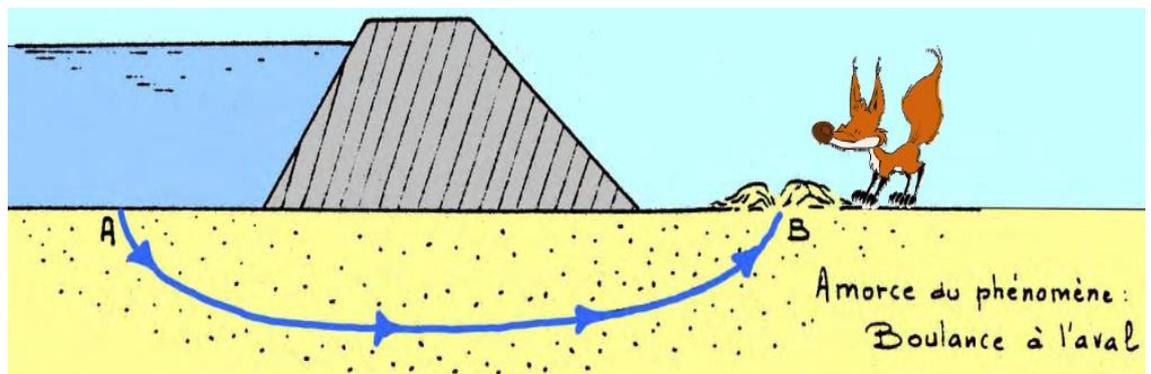


Figure IV.8 : phénomène de boullance (cas général d'un écoulement souterrain)

On définit un gradient hydraulique critique,  $i_c$ , pour lequel la résultante des forces est nulle et donc les grains du sol à la limite d'être entraînés :

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \approx 1$$

Il est nécessaire de vérifier que les gradients hydrauliques ascendants sont inférieurs au gradient critique lors de construction de barrage ou digue en terre, mais aussi lors de fouille dans un sol ou de construction sur un sol où ce phénomène est possible. L'arrachement des grains est la première phase de l'érosion interne. Il crée de nouvelles conditions d'écoulement éventuellement plus menaçantes : augmentation des vides, modification des assemblages de composition des sols... Le sol devient plus décharné et plus perméable, permettant à l'eau de circuler à vitesse plus importante et/ou dans de nouveaux écoulements.

Dans un écoulement, la force qui lui est liée (force d'écoulement) a une composante verticale ascendante qui s'oppose directement à la force de pesanteur. Si la résultante de ces deux forces est dirigée vers le haut, les grains du sol « flottent » et sont entraînés par l'eau : il s'agit du phénomène de boulangerie. Celui-ci peut générer des détériorations importantes sur des ouvrages dont les fondations reposent sur un sol dans lequel se produit le phénomène ou si le sol est lui-même l'ouvrage comme pour une digue, un barrage ou un fond de fouille.

### IV.5. Débit unitaire et épaisseur du drain tapis

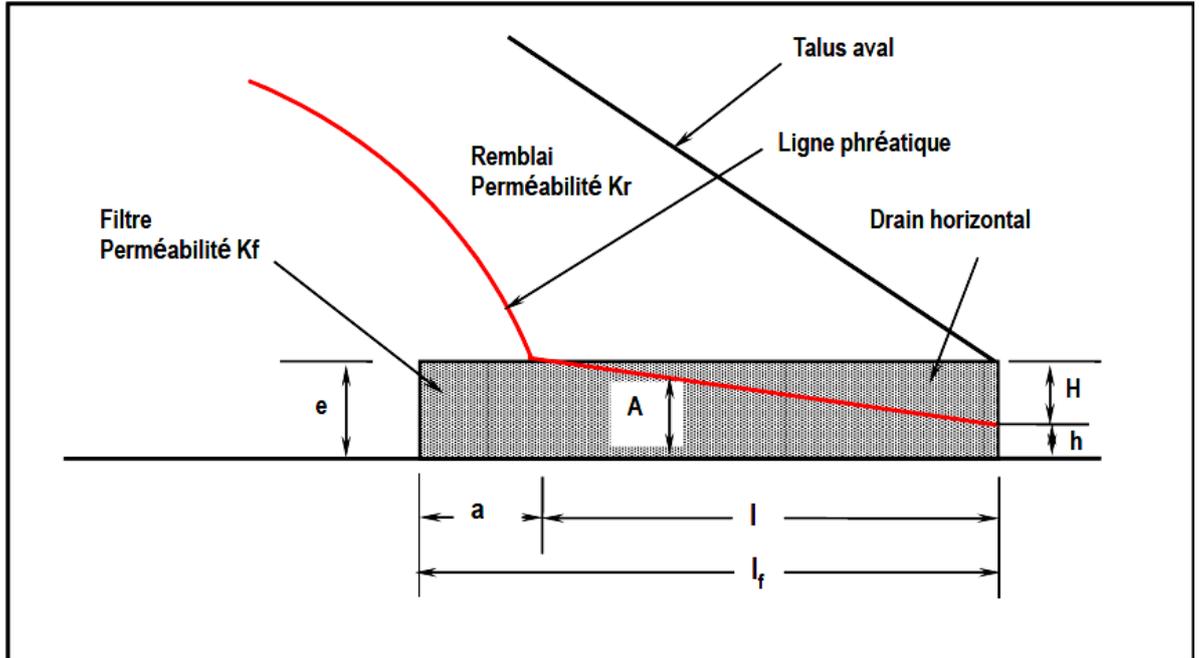


Figure IV.9 : Débit unitaire et épaisseur du drain tapis

Si  $q$  est le débit d'infiltration à travers un mètre de largeur du barrage qu'il faut évacuer à travers le filtre de perméabilité  $K_f$  est, on peut écrire :

$$q = K_f \cdot i \cdot A \quad (\text{IV.8})$$

Où :  $A$  : valeur moyenne de la section mouillée du filtre

$$i = \frac{H}{l} = \frac{e-h}{l} \quad \text{et} \quad A = \frac{e+h}{2}$$

$$q = K_f \cdot \frac{e-h}{l} \cdot \frac{e+h}{2} = K_f \cdot \frac{e^2 - h^2}{2l}$$

$$e = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot l}{K_f} + h^2}$$

On peut négliger  $h^2$ ,  $h$  étant petit

IL est prudent de prendre un débit  $q$  égal au double du débit de fuite escompté. Ainsi l'épaisseur du filtre à prévoir sera :

$$e = 2 \cdot \sqrt{\frac{q \cdot l}{K_f}} \quad (\text{IV.9})$$

La longueur de  $l$  n'est pas égale à la longueur totale du tapis filtrant, il faut retrancher la longueur de résurgence qui est égale à :  $a = q / K_r$ .

Avec :  $K_r$  : perméabilité du remblai du barrage [m/s]

$q$  : débit de fuite [m<sup>3</sup>/s/ml]

La longueur totale  $l_f$  du tapis sera :  $l_f = l + a$  (IV.10)

### IV.6. Étude de filtration à travers la digue (cas du Barrage Dahmouni)

#### IV.6.1. Localisation

Le barrage de Dahmouni se situe sur l'Oued Nahr Ouassel affluent de l'Oued Cheliff à environ 8 km au Nord Est de la ville de Dahmouni et 20 km à l'Est de Tiaret aux coordonnées U.T.M suivantes :

X = 369740.626 m.

Y = 3920467.723 m.

Z = 945.271 m.

#### IV.6.2. Caractéristiques hydrologiques

Surface du bassin versant : .....425 km<sup>2</sup>

Précipitation moyenne (1986/2006) : .....305.9 mm

Apport annuel maximum : .....52 Hm<sup>3</sup>

Apport liquide annuel moyen théorique (1913/1968) : 23 Hm<sup>3</sup>

Apport solide annuel moyen : .....0.1 Hm<sup>3</sup>

Volume régularisé : .....11.6 Hm<sup>3</sup>

**IV.6.3. Caractéristiques de la retenue.**

Niveau de couronnement (NC).....	931 [m]
Plus hautes eaux (PHE).....	928, 80 [m]
Niveau de retenue normale (NRN).....	925 [m]
Surface inondée au N R.....	1.57 [km <sup>2</sup> ]
Niveau minimale d'exploitation( Nme).....	912,40 [m]
Volume total de la retenue.....	40,58 [Hm <sup>3</sup> ]
Volume utile de la retenue .....	36,44 [Hm <sup>3</sup> ]
Volume mort.....	4,14[Hm <sup>3</sup> ]

<b>Nombre d'habitants à Dahmouni</b>	24 983 habitants
<b>Densité de population à Dahmouni</b>	152,1 /km <sup>2</sup>
<b>Coordonnées géographiques de Dahmouni</b>	Latitude: <b>35.4167</b> , Longitude: <b>1.47629</b> 35° 25' 0" Nord, 1° 28' 35" Est
<b>Superficie de Dahmouni</b>	16 425 hectares 164,25 km <sup>2</sup>
<b>Altitude de Dahmouni</b>	Minimale 995 m, Maximale 995 m,
<b>Climat de Dahmouni</b>	Climat méditerranéen avec été chaud



Figure IV.10 : Barrage de DAHMOUNI

#### IV.6.4. Caracteristiques techniques du barrage de DAHMOUNI

Localisation : barrage de dahmouni

Wilaya de tiaret:

Coordonnées :

x = 297,200

y = 237,000

z = 925,00

OUED: MINA

<p><b>BASSIN VERSANT:</b>                      Surface de drainage                      Précipitation moyenne annuelle                      Evaporation moyenne annuelle                      Apport moyen annuel                      Type                      Cote de la crete                      Longueur en crete                      Largeur en crete                      Hauteur maximale hors fondation                      débit spécifique</p>	<p>425 km<sup>2</sup>                      41522 mm                      70 mm                      11,4 hm<sup>3</sup>/an                      en terre                      929,5 NGA                      850 m                      6,50 m                      8,5 m                      0,85 hm<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup></p>
<p><b>BARRAGE:</b>                      Pentes des talus aval                      Pentes des talus amont  <b>VOLUME DES TRAVAUX:</b>                      Recharges</p>	<p>1/2,2 m                      1/3 m                      871,000 m<sup>3</sup></p>

## Chapitre IV : Étude de filtration à travers la digue d'un barrage en terre (cas du Barrage Dahmouni)

Noyau Filter Rip rap Injection	27,600 m <sup>3</sup> 80,870 m <sup>3</sup> 5496,5 m <sup>3</sup>
<b>RETENUE:</b> Cote des plus hautes eaux Cote de retenue normale Cote minimale d'exploitation Surface de la retenue à la cote normale Volume de la retenue à la cote normale Volume utile Volume regularisé Volume mort	927,8 NGA 924 NGA  5,35 km <sup>2</sup> 42 hm <sup>3</sup> 35,3 hm <sup>3</sup> 13 hm <sup>3</sup> 4,8 hm <sup>3</sup>
<b>OUVRAGE D'EVACUATION:</b> Type Volume de béton Débit	DEVERSOIR LATERAL 10,800 m <sup>3</sup> 515 m <sup>3</sup> /s
<b>VIDANGE DE FOND:</b> Type Debit	VANNE 20 m <sup>3</sup> /s
<b>PRISE D'EAU:</b> Type Nombre de prises Niveau des prises	TOUR DE PRISE 2 912,4 et 917,4

Revanche (R) = Côte de la crête - Côte des plus hautes eaux R = 1,7m (cas reel)

La côte de la crête du barrage (CCB) = 929,5 m (cas reel)

Hauteur maximale hors fondation 8,5 m (cas reel)

Largeur en crête 6,50 m (cas reel)

La hauteur du barrage est H = 18 m

Le barrage présente une sécurité suffisante avec ces pentes.

Pentes des talus amont 1/2,5 m (cas reel)

Pentes des talus aval 1/3 m (cas reel)

L'analyse granulométrique du remblai du barrage s'illustre dans le tableau suivant:

Tamisât (%)	45	50	60	85	100
Diamètre (mm)	2.10 <sup>-3</sup>	3,1.10 <sup>-3</sup>	6,1.10 <sup>-3</sup>	28.10 <sup>-3</sup>	0,1

**Tableau IV.1:** Analyse granulométrique du remblai.

On note que le coefficient d'uniformité (coefficient de GAZEN)

$$\frac{d_{60}}{d_{10}} > 5$$

Puisque  $d_{10}$  est très faible (particules très fines) donc le coefficient d'HAZEN présente une granulométrie étendue.

#### IV.6.5. Choix du drain

Le drainage est utilisé pour:

Rabaisser la courbe phréatique et aussi garantir la stabilité au talus aval du barrage.

Protéger le talus aval contre le phénomène renard

##### a) Dimensionnement du tapis drainant

La longueur de ce tapis drainant sera égale à:

$$L_d = \left( \frac{1}{3} : \frac{1}{4} \right) \cdot L_B$$

Avec :

$L_d$ : longueur du tapis de drainage.

$L_B$ : largeur en base du barrage.

##### • Calcul de la largeur en base

$$L_B = b_1 + b_2 + 6,50 \text{ m}$$

$$b_2 = m \cdot H \quad \text{CCB} = 2,5 \cdot 18 \text{ m} \rightarrow b_2 = 45 \text{ m}$$

$$b_1 = n \cdot H \quad \text{CCB} = 3,0 \cdot 18 \text{ m} \rightarrow b_1 = 54 \text{ m}$$

$$\text{D'où } L_B = 53,4 + 39,16 + 6,50 = 105 \text{ m} \rightarrow L_B = 100 \text{ m}$$

$$\text{Donc : } L_d = \left( \frac{1}{3} : \frac{1}{4} \right) \cdot L_B = \left( \frac{1}{3} : \frac{1}{4} \right) \cdot 100$$

$$\text{Donc : } L_d = (35 : 26) \text{ m} \rightarrow L_d = 30,5 \text{ m}$$

#### **IV.6.6. Choix du filtre**

L'augmentation des vitesses et des gradients de filtration lors de la réalisation d'un drainage accentue le danger de Renard dans le sol de fondation. Pour arrêter ce danger il y a lieu de prévoir des filtres inversés qui s'avèrent être un procédé efficace dans ce domaine. Si un bon choix de matériaux constituant le filtre inversé est fait et si les matériaux sont disposés comme suit, le filtre inversé peut éviter un développement de renard même pour un gradient de filtration  $J = 7 : 20$

Pour être efficace, les filtres doivent respecter les conditions suivantes:

- 1) Les particules de la 1<sup>ère</sup> couche ne doivent pas pouvoir pénétrer dans la couche suivante: il ne faut pas qu'il y ait "versement" des fines particules dans les couches plus fines.
- 2) Il ne faut pas qu'il y ait mouvement des particules dans une seule et même couche.
- 3) Les particules du sol protégé par le filtre ne doivent pas être entraînées à travers le filtre, exception faite des particules les plus fines ce qui est considéré comme admissible.
- 4) Les filtres doivent être disposés de telle sorte que lors de leur exploitation ils ne doivent pas être bouchés par de la vase.

#### **IV.6.7. Protection de la digue**

##### **- Talus aval :**

La solution la plus répandue et la plus économique consiste à réaliser un enherbement sur une couche de terre végétale d'une épaisseur de 40 cm, ou bien une couche d'enrochement d'épaisseur de 40cm pour plus de sécurité.

##### **- Talus amont :**

On opte pour une protection en enrochement, cette protection consiste à la réalisation de couches d'épaisseurs prédéterminées de blocs de pierre de dimensions appropriées (rip-rap).

Le matériau devra être sain, d'un poids capable de résister à la poussée des vagues.

Les dimensions de l'enrochement peuvent être déterminées théoriquement en fonction de la hauteur des vagues et de leurs vitesses de propagation par les méthodes suivantes :

#### **IV.6.8. Détermination de l'épaisseur minimale de la couche d'enrochement**

Pour déterminer l'épaisseur de cette couche, on utilise plusieurs méthodes.

## Chapitre IV : Étude de filtration à travers la digue d'un barrage en terre (cas du Barrage Dahmouni)

La méthode de « U.S.ARMAY », Les ingénieurs de l'USARMY utilisent de préférence le tableau donnant l'épaisseur minimum de la couche d'enrochement ainsi que les dimensions minimales des blocs en fonction de la hauteur des vagues.

Les valeurs de l'épaisseur minimum de la couche d'enrochement et  $D_{50\min}$  sont données par le tableau suivant :

**Tableau IV.2** : Epaisseur mini de la couche d'enrochement en fonction de la hauteur des vagues

Hauteur des vagues (m)	Épaisseur minimum de la couche d'enrochement (m)	$D_{50\min}$ (m)
0 à 30	0,30	0,20
0,30 à 0,60	0,40	0,25
0,60 à 1,20	0,45	0,30
1,20 à 1,80	0,55	0,40
1,80 à 2,40	0,70	0,45
2,40 à 3,00	0,80	0,55

Pour notre cas  $H_v = 0,80\text{m}$ , donc  $0,6 < H_v < 1,2$  m, on trouve que l'épaisseur min de la couche d'enrochement égale à 0,45m, et le  $D_{50\min}$  égale à 0,3m.

D'où :  $e = 0,45\text{m}$  ;  $D_{\min} = 0,3\text{m}$ .

### IV.6.9. Protection de la crête

La crête de la digue sera revêtue d'une couche de produit asphaltique de 40 cm d'épaisseur, afin d'éviter les fissures dues au retrait des matériaux argileux et de permettre en plus le passage d'un véhicule.

### IV.6.10. Étanchéité de la fondation

Une clé d'étanchéité est prévue dans la continuité de la digue en argile afin d'assurer une bonne liaison entre la fondation et le corps de la digue. Elle doit être réalisée lorsque la fondation imperméable n'est pas atteinte après décapage.

Pour la variante choisie une clé d'étanchéité est prévue dans la continuité de l'argile.

Elle permettra en plus de l'étanchéité d'assurer l'ancrage de la digue. La clé d'étanchéité est constituée d'argiles compactées.

La hauteur de la clé d'étanchéité à partir du terrain naturel est de 2.5m La pente des talus de la clé d'étanchéité est  $m = 1$ .

### IV.6.11. Drainage du barrage

Pour éviter le phénomène des sous pressions et pression interstitielle dans le corps du barrage, on prévoit un dispositif de drainage qui a pour rôle d'intercepter les eaux d'infiltration, et de les faire sortir en aval du barrage sans causer de dégât préjudiciable au barrage.

Les dispositifs drainant les plus appropriés pour remplir ces fonctions sont, Un drain vertical (pour protéger au maximum le talus aval contre les pressions interstitielles et les sous- pressions) peut être incorporé au centre de la digue homogène se compose de graviers d'une largeur égale à 1.5 m et une couche de 15 cm de sable. Ce drain vertical à une hauteur de 12m est relié au pied du talus aval par un drain horizontal (tapis drainant) identique au drain vertical de tout point de vue, il est relié à la restitution (oued) par un drain prisme qui va participer à la stabilité de l'ouvrage.

La fonction principale des drains est la maîtrise des percolations d'eau dans le corps du barrage. Il y aura abaissement de la ligne de saturation, diminution de la pression d'écoulement et de la pression interstitielle, et accélération de la consolidation.

Le matériau utilisé pour un drain doit avoir normalement une perméabilité plus élevée que celle du sol drainé. Le gravier, de granulométrie fine à grossière est un matériau idéal, si elle est bien appropriée, la roche exploitée peut être également utilisée. Ces matériaux sont disposés en bandes, en couches minces ou en cheminée (drain vertical). Ils doivent être inaltérables, parfaitement propres et en conséquence soigneusement lavés si nécessaire.

Leur granulométrie est adaptée de façon à respecter les règles de non entraînement des fines particules du matériau adjacent.

#### a) Dimensionnement du drain prisme

- Dimensionnement de prisme

## Chapitre IV : Étude de filtration à travers la digue d'un barrage en terre (cas du Barrage Dahmouni)

**Hauteur:**  $h_p = (0.15 \div 0.2) h_b$

$h_b$  : Hauteur du barrage ( $h_b=18\text{m}$ )

$$h_p = (2,67 \div 3,57)$$

Ce qui nous donne :  $h_p = 3,15 \text{ m}$

**Largeur en crête :**  $b_p = (1/3 \div 1/4) h_{dr}$

On prend :  $b_p = (0,33 \div 0,25) h_{dr} = 0.15 \times 3 = 0.5 \text{ m}$

On prend :  **$b_p = 1 \text{ m}$**

- **Dimensionnement du Drain tapis**

$$L_d = 1/4 L_b$$

$L_d$ : longueur du drain tapis en m

$L_b$ : largeur transversale du barrage en m

(  $L_b = 100 \text{ m}$  )  $\rightarrow L_d = 0,25 \cdot 100 = 25\text{m}$

On trouve  **$L_d = 25 \text{ m}$** .

**Tableau IV.3 :** Différentes caractéristiques de la digue

<b>Hauteur du barrage</b>		18 m
<b>Largeur en crête</b>		6,50 m
<b>Longueur en crête</b>		850 m
<b>Cote en crête de la digue</b>		929,5 m NGA
<b>Pentes du talus</b>		$m_1= 2.5$ ; $m_2=3$
<b>Protection des talus</b>	<b>Amont</b>	$e = 0,45\text{m}$ ; $D_{\min}= 0,3\text{m}$ .
	<b>Aval</b>	$e = 0,45\text{m}$ ; $D_{\min}= 0,3\text{m}$ .

### b) Calcul des filtres

Lorsque le matériau constructif du drain ne respecte pas les conditions de non entraînement des particules fines du massif à drainer, on interpose alors un filtre entre les deux matériaux, sa fonction principale est de retenir ces particules du sol drainé tout en permettant à l'eau du sol de s'écouler dans la zone drainante constituée de matériaux grossiers.

Ces filtres peuvent être situés :

Entre deux couches du sol adjacentes dont les granulométries sont assez différentes pour que les éléments de l'un des sols puissent migrer dans l'autre sol.

Entre un sol à granulométrie fine, qui doit être drainé, et les matériaux relativement grossiers et perméables constituant les drains.

A l'interface entre un remblai de granulométrie fine et une fondation très perméable où l'écoulement peut éroder les particules fines du remblai.

Les filtres peuvent être constitués des couches successives de matériaux perméables, de granulométries de plus en plus fines assurant la transition entre le drain et les éléments fins du milieu à drainer. De nos jours, on remplace souvent ces filtres granulaires naturels ou concassés par des géotextiles issus de l'industrie du textile et se présentent en rouleaux de longueur variable offrant ainsi l'avantage d'être économique et une facilité de mise en œuvre par rapport aux filtres à base de plusieurs couches de matériaux calibrés.

### c) Règles générales de dimensionnement des filtres

La référence usuelle en la matière est celle des règles de Terzagui. Elles s'énoncent comme suit : Soit  $d_x$  la dimension caractéristique du matériau fin à drainer, c'est-à-dire le diamètre du tamis pour lequel on enregistre  $x\%$  en poids dépassant lors du tamisage granulométrique.

Soit  $D_x$  celle relative au matériau adjacent (plus grossier) constitutif du filtre ou du drain.

Critères de conception

$$\frac{D_{15}^{filtre}}{d_{85}^{Sol}} \leq 4:5 \quad \text{Condition d'entraînement des particules fines pour le phénomène de renard}$$

$$\frac{D_{15}^{filtre}}{d_{15}^{Sol}} > 4:5 \quad \text{Condition de perméabilité}$$

$$\frac{D_{50}^{filtre}}{d_{50}^{sol}} < 25 \quad \text{Condition de parallélisme des courbes granulométrique}$$

$$\frac{D_{60}^{filtre}}{d_{10}^{filtre}} \leq 20 \quad \text{Condition d'uniformité du filtre}$$

En se basant sur ces règles, nous allons procéder au dimensionnement de ces différents composants du système de drainage à savoir les filtres et les drains.

Pour construire le fuseau granulométrique nous allons déterminer le  $D_{15}$ ,  $D_{50}$  et  $D_{60}$  du filtre.

$$D_{15 \text{ filtre}} < 4 \cdot d_{85 \text{ sol}}$$

$$D_{15 \text{ filtre}} < 4 \cdot 0,095 ; \quad D_{15 \text{ filtre}} < 0,38 \text{ mm}$$

$$D_{15 \text{ filtre}} > 4 \cdot d_{15 \text{ sol}}$$

$$D_{15 \text{ filtre}} > 4 \cdot 0,00043 ; \quad D_{15 \text{ filtre}} > 0,00172 \text{ mm}$$

$$D_{50 \text{ filtre}} < 25 \cdot d_{50 \text{ sol}}$$

$$D_{50 \text{ filtre}} < 25 \cdot 0,022 ; \quad D_{50 \text{ filtre}} < 0,55 \text{ mm}$$

$$D_{60 \text{ filtre}} < 20 \cdot d_{10 \text{ filtre}}$$

$$D_{60 \text{ filtre}} < 20 \cdot 0,0380 ; \quad D_{60 \text{ filtre}} < 0,76 \text{ mm}$$

Avec:  $D_{xx}$  : diamètre caractéristiques des filtres.

$d_{xx}$  : diamètre caractéristique du noyau.

- Couches horizontales de sables : **0,15m**
- Couches horizontales de graviers : **0,30 m**
- Couches verticales ou inclinées : **1,00 m**

Notre filtre est constitué du gros sable et sable fin, donc il faut utiliser une épaisseur minimale de 0,15 m pour la couche du filtre horizontale et 1 m pour la couche du filtre vertical ou inclinées.

#### d) Vérification de la condition d'absence du phénomène de renard

La condition de l'absence du phénomène de renard au massif du sol est vérifiée comme suit :

$$\frac{D_5}{D_{17}} \geq 0,32 \cdot \sqrt[6]{\eta} \cdot (1 + 0,05 \cdot \eta) \frac{\eta}{1 - \eta}$$

Avec  $\eta$  : Coefficient d'hétérogénéité du sol du filtre,  $\eta = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 7,6$

$n$  : Porosité du sol en fonction d'unité  $n = n_0 - 0,1 \cdot \text{Log} \eta$

$n_0 = 0,4$  pour les sols caillouteux ;

$n_0 = 0,45$  pour les sols argileux.

$D_5(\text{mm})$	0.06
$D_{17}(\text{mm})$	0.11
$n_0$	0.45
$n$	0.36

$$\frac{D_5}{D_{17}} \geq 0,32 \cdot \sqrt[6]{\eta} \cdot (1 + 0,05 \cdot \eta) \frac{\eta}{1 - \eta} \quad \text{AN : } 0,55 > 0,34$$

Donc Il n'y a pas de risque de l'apparition du phénomène de renard dans le filtre.

- **Vérification de la suffisance de la perméabilité du filtre**

$$K_F \geq (2 + \sqrt[6]{\eta}) K_N$$

$K_F$  : Coefficient de perméabilité du filtre.

$K_N$  : Coefficient d'infiltrations du remblai de la digue  $1,3 \cdot 10^{-8}$  m/s.

AN:  $K_F \geq 4,42 \cdot 10^{-8}$  m/s on prend :  $K_F = 4,5 \cdot 10^{-8}$  m/s.

## IV.7. Étude des infiltrations

### a) Positionnement de la ligne de saturation

La ligne de saturation est le niveau auquel la pression hydrostatique est nulle, on l'appelle aussi « ligne phréatique ». Elle est en fonction des caractéristiques des matériaux de construction, elle est déterminée sur la base de la parabole de Kozeny qui nous permet de délimiter la partie sèche où humide de la partie saturée d'eau du barrage.

## Chapitre IV : Étude de filtration à travers la digue d'un barrage en terre (cas du Barrage Dahmouni)

Son tracé permet d'estimer le débit de fuite à travers le barrage et de déterminer le cas échéant ; la zone d'émergence de l'eau le long du talus amont et particulièrement dangereuse.

Il est indispensable d'établir des dispositifs de drainage qui maintient la ligne de saturation à l'intérieur du massif.

Kozeny a montré que la ligne phréatique est une parabole dont l'équation est :

$$X = \frac{Y^2 - Y_0^2}{2.Y_0}$$

En se reportant à la figure on a :  $Y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d$

D'où:  $Y = \sqrt{2.X.Y_0 + Y_0^2}$

$$Y^2 - Y_0^2 - 2.X.Y_0 = 0 \quad \text{avec} \quad Y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d$$

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

b : projection horizontale de la partie mouillée du parement amont.

On détermine la ligne de saturation pour une hauteur d'eau correspondante à la retenue normale. Niveau de la retenue normale, h = 12,6m

b= m.h d'où ; b=23.75 m 12,6 . 2,5 = 31,5 m

L'emprise de :  $L_b = 100\text{m}$

d=  $L_b - 0,7.b$       d=  $100 - 0,7. 31,5$       d'où d  $\approx 78\text{m}$

$$Y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d$$

On aura donc :  $Y_0 = \sqrt{12,6^2 + 78^2} - 78 \approx 1\text{m}$

$Y_0 = 1\text{m}$

Les coordonnées de la courbe de saturation sont données par l'équation suivante :

$$Y^2 - Y_0^2 - 2.X.Y_0 = 0 \quad \text{avec} \quad Y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d$$

$$Y^2 = Y_0^2 + 2.X.Y_0 \quad \text{ou} \quad Y = \sqrt{1 + 2.X.1}$$

A partir de cette équation, on peut déterminer les coordonnées de la parabole qui sont données

## Chapitre IV : Étude de filtration à travers la digue d'un barrage en terre (cas du Barrage Dahmouni)

par le tableau ci-après :

**Tableau IV.4 :** Coordonnées de la parabole de KOZENY :

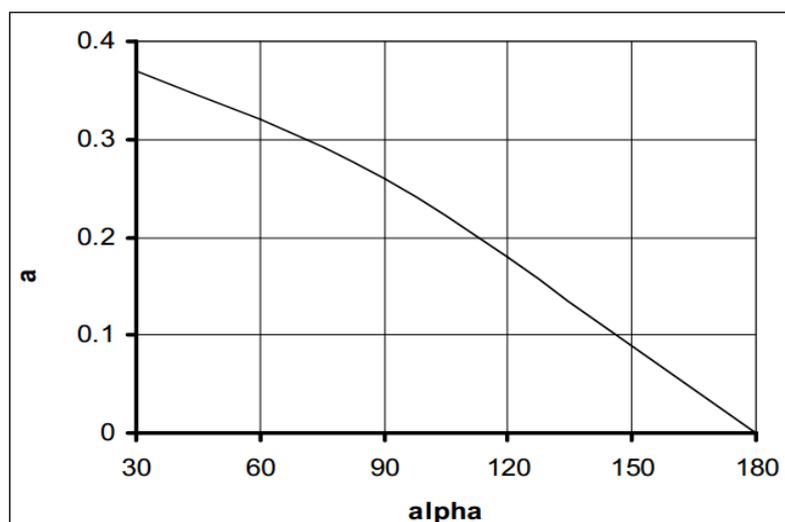
X(m) digue	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Y(m) digue	1	3,31	4,6	5,5	6,4	7,14	7,8	8,4	9	9,5	10,04	10,5	11

X(m) digue	65	70	75	80	85
Y(m) digue	11,5	11,3	12,3	12,7	13

La parabole coupe le plan d'eau amont en un point A situé à une distance horizontale du talus :  $AB = 0,3 b$ . Pour obtenir la ligne de saturation à partir de la parabole de Kozeny, on raccorde celle-ci au point B du plan d'eau amont par une courbe normale au talus amont en B et tangente à la parabole.

### b) Détermination du point d'intersection de la ligne de saturation avec le talus aval

Cette méthode est celle de Casagrande où il a démontré que  $\Delta l_2$  ne dépend que de la distance focale de la parabole de base de Kozeny et de l'angle du talus aval du barrage ce qui lui a permis de dresser une courbe de variation. La figure suivante donne les valeurs de paramètre  $a$  en fonction de l'angle  $\alpha$



**Figure IV.11:** Courbe de Casagrande pour la détermination du paramètre alpha

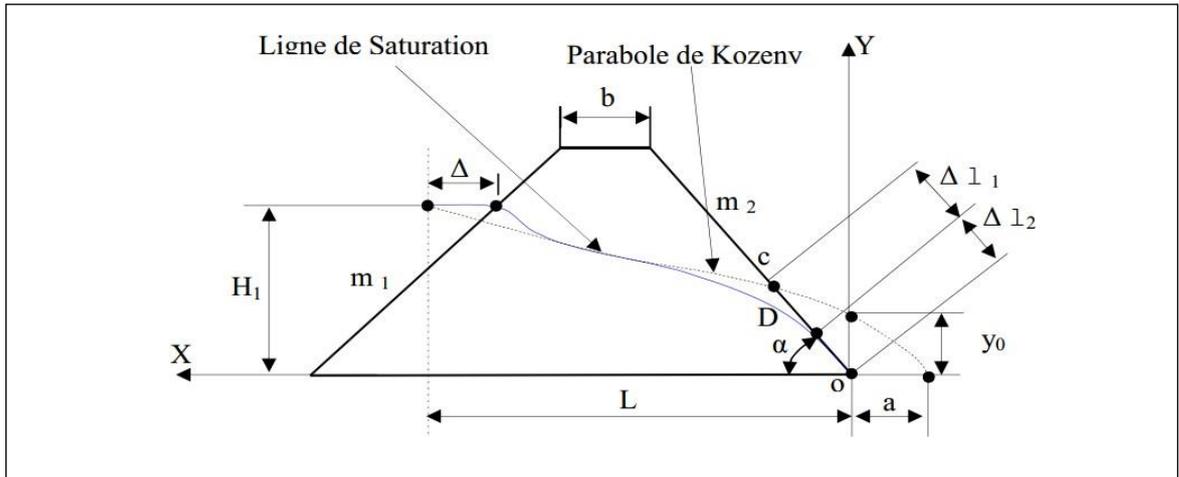


Figure IV.12 : Correction de la ligne de saturation avec le parement aval

$$\left\{ \alpha < 30^\circ \rightarrow \Delta l_2 = \sqrt{h^2 + d^2} - \sqrt{d^2 - h^2 \cot g(\alpha)} \right.$$

$$\left\{ \alpha < 30^\circ \rightarrow \Delta l_2 = \sqrt{12,6^2 + 78^2} - \sqrt{78^2 - 12,6^2 \cot g(30^\circ)} \right.$$

$$\Delta l_2 = 2,8m$$

$$Y^2 = 1 + 2.X.1$$

$$Y = 0 \rightarrow X = \frac{-1}{2.1} \rightarrow a = 0,5m$$

### c) Débit d'infiltration pour la digue

Nous appliquons la loi de Darcy pour le calcul du débit de fuite à travers le barrage.

$$q = K.I.A \quad (IV.12)$$

Avec :  $q$  : débit d'infiltration ( $m^3/s/ml$ ) ;  $I$  : gradient hydraulique ;

$K$  : Coefficient de perméabilité. ( $K=1,3 \cdot 10^{-8} m/s$ ) ;

$A$  : Section d'infiltration par unité de longueur.

Le gradient hydraulique est déterminé par :

## Chapitre IV : Étude de filtration à travers la digue d'un barrage en terre (cas du Barrage Dahmouni)

$$I = \frac{dy}{dx} \text{ et } A = y.l$$

$$\text{Donc: } q = K.y.\frac{dy}{dx}$$

$$\text{Avec : } y.\frac{dy}{dx} = y_0$$

$$\text{D'où : } q = K.y_0 = K.\left(\sqrt{h^2 + d^2}\right) - d \quad \text{m}^3/\text{s/ml.}$$

Le débit total à travers le barrage sera :

$$Q = q.L$$

$$\text{AN: } y_0 = 1\text{m}$$

$$K = 1,3 \cdot 10^{-8} \text{ m/s} \quad \left. \vphantom{K} \right\} \quad q = 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s/ml}$$

### d) Vérification de la résistance d'infiltration du sol du barrage

La résistance d'infiltration du sol constituant la digue est donnée par :

$$I = \frac{\Delta H}{\delta n} < I_{adm} \quad (\text{IV.13})$$

$\Delta H$  : perte de charge dans le corps de la digue.  $\delta n$  : épaisseur moyenne de la digue.

$I_{adm}$  : gradient hydraulique admissible ; on le détermine à partir du tableau suivant

**Tableau IV.5** : Classification des barrages

Classe de l'ouvrage	Sol de fondation	
	Rocheux	Meuble
I	$H_b > 100 \text{ m}$	$H_b > 50$
II	De 50 à 100 m	De 25 à 50 m
III	De 20 à 50 m	De 15 à 25 m
IV	$H_b < 20 \text{ m}$	$H_b < 15 \text{ m}$

Notre barrage appartient à **la classe IV**.

Tableau IV.6 : Gradient admissible à travers le remblai terreux.

Sol du corps du barrage	Classe de l'ouvrage			
	I	II	III	IV
Argile	1,5	1,65	1,8	<b>1,95</b>
Limon	1,0	1,15	1,25	1,35
Sable grossier	0,7	0,8	0,9	1,0
Sable moyen	0,5	0,65	0,75	0,85
Sable fin	0,4	0,55	0,65	0,75

$\Delta H$  : la différence du niveau d'eau amont aval ( $\Delta H = 11,6$  m)

$$\Delta H = 924 - 912,4 = 11,6 \text{ m}$$

$$I_{adm} = 1,95; \text{ Donc: } \Delta H = 11,6 \text{ m}; \delta n = 45\text{m}; I = 0,21 \leq I_{adm}$$

$$I = \frac{\Delta H}{\delta n} < I_{adm} \text{ D'où } I = \frac{11,6}{45} = 0,25 < I_{adm}$$

D'où la résistance à l'infiltration du sol du barrage est assurée.

#### e) Fondation du barrage :

Cette vérification s'effectue en utilisant l'expression d'après Pdaux :

$$J_f \leq \frac{J_{cr}}{K_s} \quad (\text{IV.14})$$

$J_{cr}$  : gradient d'infiltration critique qui est déterminé en fonction du type de sol de fondation d'après le tableau ci-dessous.

Tableau IV.7 : Détermination du gradient d'Infiltration admissible.

Sol de fondation	$J_{cr}$
Argile	1,20
Limon	0,65
Sable gros	0,45
Sable moyen	0,38
Sable fin	0,29

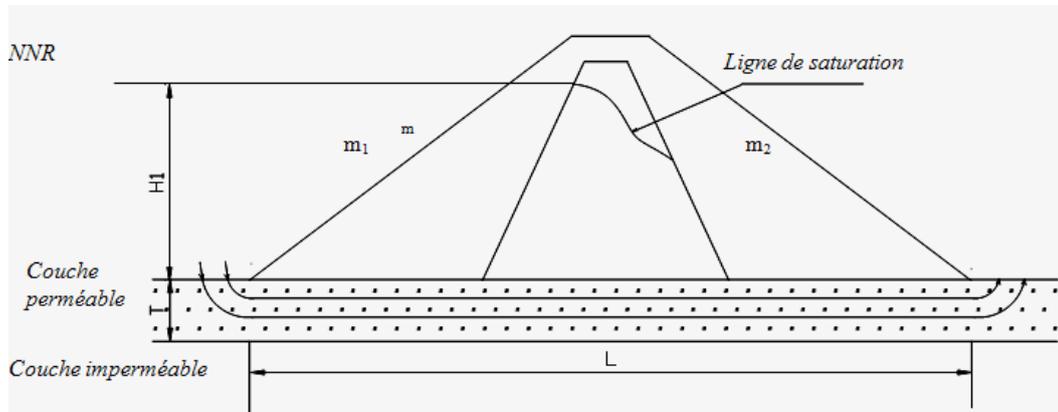


Figure IV.13 : Schéma de calcul d'infiltration

$K_s$  : coefficient de sécurité déterminé d'après le tableau suivant.

Tableau IV.8 : Détermination de coefficient de sécurité

Classe du barrage	I	II	III	IV
$K_s$	1,25	2,00	1,15	1,10

$J_f$  : gradient d'infiltration dans la fondation du barrage, on le détermine d'après la formule suivante

$$J_f \leq \frac{J_{cr}}{K_s} \quad J_f \leq \frac{1,2}{1,15} = 1,04$$

$$J_f = \frac{\Delta H}{L + 0,88.T_c}$$

$$\text{D'où } J_f = \frac{11,6}{100 + 0,88.2} = 0,11$$

$T_c$  : profondeur de calcul de la zone d'infiltration de la fondation ( $T_c = 2\text{m}$ )  $L$  : largeur du barrage à la base ( $L = 100\text{ m}$ )

$\Delta H$  : la différence du niveau d'eau amont aval ( $\Delta H = 11,6\text{ m}$ )

Pour notre barrage qui appartient à la III<sup>ème</sup> classe avec une fondation marno argileuse «  $k_s = 1,15$  et  $J_{cr} = 1,2$  ».

On trouve :  $J_f = 0,11 < 1,04$

La condition est vérifiée, la résistance d'infiltration à travers les fondations est assurée.

### IV.8. Laminage des Crues :

Le calcul de laminage a pour but de dimensionner la largeur du déversoir, ainsi que le niveau forcé des eaux « NPHE », qui dépend de la capacité de l'évacuateur de crue.

Cet ouvrage est prévu pour évacuer les crues maximales sans risque de dommage pour la digue.

Le choix de largeur de déversoir doit être fiable et économique tout en utilisant plusieurs méthodes parmi lesquelles on peut citer la méthode de Kotcherine qui est une méthode grapho-analytique. se basant sur les principes suivants :

- Le laminage commence avec le remplissage de la cuvette auNNR.
- Les pertes par infiltration et évaporation sont négligées au moment de lacrue.
- Les débits transitant par l'évacuateur de crue se déversant selon une fonction linéaire. Le débit d'évacuation est calculé d'après la formule:

$$Q = m.b.\sqrt{2.g}.H^{3/2} \quad (\text{IV.15})$$

m : coefficient de débit dépend de la forme de déversoir  $m=0,48$ .

b : largeur du déversoir en m.

H : charge d'eau sur le déversoir dépend de la vitesse d'approche d'eau.

$$b = \frac{Q}{m.\sqrt{2.g}.H^{3/2}} \quad \text{D'où} \quad b = \frac{51,5}{0,48.\sqrt{2.9,81.2^{3/2}}} = 8,5m$$

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

L'étude du processus de filtration dans les milieux poreux est un domaine de recherche important et en constante évolution.

Grâce à cette étude, il est possible de mieux comprendre les mécanismes de filtration dans les matériaux poreux, et ainsi de développer des modèles mathématiques pour prédire leur comportement.

Les milieux poreux sont présents dans de nombreux systèmes naturels et artificiels, et la compréhension de leur comportement est cruciale pour de nombreux secteurs.

Les propriétés des milieux poreux sont étroitement liées à leur microstructure, qui peut varier considérablement selon les matériaux et les méthodes de fabrication.

Les modèles théoriques et numériques ont été largement utilisés pour prédire le comportement de la filtration dans les milieux poreux. Ces modèles ont permis de mieux comprendre les phénomènes physiques et ont contribué à la conception de systèmes plus efficaces.

Les résultats des études bibliographiques peuvent également aider les ingénieurs à développer de nouveaux systèmes de filtration et à optimiser les processus de production.

Le milieu poreux est identifié par ses caractéristiques et la genèse de ses vides, et pores.

La granulométrie, accède à la morphologie des vides par deux paramètres des grains, le diamètre efficace et le coefficient d'uniformité, la connaissance de ces caractéristiques est nécessaire pour accéder à l'étude des écoulements traversant des milieux poreux.

L'écoulement de l'eau à travers un milieu poreux est déterminé par le coefficient de perméabilité, le gradient hydraulique, le débit et la vitesse de l'écoulement.

La loi de Darcy est applicable sur le terrain dans des conditions bien définies.

L'écoulement de l'eau dans un milieu poreux, est régit par une equation différentielle du second ordre (équation de Laplace), pour sa résolution nous avons recours aux méthodes numériques.

Le passage d'eau dans une partie du massif engendre un changement des caractéristiques géotechniques des matériaux avec apparitions de pressions interstitielles, ce qui augmente le risque de glissement des talus.

L'infiltration des eaux à travers la digue, est un phénomène qui est dû au gradient hydraulique et au coefficient de perméabilité. L'écoulement gravitaire de ces filets d'eaux entraînant avec lui les particules fines de sable. Ainsi, sous l'effet de pression elle forme un petit tunnel qui est dévastateur pour l'ouvrage et un danger pour la stabilité de l'ouvrage.

## Conclusion générale

Pour assurer une meilleure stabilité de l'ouvrage, on doit posséder les éléments et données nécessaires permettant de bien évaluer le taux d'infiltrations à travers la structure et l'importance des forces dues aux pressions interstitielles et de prévoir ainsi le comportement de l'ouvrage.

Nous avons défini les variables et les principaux paramètres qui caractérisent l'état hydrique d'un sol et leur importance dans la description de l'écoulement dans un milieu poreux.

La connaissance théorique des lois de l'écoulement de l'eau dans le sol, comme celle de l'action mécanique qui en résulte, seront nécessaires au projeteur, elles lui permettront d'appréhender les principes physiques et mécaniques qui ne sont pas remis fondamentalement en cause par les résultats de la pratique, ainsi que de prévoir et d'expliquer le comportement particulier des massifs.

L'ingénieur, confronté à des problèmes d'eau dans les sols dispose maintenant d'un éventail de techniques de résolution lui permettant d'obtenir la solution théorique. Il pourra ainsi mieux prévoir les moyens à mettre en oeuvre pour ces travaux, ainsi que l'influence de ceux-ci sur la nappe et le sol.

Malgré la richesse de ces essais, l'effet de l'hétérogénéité physique du milieu par le changement de la matrice poreuse, la rugosité de la surface d'un grain-collecteur restent assez mal décrits dans des milieux poreux modèles comme des billes en verre. Par ailleurs, l'influence de la vitesse d'écoulement est un paramètre prépondérant dans le mécanisme de capture d'une particule, cela est d'autant plus important dans un milieu hétérogène.

L'infiltration d'eau au travers du corps ou de la fondation des ouvrages en remblai est un problème qui peut devenir préoccupant. Le phénomène de l'infiltration de l'eau est évolutif et il peut mettre en péril la pérennité ou la stabilité de ces ouvrages et par conséquent la sécurité du public.

La filtration dans les milieux poreux peut être décrite par des équations mathématiques qui décrivent la perméabilité, la porosité et la résistance au flux.

Les équations de Darcy et de Navier-Stokes sont utilisées pour décrire le flux dans les milieux poreux.

Les effets de la pression, de la viscosité, de la porosité et de la perméabilité sur le processus de filtration dans les milieux poreux ont été largement étudiés.

Les recherches dans ce domaine continuent d'évoluer pour améliorer la compréhension des mécanismes de filtration et pour développer des techniques plus efficaces pour la filtration des fluides à travers les milieux poreux.

# **Bibliographie**

## Bibliographie

1. Ait Abbas, R. et Boudha, K., Etude des infiltrations à travers un milieu poreux : application au cas d'un barrage en terre. Mémoire de Fin d'Etudes, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2001.
2. AYADAT T., BELOUAHRI B. et AIT AMMAR R., (1998) La migration des particules fines comme approche d'explication du mécanisme de l'effondrement- Revue Française de géotechnique, n°83, p.73-81.
3. BELARBI, Abdelkader. 2014. Erosion dans les ouvrages hydrauliques : de la dispersion à la détection en place. Université de Tlemcen : Thèse de Doctorat,
4. BENADDA, L., « Infiltration à travers les barrages ». Cours. Université AbouBekr Belkaid Tlemcen.
5. BENCHERRAT, N. ET MOTEFKA KARA, M., « Analyse paramétrée pour l'optimisation des dimensions des drains des barrage en terre ». Mémoire de projet de fin d'étude. Université Aboubekr Belkaid -Tlemcen, 2017.
6. Bir, Said. 2012. Ecoulement au travers les milieux poreux. Approche Stochastique. Tizi Ouzou : Thèse de magistère.
7. Blais J. (2005). Typologie de l'érosion interne et érosion internes des digues fluviales, 70 p, p 66-67.
8. Bouhlali M. (2006). Les risques associés aux barrages, mémoire de magister, université Abou bekr balkaid Tlemcen.
9. Comité internationale des grands barrages. Géotextiles : filtres et transition pour barrages en remblai, bulletin 55, 129p.
10. Comité internationale des grands barrages. 1995 -Barrages en remblai: filtres et drains granulaires, bulletin 95, 256p.
11. Dahmouche N. (2017). Études des infiltrations et stabilité du barrage
12. Désodt C., Horsin Molinaro H. (2016). Phénomène de boulangerie et d'érosion régressive (renard hydraulique) dans les barrages. 11p, 3-6P.
13. DOUIS, M. ET BEDJOUTI, M., « Etude des infiltrations des eaux par les berges et le fond des barrages réservoirs en région arides: Cas du barrage fontaine des gazelles Biskra ». Projet de fin d'étude. Université d'El-Oued, Mai 2017.

- 14.** LEHBAB Z. et BOUKEZZI R. « Les barrages en remblai de terre ». Polycopié, Faculté d'Architecture et de Génie Civil, Département d'Hydraulique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF.
- 15.** Malfi, A et Kolli , A. 2012. Infiltration dans les barrages en terre et influence des dispositifs de drainage. Mémoire d'ingénieur. Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen.
- 16.** MARCEL FRENETTE (1977) -Ecoulement dans les milieux poreux –Edition presse Universitaire Laval ,236 p.
- 17.** MARIAUX P., ROYET P.et FOLTON C., (2000) –Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations, éditions cemagref, 88p.
- 18.** Messaid B. (2009) Étude de la position efficace des drains dans les barrages en terre, université colonel Hadj-Lakhdar-Batna, thèse de doctorat, soutenue en 2009, Batna, Algérie.263 P.
- 19.** POULAIN D., ALONSO E., GIRARD H., MORLIER P., (1995). Développement des pressions interstitielles de construction dans les barrages en matériaux argileux humides. Revue française de géotechnique, N°72. p. 35-54
- 20.** Post, G., &Guerber, P. (1973). Conception du drainage dans les barrages en terre
- 21.** ROUISSAT née SMAILN., surveillance des barrages ,Cours Master Ouvrages hydrauliques, Université ABOU BEKR BELKAID, Tlemcen, Algerie
- 22.** Rouissat N. (2007). Approche méthodologique du suivi de comportement des barrages en remblai.Mémoire de magister. Département de génie civil. Faculté de technologie université Aboubekr Balkaid,Tlemcen.
- 23.** Tacgrift H. (2008). Risque de renard hydraulique modélisation des écoulements dans le corps de digue, 21 p.
- 24.** Toumi A., Remini B. (2002). Contribution à l'étude des fuites dans les barrages Algériens, 1ères journées pluridisciplinaires sur les sciences de l'ingénieur "JPSI'1 2002", Université Hassiba ben Bouali Chlef, 15-17 Décembre.



**Annexe**

## Classification des préfiltres à gravier

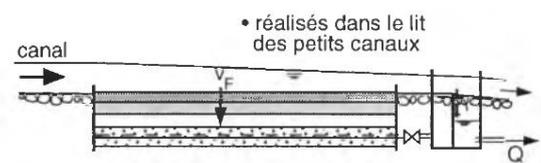
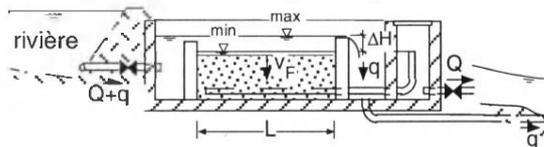
Les différents types de préfiltre à gravier sont classés selon :

- La raison principale de son utilisation
- Le sens de l'écoulement de l'eau
- La conception et dimensionnement du filtre
- La technique de nettoyage du filtre

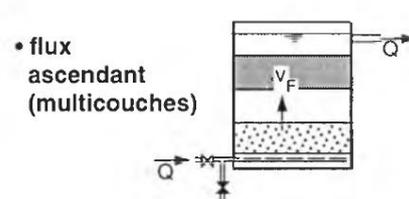
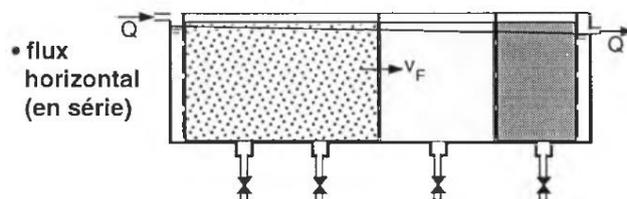
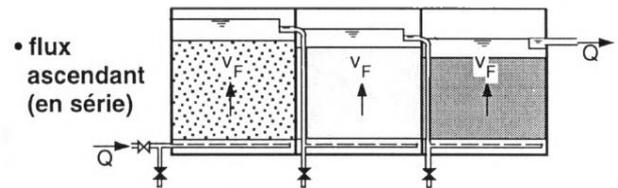
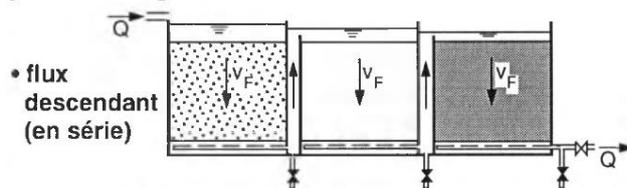
Type de filtre	Taille des matériaux filtrants $d_g$ [mm]	Vitesse de filtration $v_f$ [m/h]
filtre à cailloux	> 50 mm	1 - 5 m/h
préfiltre à gravier	20 - 4 mm	0.3 - 1.5 m/h
filtre rapide à sable	4 - 1 mm	5 - 15 m/h
filtre lent à sable	0.35 - 0.15 mm	0.1 - 0.2 m/h

**Tableau . Classification des filtres**

### filtres à la prise et filtres dynamiques



### préfiltres à gravier



SANDEC 4.97

**Figure** Classification des préfiltres

	procédés courants	procédés alternatives	emplacement			objectif		sens de l'écoulement		dimensionnement du filtre		nettoyage du filtre	
			lit de rivière ou canal	site de la prise d'eau	station de traitement	captage d'eau	protection des filtres en aval	amélioration de la qualité de l'eau	non maîtrisé	vertical	horizontal	un seul filtre	plusieurs filtres
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													

1 galerie d'infiltration

2 filtre à la prise

3 filtre dynamique

4 préfiltre à gravier multicouches à flux ascendant

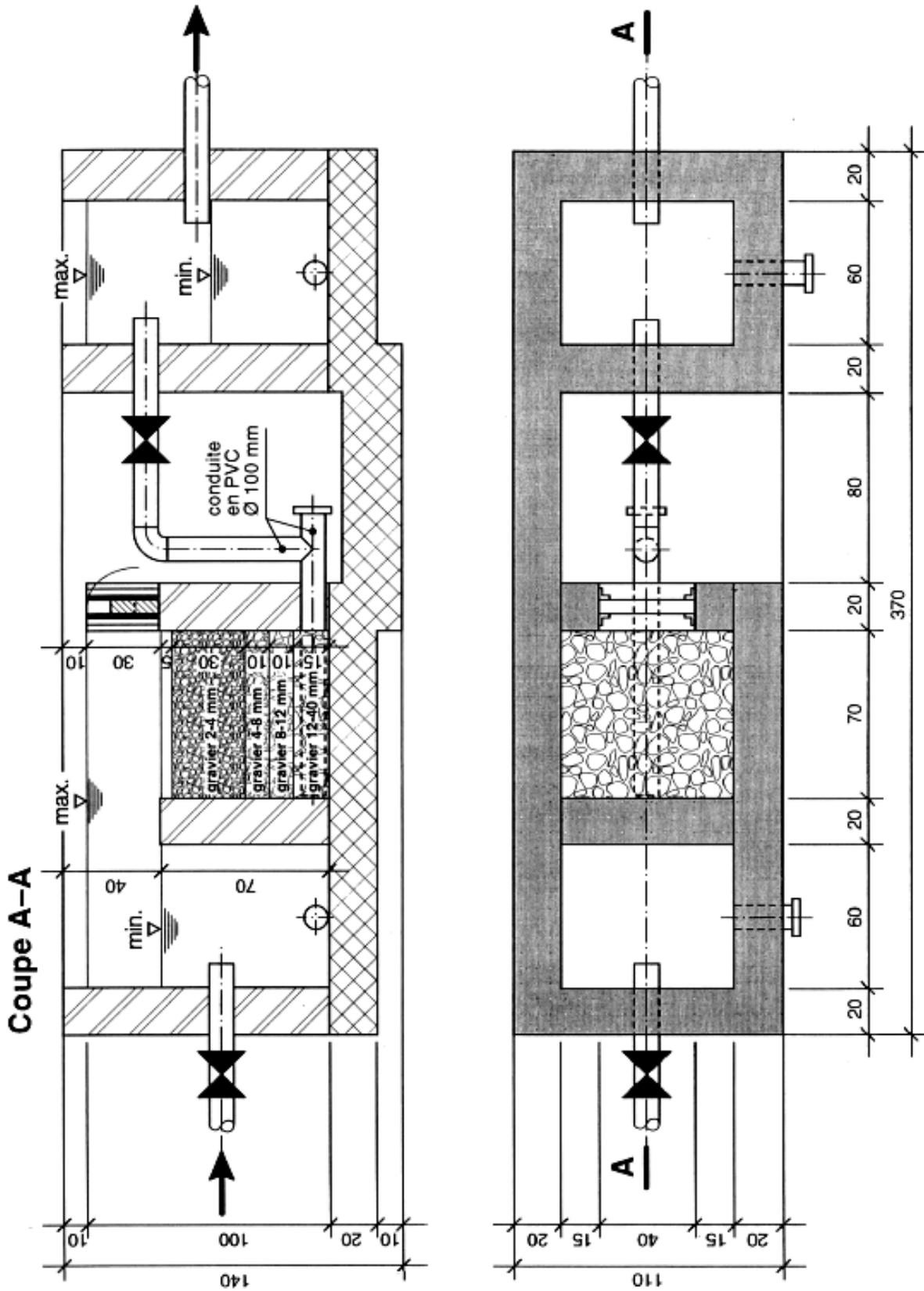
5 préfiltre à gravier à flux ascendant en série

6 préfiltre à gravier à flux descendant en série

7 préfiltre à gravier à flux horizontal

Tableau Usage et conception de préfiltres à gravier

## Exemple d'un filtre dynamique

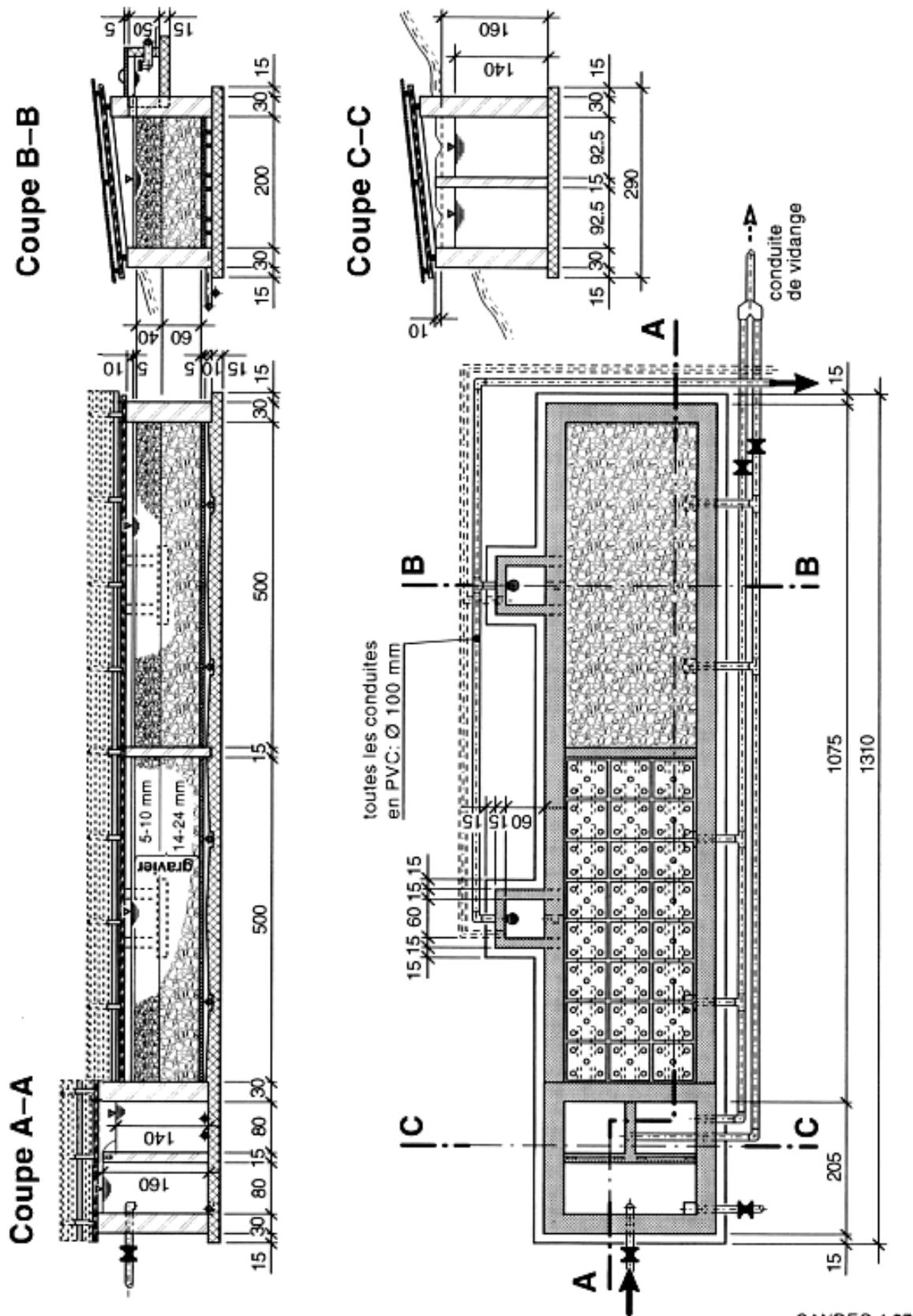


SANDEC 4.97



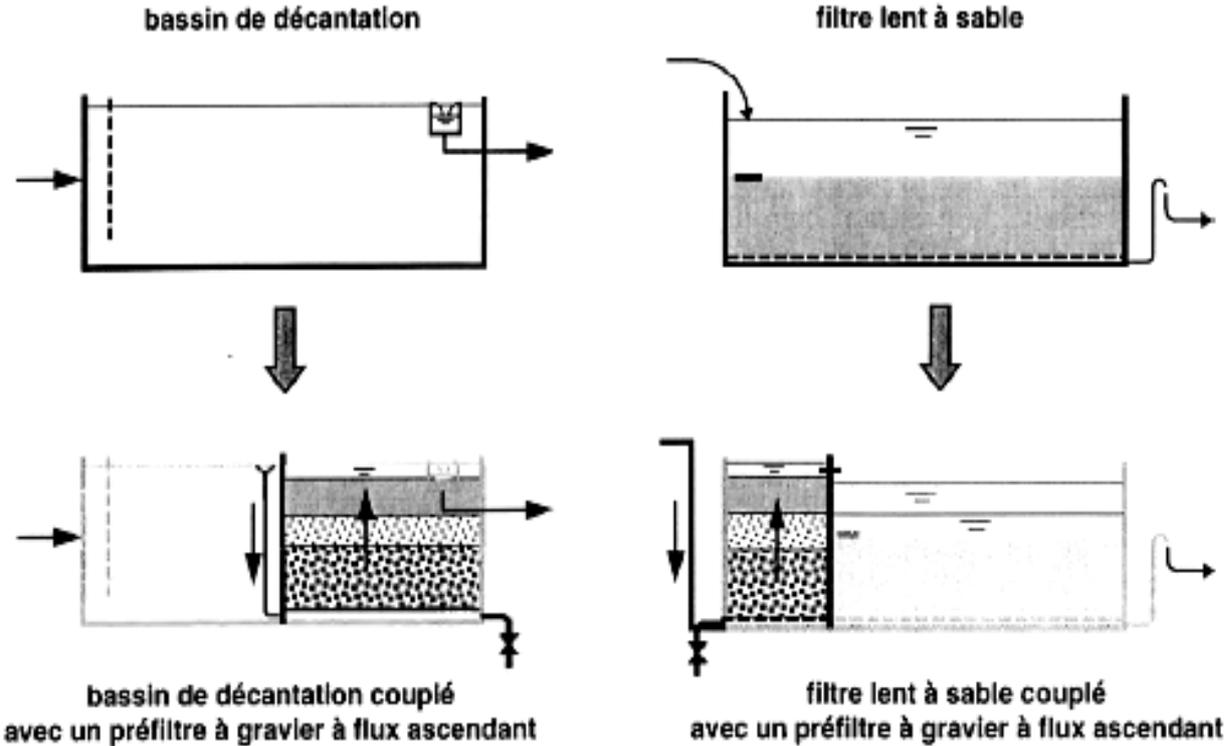


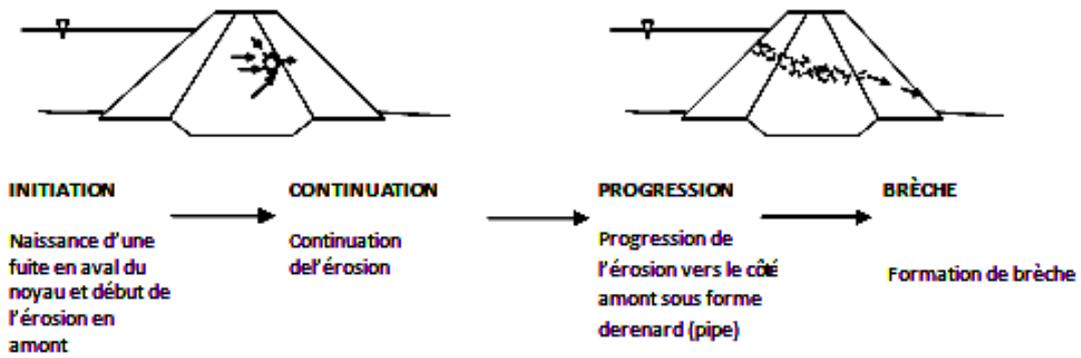
## Exemple d'un préfiltre à gravier à flux ascendant



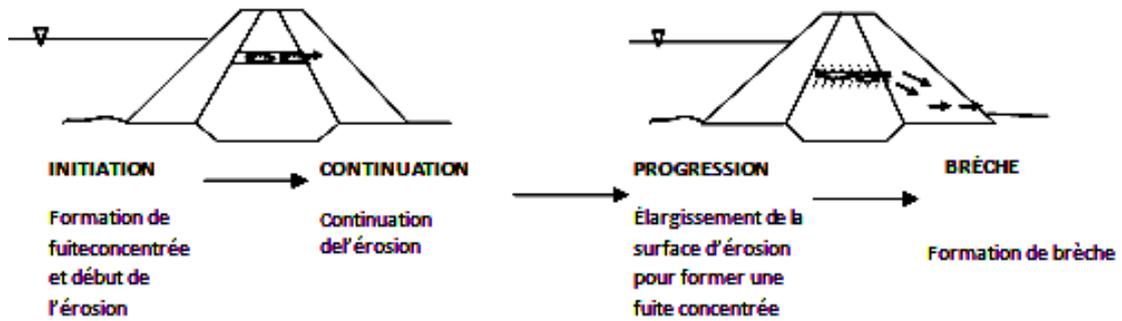
SANDEC 4.97

**Dispositifs types pour intégrer un préfiltre à gravier à flux ascendant dans un bassin de décantation ou dans un filtre lent à sable existant**

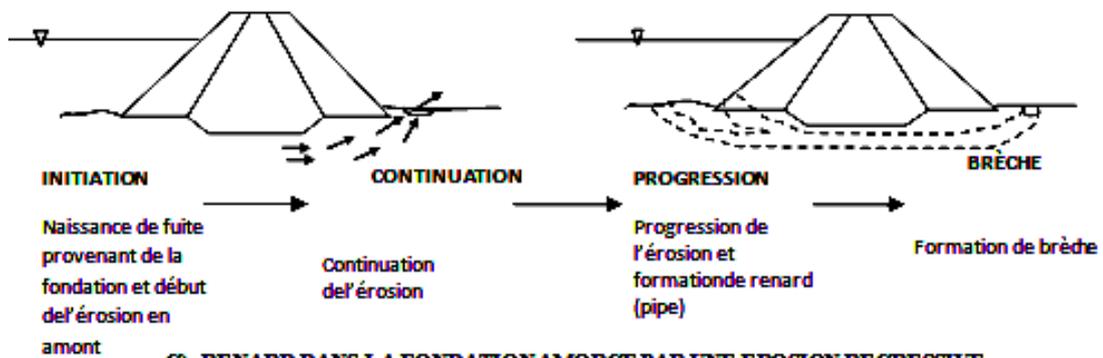




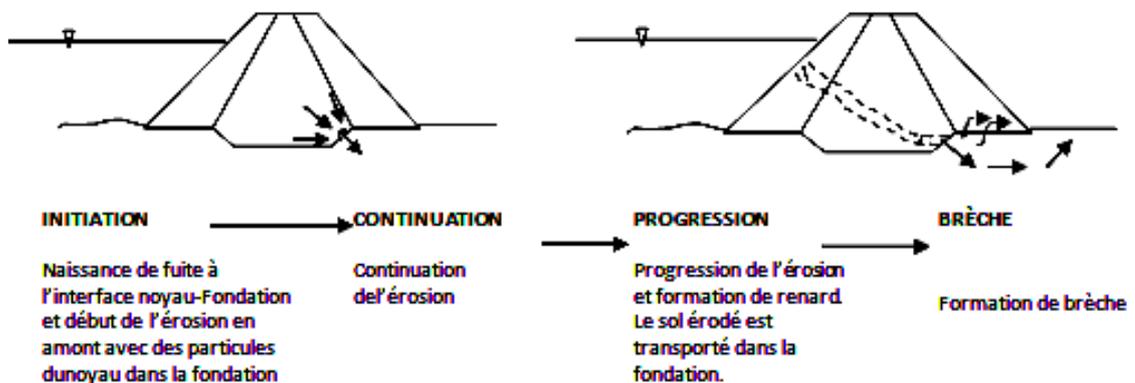
**A) RENARD DANS LES REMBLAIS INITIÉ PAR UNE ÉROSION RÉGRESSIVE**



**B) RENARD DANS LES REMBLAIS AMORCÉ PAR UNE CONCENTRATION DE FUITE**



**C) RENARD DANS LA FONDATION AMORCÉ PAR UNE ÉROSION RÉGRESSIVE**



**D) RENARD DES REMBLAIS À LA FONDATION AMORCÉ PAR UNE ÉROSION RÉGRESSIVE**

E  
 xemple de processus d'érosion interne dans un barrage : (A et B) avec formation de renard dans le remblai par érosion rétrogradant en amont et par fuite concentrée, (C) avec formation de renard dans la fondation par érosion rétrogradant en amont, et (D) avec formation de renard du remblai à la fondation (Fell *et al.*, 2001)