

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU**  
**FACULTE DES SCIENCES BIOLOGIQUES ET SCIENCES AGRONOMIQUES**  
**DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES**



**MEMOIRE**

Présenté pour obtenir le Grade de

**MASTER**

*Filière* : Sciences Agronomiques

*Spécialité* : Traitement et Valorisation des Ressources Hydriques

Présenté par :

**AISSAOUI Dyhia**

*et*

**BERKAINE Sarah**

# **Thème**

**ETUDE DES PROPRIETES PHYSIQUES ET  
HYDRODYNAMIQUES DES SABLES**

Soutenu le 12 / 07 / 2016, devant le *jury* composé de :

<b>M METAHRI Mohammed Said</b>	<b>MCA - UMMTO</b>	<b>Président</b>
<b>M SI SMAIL Ali</b>	<b>MCB - UMMTO</b>	<b>Promoteur</b>
<b>M ALLILI Naceur</b>	<b>MAA - UMMTO</b>	<b>Examineur</b>
<b>M MEROUKI Kamel</b>	<b>MCB - UMMTO</b>	<b>Examineur</b>



## **Remerciement**

*Nous remercions **Dieu** qui nous a donné le courage, la patience et l'intelligence pour réaliser ce modeste travail.*

*Tout d'abord, nous tenons à remercier tous les enseignants de l'UMMTO pour nous avoir aidés et dirigés tout au long de nos études.*

*Nous exprimons nos sincères remerciements et reconnaissances à notre responsable de spécialité qui a contribué à notre formation **M Metahri***

*Nous tenons à adresser nos plus vifs remerciements à notre promoteur « **M Si Smail Ali** » pour l'aide et la patience dont il a fait preuve lors de l'élaboration de ce travail.*

*Ainsi que les membres de jury qui nous font l'honneur de juger notre travail, le président « **M Metahri Mohammed Said** », les examinateurs « **M Allili Naceur et M Merouki Kamel** ».*

*Nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.*



# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail :*

*À ma chère maman et mon cher papa que j'adore, pour leur aide et leur soutien tout au long de mes études, et qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui j'espère qu'un jour je serai capable de leur donner le minimum car quoique l'on fasse on n'arrivera jamais à égaler leur dévouement.*

*À mes très chers frères et sœurs, les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je vous porte, je leurs souhaite beaucoup de réussite.*

*À mon neveu Zinou et ma nièce Ikram, puisse Dieu leurs accorder longue vie, bonheur, sante de fer et de réussite.*

*À mes beaux frères, que Dieu vous assiste.*

*Et à toute ma famille, que Dieu tout puissant les protège.*

*À ma copine et binôme Sarah ainsi que sa famille, je leurs souhaite un avenir plein de joie, et de réussite.*

*À my best friend Samiha et sa famille, ma confidente dans les moments les plus délicats de cette vie mystérieuse. Merci pour ton aide, ton soutien, tes conseils et tes encouragements.*

*À mes chers amis Hayet et Mohamed Amine, que j'adore ainsi que leur famille*

*À tous mes amis (es)*

*À ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance.*

*Sans oublier mes camarades de la promotion 2016.*

*Dyhia*

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mon seul abri de bonheur, à ceux qui m'ont donné leur bénédiction leur tendresse, ma seule source d'amour, à ceux qui m'ont donné le bon sens à ma vie, qui n'ont jamais cessé de me lancer d'aide moral et matériel, à ceux qui ont enluminé ma vie mon père ALI et ma mère DJAMILA.*

*A mon seul abri de conseil depuis mon enfance, mes grands mère CHABHA et YAMINA dieu les protège.*

*A ceux qui m'ont donné le courage et la confiance, mes frères : Kamel et Meziane et le plus beau cadeau que dieu nous a offert Mouloud.*

*A la mémoire de mon grand père « Mouloud » et de mon oncle « Rachid » mes sources de joie dieu le tout puissant les accueille en son vaste paradis.*

*A mon oncle Smail et sa famille*

*A ma cousine Anaisse.*

*A mes oncles et tantes et leurs familles.*

*A ma copine et binôme Dyhia avec laquelle j'ai partagé la souffrance et les bons moments du travail durant tout le cycle universitaire et sa famille.*

*A mon chère ami et frère Mohamed Amine mon abri de conseil.*

*A mon amie Hayet.*

*A tous mes camarades de promotion.*

*A tous ceux que j'aime, que je n'ai pas mentionnés (e) mais que je n'ai pas oubliés (e).*

sarah

# Sommaire

## Liste des abréviations

## Liste des figures

## Liste des tableaux

## Résumé

Introduction générale ..... 1

## Chapitre I : Éléments caractéristiques du sol

I.1. Introduction..... 2

I.2. Classification des sols ..... 2

I.2.1. Granulométrie ..... 2

I.2.2. La texture ..... 4

I.2.3. La structure ..... 4

I.3. Les propriétés physiques du sol ..... 5

I.3.1. Les différentes phases d'un sol ..... 5

I.3.2. La teneur en matière organique (**Worg**)..... 5

I.3.3. La porosité totale et la porosité efficace ..... 6

I.3.4 La densité ..... 7

I.3.5. La conductivité hydraulique (la perméabilité)..... 8

## Chapitre II : Matériels et méthodes

II.1. Introduction ..... 9

II.2. Notion de la charge hydraulique (H)..... 9

II.3. Loi de Darcy (1856) ..... 9

II.4. Notion de la vitesse de filtration .....11

II.5. Equation de continuité .....11

II.6. Loi générale des écoulements (équation de Laplace).....11

II.7. Mesure de la porosité.....12

II.8. Mesure en laboratoire du coefficient de perméabilité .....13

II.8.1. Peréamètre à charge constante .....	14
II.8.2. Perméamètre à charge variable .....	15
II.9. Mesure in situ de la perméabilité .....	16
II.9.1. Le perméamètre de Guelph .....	17
II.9.2 Infiltromètre de Müntz.....	18
II.9.3. Infiltromètre à double cylindre .....	18

### **Chapitre III : Propriétés des sables**

III.1. Introduction .....	20
III.2. Classification des sables .....	20
III.3. Origine et composition du sable .....	21
III.4. Les minéraux essentiels du sable .....	22
III.5. Les filtres à sable.....	22
III.5.1. Les différents types de filtres à Sable .....	22

### **Chapitre IV : Résultats et interprétations**

IV.1. Résultats des mesures de la perméabilité .....	25
IV.2. Résultats des mesures des porosités.....	27
IV.3. Résultats de l'analyse granulométrique.....	30
IV.4. interprétation des résultats .....	31
Conclusion générale .....	33

### **Références bibliographiques**

# Liste des abréviations

A.S.T.M : Standards American Society for Testing Material

$C_u$  : Coefficient d'uniformité

$d$  : Diamètre

$D_a$  : Densité apparente

$D_r$  : Densité réelle

$H$  : Charge hydraulique

$i$  : gradient hydraulique

$K$  : Perméabilité

$K_s$  : Perméabilité à saturation

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

$q$  : Flux d'écoulement

$Q$  : Débit

$U$  : Vitesse fictive

USCS : Unified Soil Classification System

$W_{org}$  : Teneur en matière organique

$z$  : Niveau géométrique

% : pourcentage

$\eta$  : Porosité totale

$\eta_e$  : Porosité efficace (de drainage).

# Liste des figures

Figure (I.1) : Classification des sols selon les dimensions des grains .....	3
Figure (I.2) : Exemple de courbe granulométrique avec ses paramètres caractéristiques .....	4
Figure (I.3) : Schéma des différentes phases d'un sol .....	5
Figure (II.1) : Schéma de mesure du débit selon la loi de Darcy .....	10
Figure (II.2) : Dispositif de mesure de la porosité.....	13
Figure (II.3) : Perméamètre à charge constante.....	14
Figure (II.4) : Perméamètre à charge variable.....	16
Figure (II.5) : Perméamètre de Guelph.....	17
Figure (II.6) : Infiltromètre de Müntz.....	18
Figure (II.7) : Infiltromètre à double anneau .....	19
Figure (IV.1) : Relation débit-charge hydraulique (cas du sable de la station de traitement) .....	25
Figure (IV.2) : Relation débit - charge hydraulique (cas du sable de l'Oued).....	25
Figure (IV.3) : Relation débit-charge hydraulique (cas du sable de mer).....	26
Figure (IV.4) : Courbes granulométriques des sables de la station, de l'oued et de mer...30	

## Liste des tableaux

Tableau (I.1) : Ordre de grandeur de la conductivité hydraulique K dans différents sols (Musy et Soutter, 1991).....	8
Tableau (III.1) : Classification unifiée des sols (A.S.T.M.).....	21
Tableau (IV.1) : Calcul de la perméabilité des trois types de sables par régression linéaire à partir de la relation : débit-charge hydraulique.....	26
Tableau (IV.2) : Calcul de la porosité totale du sable de la station de traitement.....	27
Tableau (IV.3) : Calcul de la porosité de drainage du sable de la station de traitement .....	27
Tableau (IV.4) : Calcul de la porosité totale du sable de l'Oued tamisé.....	28
Tableau (IV.5) : Calcul de la porosité de drainage du sable de l'Oued tamisé.....	28
Tableau (IV.6) : Calcul de la porosité totale du sable de mer .....	29
Tableau (IV.7) : Calcul de la porosité de drainage du sable de mer .....	29
Tableau (IV.8) : Résultats de l'analyse granulométrique .....	31
Tableau (IV.9) : Tableau récapitulatif des différents paramètres caractéristiques calculés ..	31

# Résumé

Le sable est un sol meuble utilisé comme matériau de base dans la confection des matières et béton d'ouvrage hydraulique, et un lit de filtration.

Notre étude est portée sur la caractérisation hydrodynamique et la mesure de certains paramètres physiques de sable de la station, sable d'oued tamisé et le sable de mer.

Les essais au laboratoire conduit au moyen d'un perméamètre à charge constante ont permis une bonne mesure des paramètres précédents.

Pour cela, notre travail est reparti en quatre chapitres dans lesquels on a présenté et étudié avec précision ces différents paramètres.

*Introduction*  
*générale*

## **Introduction générale**

Le sable est un sol meuble issu de la dégradation et de l'érosion des roches, engendrées par les éléments climatiques (neige, pluie, vent, variations des températures). Il est utilisé comme matériau de base dans la confection des mortiers et bétons en construction bâtiments, d'ouvrages hydrauliques (barrage, réservoir, station de traitement) et dans les travaux publics. Il est également utilisé comme lit de filtration-percolation (filtre à sable) dans les stations d'épuration des eaux et les systèmes d'assainissement des eaux usées des petites agglomérations et des habitations individuelles, et ce grâce à ses propriétés de fixation ( de support ) des micro-organismes, permettant la dégradation de la matière organique et l'oxydation des composés azotés des eaux usées.

Dans la présente étude, l'intérêt est porté sur la caractérisation hydrodynamique et la mesure de certains paramètres physiques de trois types de sables différents (sable de filtration utilisé dans les stations de traitement d'eau potable, sable de l'oued tamisé et le sable de mer).

Les essais sont effectués au laboratoire, au moyen d'un perméamètre à charge constante. Ils concernent la mesure de la conductivité hydraulique à saturation et l'estimation de la porosité totale et de la porosité efficace (de drainage). L'analyse granulométrique par tamisage de ces sables est également envisagée, à partir de laquelle, on pourra tracer les courbes granulométriques et déterminer les paramètres essentiels, notamment les diamètres spécifiques des grains et le coefficient d'uniformité.

Pour cela, l'étude est répartie en quatre chapitres dans lesquels on a présenté en premier lieu les éléments caractéristiques d'un sol d'une manière générale, les matériels et méthodes de mesure, les propriétés du sable avec les différents types de filtre à sable utilisés dans la pratique. Le dernier chapitre est réservé aux résultats ainsi obtenus et leurs interprétations.

# *Chapitre I : Eléments caractéristiques du sol*

## **I.1. Introduction**

Comme tous les autres types de sols, le sable est milieu poreux polyphasique composé : d'une phase solide, d'une phase liquide et d'une phase gazeuse. La connaissance des caractéristiques de toutes ces phases avec les différentes interactions entre elles est d'une grande importance. À cet effet dans ce chapitre, l'intérêt est porté particulièrement sur les critères de classifications des sols et sur leurs paramètres caractéristiques, d'une manière générale.

## **I.2. Classification des sols**

Selon Unified Soil Classification System (USCS) et le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC - France), qui représentent la classification LCPC/USCS, la plus utilisée dans la pratique, distingue trois grands types de sols :

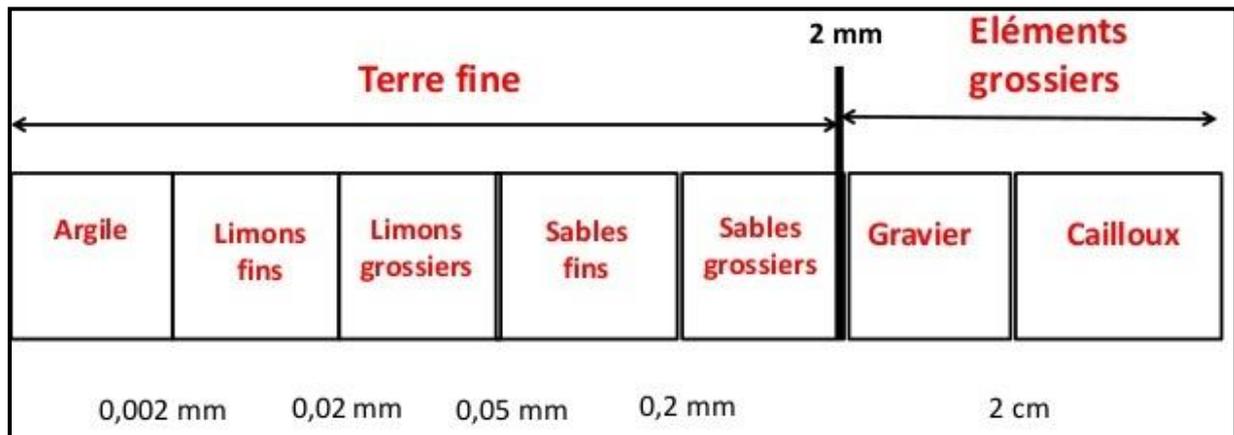
- Les sols grenus dont 50 % au moins d'éléments sont de taille supérieure à 80  $\mu\text{m}$  ;
- Les sols fins dont au moins 50 % d'éléments sont de taille inférieure à 80  $\mu\text{m}$  ;
- Les sols organiques dont la teneur en matière organique est supérieure à 10 %.

La classification LCPC contient donc une partie aux sols grenus (meubles au peu cohérent) et une autre spécifique aux sols fins (cohérents). Des tests élaborés existent afin de terminer dans quelle mesure un sol est plus ou moins de tel type ou d'un autre. Cependant, comme il a été dit plus haut.

### **I.2.1. Granulométrie :**

La granulométrie reste le point le plus important lors de la classification d'un sol. L'analyse granulométrique a pour but de déterminer les proportions de grains de différentes tailles dans le sol. De manière générale, elle s'effectue par tamisage pour les grains de diamètre supérieurs à 80  $\mu\text{m}$ , avec une pesée des matériaux retenus dans chaque tamis.

Elle permet de distinguer les types de sols sur lesquels on travaille en faisant la différence entre les sols fins et les sols grenus.

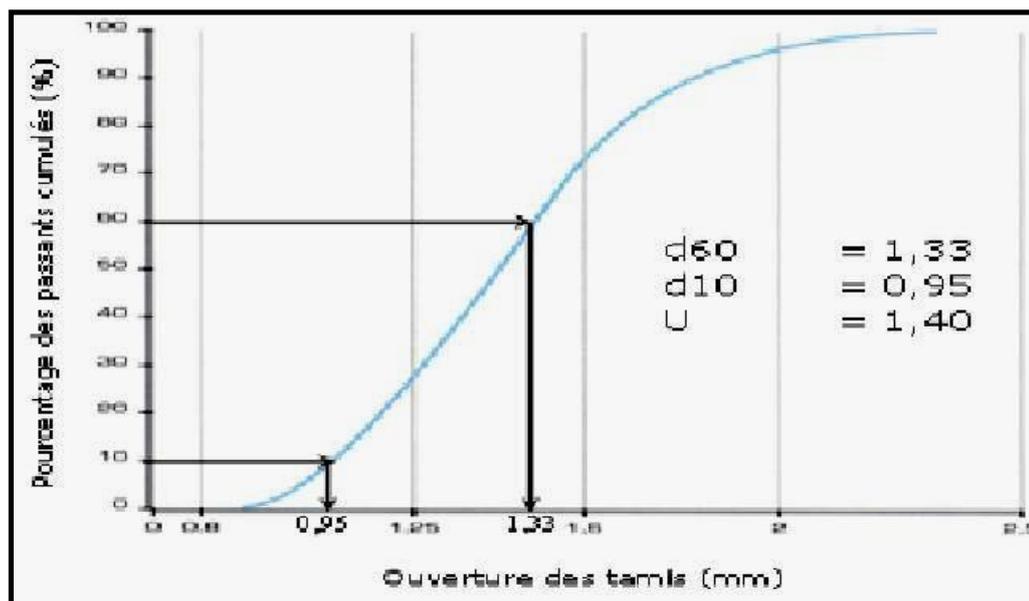


**Figure (I.1) :** Classification des sols selon les dimensions des grains  
(Lucie Pasquier)

La granulométrie est représentée par une courbe granulométrique dans laquelle l'axe des abscisses représente l'ouverture des tamis (diamètres en mm) et l'axe des ordonnées le % cumulé en poids des particules tamisées (passants au tamis).

Ce qui permet de déterminer les caractéristiques importantes de la granulométrie telles que :

- $d_{60}$  : diamètre correspondant à 60 % des particules en poids qui ont un diamètre inférieur.
- $d_{10}$  : diamètre correspondant à 10 % des particules en poids qui ont un diamètre inférieur.
- Le Coefficient d'uniformité  $C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$  ( $C_u < 2$  granulométrie uniforme,  $C_u > 2$  granulométrie étalée ou variée).



**Figure (I.2) :** Exemple de courbe granulométrique avec ses paramètres caractéristiques

### I.2.2. La texture :

La texture d'un sol dépend de sa teneur en éléments minéraux fins, dont le diamètre des grains est inférieur à 2 mm (% de sable grossiers et fins, % de limons et % d'argile granulométrique). Généralement elle est établie par sédimentométrie (mesure de la vitesse de décantation des particules fines).

On peut ainsi définir la texture comme étant la répartition numérique des particules élémentaires en fonction de leurs tailles (Tableau I.1).

La texture du sol, caractérisé par ses éléments fins ( $\varnothing \leq 2\text{mm}$ ), influence considérablement la capacité de rétention en eau du sol qui dépend des forces de capillarité et d'adsorption.

### I.2.3. La structure :

La structure d'un sol traduit le mode d'organisation de ses constituants solides, à un moment donné. Cette organisation a un impacte important sur la porosité, la densité apparente et la conductivité hydraulique du sol et donc sur le processus d'infiltration.

On distingue dans la pratique trois groupes de structure :

- Les structures particulières ou élémentaires : dans lesquels les constituants solides sont entassés sans aucune liaison ;
- Les structures compactées ou continues : dont les éléments noyés dans une masse d'argile dispersée, ne font qu'un bloc ;
- Les structures fragmentaires : dont lesquelles les constituants assemblés en agrégats élémentaires sont groupés en éléments structuraux plus au moins gros d'aspect allongé anguleux ou sphérique.

### I.3. Les propriétés physiques du sol

#### I.3.1. Les différentes phases d'un sol :

Les différentes phases d'un sol sont représentées dans la figure (1.1) ci-dessous

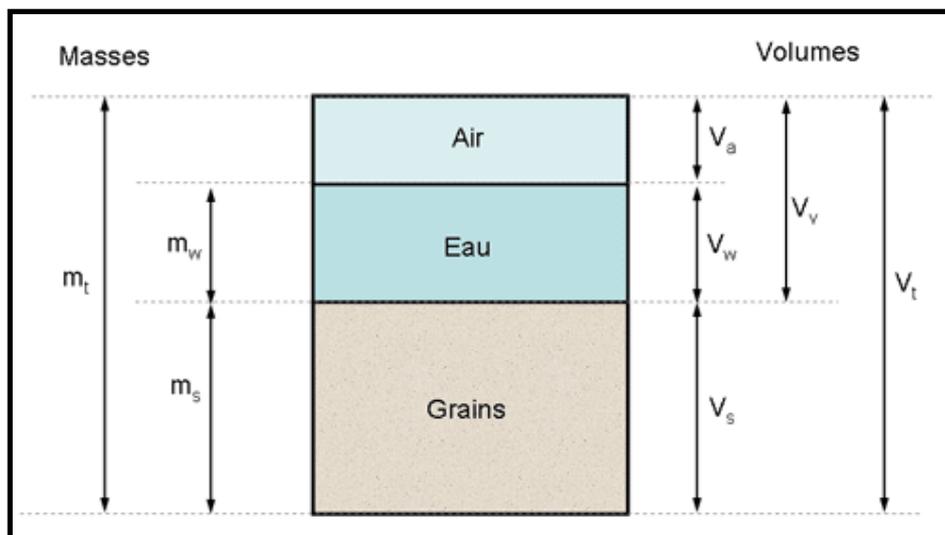


Figure (I.3) : Schéma des différentes phases d'un sol

#### I.3.2. La teneur en matière organique ( $W_{org}$ ) :

Les matières organiques du sol (résidus d'organisme et l'humus) proviennent de la transformation des débris végétaux par les organismes vivants, essentiellement les micro-organismes. Composées de 58 % de carbone organique en moyenne. Elles assurent de nombreuses fonctions agronomiques et environnementales. Elles améliorent la fertilité, l'aération, la réserve en eau et la biodiversité du sol. Elles limitent la

compaction et l'érosion hydrique et favorisent le piégeage des métaux toxiques ou des micropolluants organiques.

Elle est estimée à partir de la relation :

$$W_{org} = \frac{M_{org}}{M_s} \cdot 100 \quad (\%)$$

### I.3.3. La porosité totale et la porosité efficace :

#### ➤ La porosité totale

La porosité d'un sol totale représente l'espace occupé par les vides du sol. la porosité correspond à la « fraction de l'unité de volume du sol en place qui n'est occupée par la matière solide ».

En mécanique des sols on définit la porosité comme étant le rapport du volume des vides (c'est-à-dire du volume occupé par l'air, l'eau au deux fluides simultanément) au volume total du sol ». (Castet et Sanglerat)

$$\eta = \frac{V_v}{V_t} = \frac{V_a + V_e}{V_a + V_e + V_s} \cdot 100 \quad \%$$

Avec :

$V_v$ : Volume des vides (cm<sup>3</sup>) ;

$V_a$ : Volume de l'air (cm<sup>3</sup>) ;

$V_t$ : Volume totale (cm<sup>3</sup>) ;

$V_e$ : Volume de l'eau (cm<sup>3</sup>) ;

$V_s$ : Volume solide (cm<sup>3</sup>).

A la saturation le volume des vides est remplie presque intégralement par l'eau  $V_e = V_v$  ainsi dans ces conditions la porosité est égale à la teneur à saturation

➤ **La porosité efficace (de drainage)**

Elle donnée par le rapport entre le volume d'eau gravitaire ( $V_{eg}$ ) et le volume total :

$$\eta_e = \frac{V_{eg}}{V_t}$$

- Elle est à noter que la porosité efficace (Castany, 1962) est le rapport du volume d'eau gravitaire qu'un milieu poreux peut contenir en état de saturation puis libéré sous l'effet d'un drainage complet (égouttage en laboratoire sur échantillon), à son volume total.
- Elle représente en pratique le coefficient d'emménagement d'un aquifère à nappe libre, utilisé pour déterminer le volume d'eau exploitable par un forage.
- Elle est appelée également, suivant les auteurs : porosité effective, porosité de drainage, porosité utile, porosité dynamique, capacité de libre écoulement, coefficient d'écoulement, coefficient de restitution.

**I .3.4. La densité :**

On distingue dans la densité réelle et la densité apparente

➤ **Densité apparente ( $D_a$ )**

La densité apparente est le poids de sol sec par unité de volume brut dite aussi masse volumique est donnée par le rapport :

$$D_a = \frac{M_s}{V_t} \text{ g/cm}^3$$

Avec :

$M_s$  : Masse sèche de terre en g ;

$V_t$ :Volume totale de l'échantillon en  $\text{cm}^3$ .

➤ **Densité réelle (Dr)**

La densité réelle est le poids réel des éléments constitutifs d'un même sol, après élimination de la porosité. Cette mesure tient uniquement compte des constituants solides du sol, elle est plus au moins constante, soit 2.66 g/cm<sup>3</sup>.

$$D_r = \frac{M_s}{V_s} \text{ g/cm}^3$$

Avec :

M<sub>s</sub>: Masse de solides en g ;

V<sub>s</sub>: Volume des solides en cm<sup>3</sup>.

**I.3.5. La conductivité hydraulique (la perméabilité)**

La perméabilité au point de vue théorique est la faculté que possède un sol, de se laisser traverser par un courant d'eau libre, elle conditionne la vitesse verticale de l'eau vers des parties profondes ainsi que la diffusion latérale. Elle est estimée à partir de la loi de Darcy présentée dans le chapitre II, suivant.

L'ordre de grandeur de la perméabilité selon la nature du sol est donné dans le tableau I.1 ci-dessous :

**Tableau (I.1) :** Ordre de grandeur de la conductivité hydraulique K dans différents sols (Musy et Soutter, 1991)

<b>K (m/s)</b>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-11</sup>
Types de sols	Gravier sans sable ni éléments fins		Sable avec gravier, Sable grossier à sable fin		Sable très fin Limon grossier à limon argileux		Argile limoneuse à argile homogène				
Possibilités d'infiltration	Excellentes		Bonnes		Moyennes à faible		Faibles à nulles				

*Chapitre II :*

*Matériels et méthodes*

## II.1. Introduction

L'hydrodynamique de la phase liquide d'un sol repose sur l'analyse des diverses forces qui la conditionnent (gravité, capillarité et d'adsorption) et de la cinématique qui en résulte. Dans ce chapitre l'intérêt est porté sur facteurs et les lois traduisant les écoulements dans un sol saturé et sur les outils et méthodes de mesure des paramètres qui influencent ces écoulements, notamment la porosité et la perméabilité.

## II.2. Notion de la charge hydraulique (H)

La charge hydraulique représente une énergie spécifique (énergie par unité de poids du liquide en mètre de colonne d'eau : m.c.e). C'est elle qui conditionne l'écoulement de l'eau dans le sol. Elle est donnée par la relation :

$$H = h + z$$

Avec :

h est le potentiel de succion matricielle (m) ;

z est le niveau géométrique.

A la saturation, le potentiel matriciel est nul ( $h = 0$ )

D'où :  $H = z$

C'est-à-dire la charge hydraulique est égale au niveau d'eau, A cet effet l'écoulement de l'eau gravitaire, dans la zone saturée du sol, s'effectue selon la différence des niveaux d'eau autrement dit selon le gradient hydraulique : du niveau supérieur vers le niveau inférieur.

## II.3. Loi de Darcy (1856)

Henri Darcy, en étudiant les fontaines de la ville de Dijon vers 1856, afin d'améliorer la qualité des filtres à sable utiles à la purification des eaux d'alimentation. Darcy établit expérimentalement que le débit d'eau s'écoulant à travers un massif de sable

peut se calculer :

L'équation de Darcy est donnée par la relation :

$$Q = KA \frac{\Delta h}{L}$$

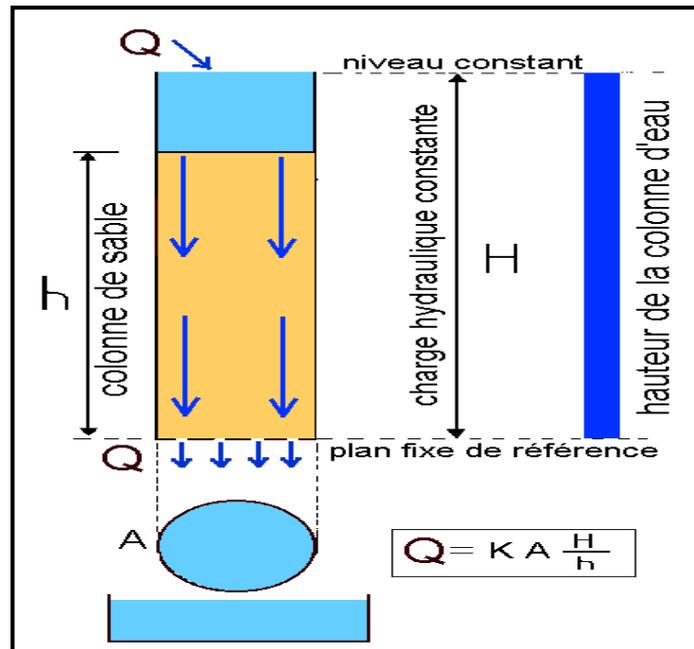


Figure (II.1) : Schéma de mesure du débit selon la loi de Darcy

Avec :

$A = S$  : section du massif sableux ;

$\Delta h$  : la charge hydraulique de l'eau entre le sommet et la base du massif sableux ;

$K$  : est une constante dépendant du milieu poreux, baptisée coefficient de perméabilité par les hydrogéologues ou mobilité par les mécaniciens ;

$L = h$  : est l'épaisseur du massif sableux.

## II.4. Notion de la vitesse de filtration

En divisant les deux membres par  $A$ , on fait apparaître la vitesse  $U$  fictive du fluide à la sortie du massif, comme si toute la section du massif était soumise à l'écoulement. C'est ce que nous avons appelé la vitesse de filtration.

$$U = \frac{Q}{A}$$

De plus, si l'on note  $i = \frac{\Delta h}{L}$  la perte de charge par unité de longueur de milieu poreux traversé, dénommée encore "gradient hydraulique", on obtient :

$$U = K i = K (\text{grad } H).$$

Le flux d'écoulement représente la vitesse de filtration ou le débit par unité de surface :

$$q = U = \frac{Q}{A}$$

Il est donné dans les trois directions de l'espace ( $x, y, z$ ) par les relations :

$$q_x = -k_x \frac{\partial H}{\partial x}$$

$$q_y = -k_y \frac{\partial H}{\partial y}$$

$$q_z = -k_z \frac{\partial H}{\partial z}$$

## II.5. Equation de continuité

L'équation de continuité exprime le principe de conservation de la masse. Appliquée à un volume de sol donné, ce principe se traduit par l'égalité entre le bilan des masses entrant et sortant de ce volume pendant un intervalle de temps, elle s'écrit :

$$\text{div } \vec{q} = \overrightarrow{\text{grad}} \cdot \vec{q} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0$$

## II.6. Loi générale des écoulements (équation de Laplace)

La combinaison entre l'équation de Darcy et l'équation de continuité donnée ci-

dessus, conduit à la relation générale suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( -k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( -k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( -k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) = 0$$

Dans le cas d'un sol saturé, isotrope et homogène on la perméabilité est constante dans les trois directions de l'espace et égale à la perméabilité à saturation ( $K_s$ ) :

$$k_x = k_y = k_z = k_s$$

Ainsi on obtient l'équation de Laplace:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0$$

C'est l'équation générale de l'écoulement en milieu saturé isotrope et homogène.

## II.7. Mesure de la porosité

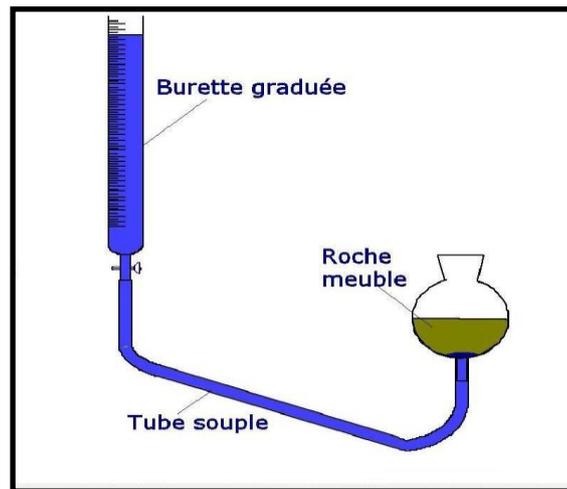
La porosité d'un échantillon de sol est donnée par le rapport : Volume des vides / volume total de l'échantillon.

$$\eta = \frac{V_v}{V_t}$$

Il est possible de déterminer le volume d'eau contenu dans l'échantillon en le pesant avant et après un séjour prolongé dans l'eau. La différence mesurée en gramme est convertie en volume  $1g = 1 \text{ cm}^3$ , ce volume représente le volume des vides.

Il est possible de mesurer le volume total en mesurant la quantité d'eau déplacée lors de son immersion.

## ➤ Autre méthode



**Figure (II.2) :** Dispositif de mesure de la porosité

C'est ce type de dispositif qui est utilisé dans cette étude. Le fonctionnement de ce dispositif est le suivant : Ouvrir le robinet. L'eau va ainsi, par gravité, monter dans la roche meuble.

Quand l'eau arrive au sommet du sol, fermer le robinet et lire le volume d'eau écoulée et qui a servi à remplir tous les espaces vides du sol. Si vous connaissez le volume de la roche meuble, vous pouvez déterminer la porosité totale.

## II.8. Mesure en laboratoire du coefficient de perméabilité

La détermination de la conductivité hydraulique d'un sol en laboratoire s'effectue à l'aide d'échantillon non remaniés et aussi représentatifs que possible de l'ensemble du terrain dont ils sont issus. Ces deux conditions sont en générales difficiles à respecter, d'où on fait recours à des techniques mises en place au laboratoire sont plus simples et les mesures relativement précises.

Le coefficient de perméabilité d'un sol saturé est une caractéristique du sol qui dépend essentiellement de sa granularité, de sa nature, de sa structure, de son indice des vides et de la température.

Plus un sol est fin ou un sol compact, plus les pores sont petits, plus les

frottements et les pertes de charge sont importants et plus le coefficient de perméabilité est petit.

Deux méthodes, applications directes de la loi de Darcy, sont utilisées en laboratoire :

- La mesure sous charge constante pour les sols très perméables ;
- La mesure sous charge variable pour les sols peu perméables.

### II.8.1. Perméamètre à charge constante :

Il s'agit de l'outil utilisé dans le cadre de cette étude pour la mesure de la perméabilité des sables et leurs porosités.

Il convient aux sols très perméables comme les sables et graviers. Cet essai doit satisfaire aux conditions suivantes :

- L'échantillon doit contenir des particules  $< 80 \mu\text{m}$  au plus égal à 10 % et 0 % de particules  $> 20 \text{ mm}$  ;
- L'écoulement d'eau à travers l'échantillon de sol est laminaire et permanent, de telle sorte que la vitesse d'écoulement de l'eau reste proportionnelle au gradient hydraulique ;
- L'échantillon de sol est saturé et ne subit pas de changement de volume durant l'essai ;
- La perte de charge ( $\Delta h$ ) demeure constante.

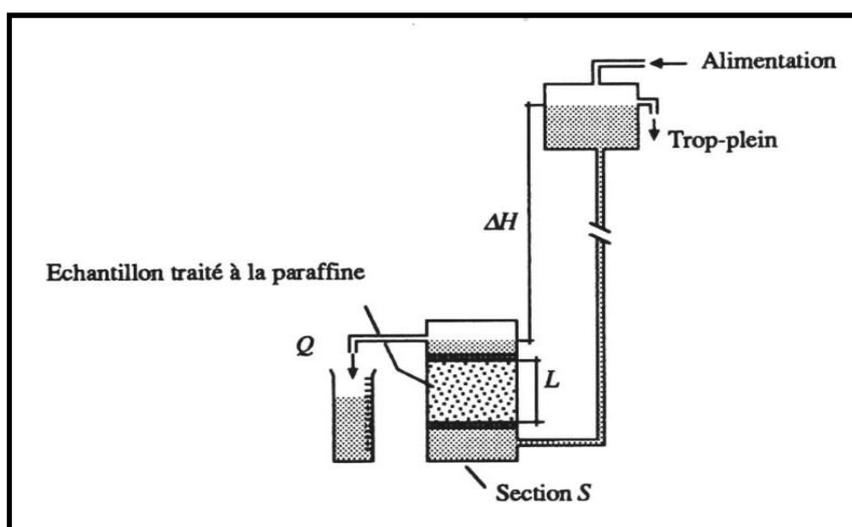


Figure (II.3) : Perméamètre à charge constante

Le principe du perméamètre à charge constante est analogue à celui du dispositif de Darcy. Le gradient hydraulique étant constant, la mesure du débit volumique ( $Q = \text{Volume}/\text{temps}$ ) permet de déterminer la conductivité :

$$Q = U.S = K_s.i.S = K_s.\frac{\Delta H}{L}.S$$

D'où :

$$K_s = \frac{Q L}{S \Delta H} = \frac{V L}{t S \Delta H}$$

Avec :

$i = \frac{\Delta H}{L}$  Gradient hydraulique (cm/cm) ;

U : Vitesse de filtration (cm/s) ;

V : Volume (cm<sup>3</sup>) ;

t : Temps (s) ;

S : Section de l'échantillon ;

L : Longueur de l'échantillon.

### II.8.2. Perméamètre à charge variable :

Avec les sols peu perméables comme des sols silteux et argileux, l'essai de perméabilité à charge constante ne délivre que très rarement des résultats acceptables, pour cela, on utilise l'essai à charge variable qui consiste à suivre dans un temps la variation de la charge appliquée à l'échantillon.

Le principe de mesure de la conductivité hydraulique à saturation à l'aide du perméamètre à charge variable consiste à suivre dans le temps la variation de la charge appliquée à l'échantillon. A un instant donné, la loi de Darcy et le débit  $Q(t)$  dans le tube s'écrivent respectivement :

$$Q(t) = k_s S \frac{H(t)}{L} \quad \text{et} \quad Q(t) = v(t) S$$

Où  $v(t)$  est la vitesse de descente du niveau de l'eau dans le tube. Soit :

$$V(t) = -\frac{dH}{dt}$$

En égalant les deux débits, on obtient alors :

$$S \frac{dH}{dt} = K_s S \frac{H(t)}{L} \quad \Longrightarrow \quad -S \frac{dH}{H(t)} = \frac{K_s S}{L} dt$$

Finalement, l'intégration de cette dernière expression entre  $t$  et  $t_0$  donne :

$$K_s = \frac{s}{S} \frac{L}{(t - t_0)} \ln\left(\frac{H_0}{H}\right) = 2,3 \frac{s}{S} \left(\frac{l}{t - t_0}\right) \log \frac{H_0}{H}$$

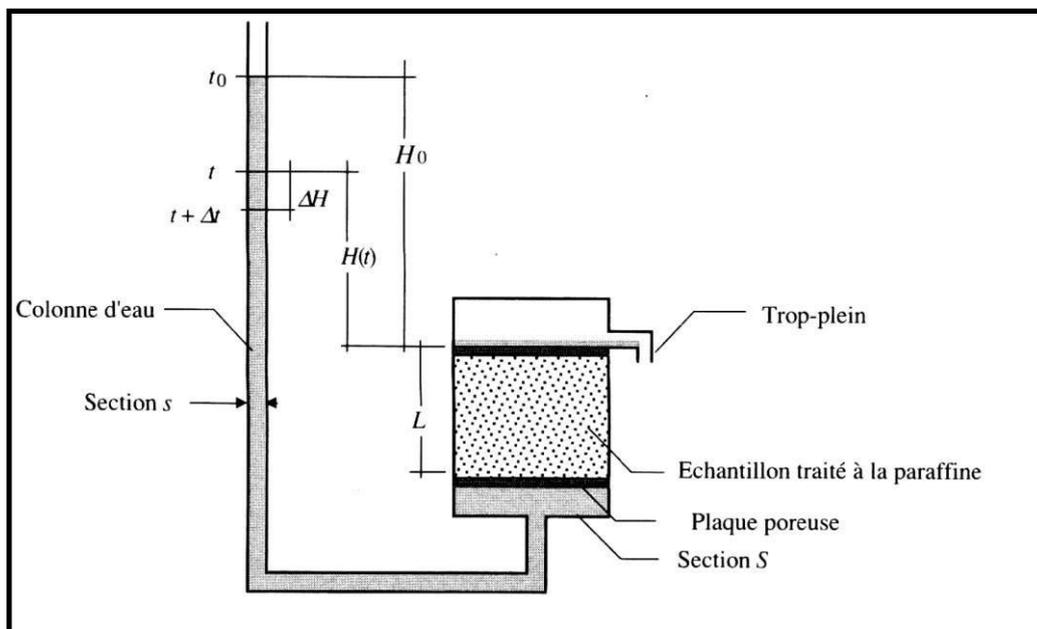


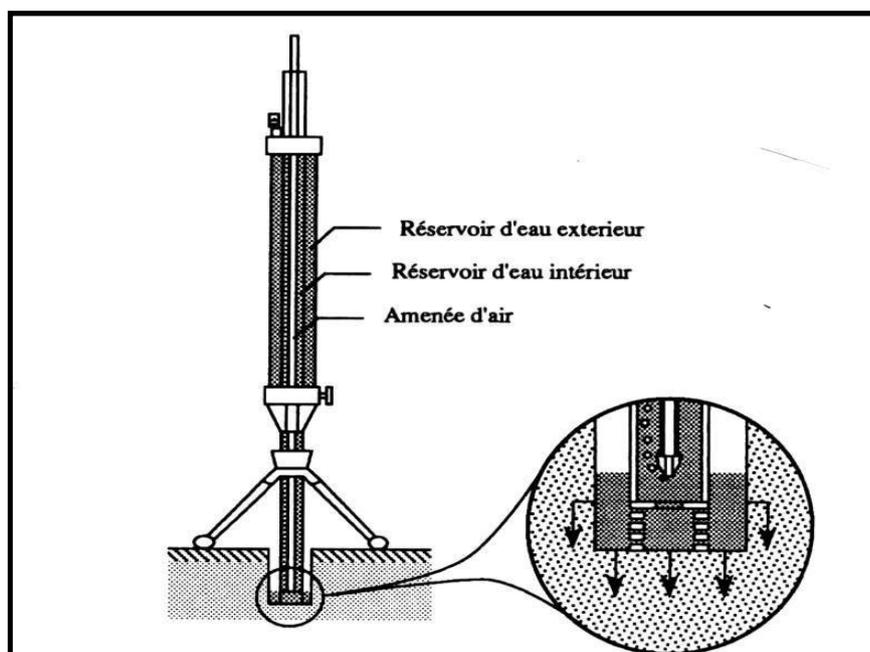
Figure (II.4) : Perméamètre à charge variable

## II.9. Mesure in situ de la perméabilité

Il existe plusieurs appareils de mesure de la conductivité hydraulique des sols in situ parmi les plus utilisés on note le Perméamètre de Guelph, l'infiltromètre de Müntz et le double anneau.

### II.9.1. Le perméamètre de Guelph :

La détermination in situ de la conductivité hydraulique à saturation à l'aide du perméamètre de Guelph repose sur la mesure du débit d'infiltration à charge constante dans un puits cylindrique de dimensions réduites.



Figure(II.5) : Perméamètre de Guelph

L'appareillage est constitué de trois tubes cylindriques concentriques le tube intérieur étant destiné à permettre l'entrée d'air et les tubes extérieurs faisant office de réservoirs d'eau. Selon la taille du réservoir utilisé, on peut mesurer avec précision des débits variés (max  $10^{-4}$  m/s), ce qui étend le champ d'application de cet appareil à une gamme relativement étendue du sol.

La conductivité hydraulique à saturation est déduite des débits mesurés par une méthode de cylindrique. Cette démarche présente l'avantage de supprimer l'hypothèse de l'écoulement vertical.

### II.9.2 Infiltromètre de Müntz :

Il est constitué d'un cylindre enfoncé dans le sol est alimenté en eau par récipient gradué (Fig III.4), disposé de manière qu'il maintienne un niveau constant dans le cylindre. Le débit d'infiltration est mesuré régulièrement par les variations de niveau dans le récipient gradué. Ce type de procédé présente l'avantage de permettre une lecture aisée, et si le récipient d'alimentation est suffisamment grand, de pouvoir s'appliquer à des sols à conductivité hydraulique relativement élevée. La mesure peut également être effectuée par infiltration à charge variable.

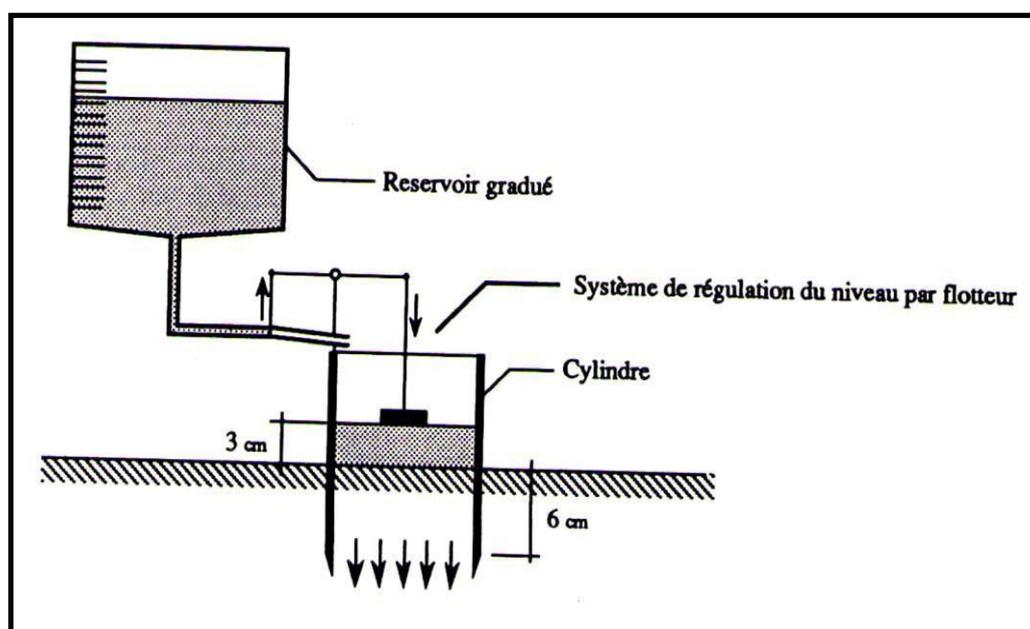


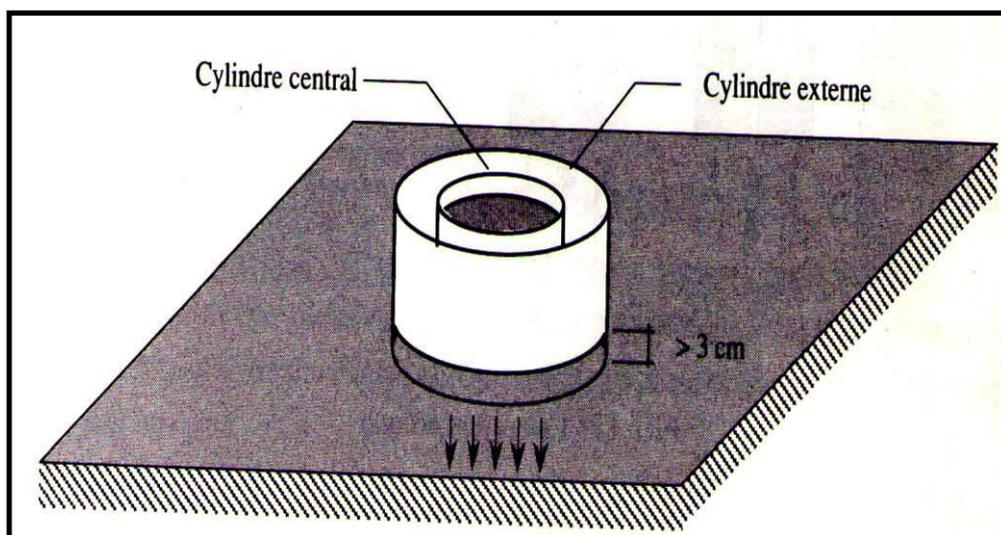
Figure (II.6) : Infiltromètre de Müntz

### II.9.3. Infiltromètre à double cylindre (le double anneau) :

L'infiltromètre à double cylindre est constitué de deux cylindres concentriques fichés dans le sol. La mesure proprement dite à charge variable d'un infiltromètre de Müntz. La présence d'un cylindre externe est destinée à limiter la diffusion latérale de l'eau qui s'infiltré dans le cylindre central et à favoriser ainsi le maintien d'un écoulement vertical.

Après remplissage des deux cylindres, l'infiltration possibilité d'ajouter de l'eau dans le cylindre externe sans influencer la mesure effectuée dans le cylindre central

permet de maintenir un flux vertical suffisant pour empêcher la diffusion latérale de l'écoulement dans la zone centrale.



Figure(II.7) : Infiltromètre à double anneau

# *Chapitre III : Propriétés des sables*

### III.1. Introduction

Le sable provient des modifications et de l'altération naturelle des roches et autres matériaux de la surface terrestre. A cet effet il se distingue par la taille, le type et la nature des minéraux (quartz, calcite, silicate) qui composent ses grains. Il est très utilisé dans différents types de construction ainsi que dans les procédés de filtration des liquides qui contiennent des matières solides en suspension.

### III.2. Classification des sables

La définition et la classification des sables diffèrent d'une science à une autre :

- **En pédologie et en physique du sol**, un sol sableux est caractérisé par un diamètre des particules ( $0,05 \text{ mm} < D < 2 \text{ mm}$ ).
- **En géologie et géographie physique**, on considère comme sable les éléments dont le diamètre : ( $63 \text{ }\mu\text{m}$  ou  $40 \text{ }\mu\text{m}$ )  $< D < 2 \text{ mm}$  réparties comme suit :
  - Sables très grossiers :  $0,5 \text{ mm} < D < 2 \text{ mm}$
  - Sables grossiers :  $0,25 \text{ mm} < D < 0,5 \text{ mm}$
  - Sables moyens :  $0,125 \text{ mm} < D < 25 \text{ mm}$
  - Sables fins (sablons) :  $0,063 \text{ mm}$  (ou  $0,04 \text{ mm}$ )  $< D < 0,125 \text{ mm}$ .

Les particules dont  $D > 2 \text{ mm}$ , sont peuvent être : des blocs, des galets ou des graviers et les particules dont  $D < 0,063 \text{ mm}$  ou  $0,04 \text{ mm}$  ( $63 \text{ }\mu\text{m}$  ou  $40 \text{ }\mu\text{m}$ ) sont considérées comme des limons ou des argiles.

- **En géotechnique et en génie civil**, on utilise souvent le système de classification unifiée des sols (A. S. T. M.).

Le tableau suivant montre les limites inférieures et supérieures du diamètre des grains et les numéros de tamis A. S. T. M. correspondants, pour trois plages de taille de grains de sable : sable grossier, sable moyen et sable fin.

**Tableau (III.1) : Classification unifiée des sols (A.S.T.M.)**

Nom	Diamètre des grains	Numéro A. S. T. M. des tamis
Sable	$2,00 \text{ mm} < D < 4,75 \text{ mm}$	tamis 10 - tamis 4
Sable moyen	$0,465 \text{ mm} < D < 2,00 \text{ mm}$	tamis 40 - tamis 10
Sable fin	$0,0625 \text{ mm} < D < 0,465 \text{ mm}$	tamis 200 - tamis 40

### III.3. Origine et composition du sable

Le sable est issu de la désagrégation et l'altération naturelle des roches et autres matériaux de la surface terrestre, sous l'effet du climat. (Neige, pluie, vent, variations des températures, gel et dégel). Les matériaux fragmentés peuvent ensuite être transportés par l'eau et le vent, parfois jusque dans les océans qui bordent les continents. Des accumulations exploitables (dune de sable) peuvent se former sur le chemin, durant leur long transport vers les océans.

En général, les gros granulats sont constitués de fragments de roches tandis que les sables fins sont plutôt constitués de minéraux détachés de leur roche d'origine.

Les grains de sable peuvent aussi être des débris d'origine organique et même synthétique pour les sables récents.

En plus de fragments de coquillages et les débris d'origine organique on trouve maintenant sur les plages marines actuelles une certaine proportion de débris d'origine synthétique comme le verre, la terre cuite, la porcelaine et certains plastiques.

### III.4. Les minéraux essentiels du sable

Les minéraux les plus abondants dans le sable sont les minéraux qui étaient abondants dans la roche à l'origine de ce sable, accompagné de certains minéraux moins abondants au départ, mais qui se sont concentrés par la suite.

- Le quartz est généralement le premier minéral en abondance dans la composition du sable, notamment l'intérieur des continents.
- La calcite est souvent le premier minéral en abondance dans les sables de plages marines et tropicales, là où abondent les mollusques, coraux et autres producteurs de calcite.
- D'autres minéraux comme c'est le cas pour le grenat (silicate cristallisant) et la magnétite (minérale composée d'oxyde de fer, de magnésium, de nickel, de chrome, de titane, et d'aluminium), à la fois durs et inaltérables, peuvent se concentrer dans le sable, par disparition des minéraux fragiles durant le transport.

### III.5. Les filtres à sable

La filtration est un procédé physique dont l'objectif est de clarifier un liquide qui contient des matières solides en suspension et ce en le faisant passer à travers un milieu poreux (sable). Généralement elle est précédée des traitements de coagulation, de floculation et de décantation. Ce qui permet l'élimination des bactéries, de la couleur, de la turbidité et indirectement dans certains cas le goût et l'odeur.

#### III.5.1. Les différents types de filtres à Sable :

Dans la pratique, Il existe essentiellement quatre types de filtres : les filtres à sable rapides, les filtres à sable lents, les filtres sous pression, les filtres à terre diatomée. Le choix de l'un d'entre eux dépend non seulement des avantages et des inconvénients, mais aussi des conditions locales (disponibilité du gisement de sable en quantité et en qualité).

Il est à noter que plus la filtration est lente, plus le sable est fin (résistance à l'écoulement), plus la couche filtrante est épaisse, meilleure est la coagulation par contact dans les filtres, ce qui constitue un élément de sécurité mais nécessite une surface de filtration plus étendue et un lavage plus fréquent des filtres.

➤ **Les filtres rapides :**

Les filtres à sable rapides sont les plus utilisés dans la pratique. Ils sont souvent à ciel ouvert l'eau traverse la couche de sable par gravité, cependant il existe des filtres fermés en cuve d'acier qui peuvent fonctionner sous pression.

La vitesse normale de filtration est de l'ordre de 4.8 m/h. Elle varie généralement entre 2.4 et 12 m/h. Les faibles vitesses sont plus efficaces mais nécessitent des filtres de grandes dimensions.

➤ **Les filtres à sable lents :**

Ils sont caractérisés par une vitesse de filtration qui varie entre 2 à 5 m/jour, en générale une vitesse de l'ordre de 4 m/j constitue un bon compromis entre l'économie de la construction et celle de l'exploitation.

Ce type de filtres nécessite plus d'espace et doit être couvert pour limiter la croissance des algues, ce qui augmente considérablement le coût de réalisation.

Ils donnent de mauvais résultats lorsque les eaux sont riches en algues et n'ont pas été préalablement traitées.

Ils sont recommandés pour le traitement des eaux de surface relativement claires.

➤ **Les filtres sous pression et les filtres à terre diatomée :**

Ils servent surtout à traiter des eaux de piscine ou ils sont utilisés dans de petites unités de traitement préfabriquées.

Les solides en suspension ainsi retenus par le milieu poreux s'y accumulent en surface et dans la masse filtrante ; il faut donc nettoyer ce type de filtre de façon régulière.

# *Chapitre IV : Résultats et interprétations*

- Les perméabilités et les porosités, obtenus à partir des essais au laboratoire, au moyen d'un perméamètre à charge constante, sur les trois types de sables étudiés (sable de la station, sable de l'oued tamisé et sable de mer) sont représentées ci-dessous :
  - En ce qui concerne la perméabilité, elle établit sous forme de graphiques avec les extrapolations linéaires associées : figure (IV.1), figure (IV.2) et figure (IV.3).
  - Les relations débit -charge hydraulique sont données dans le tableau (IV.1).
  - En ce qui concerne la porosité totale et la porosité de drainage la représentation donnée sous forme de tableaux (tableau IV.2 à IV.7).
  - Les résultats de l'analyse granulométrique par tamisage sont regroupés sur la figure (IV.4) et le tableau (IV.8)
  - Le tableau (IV.9) regroupe les différents résultats obtenus ainsi que les différents paramètres déduits.

### IV.1. Résultats des mesures de la perméabilité

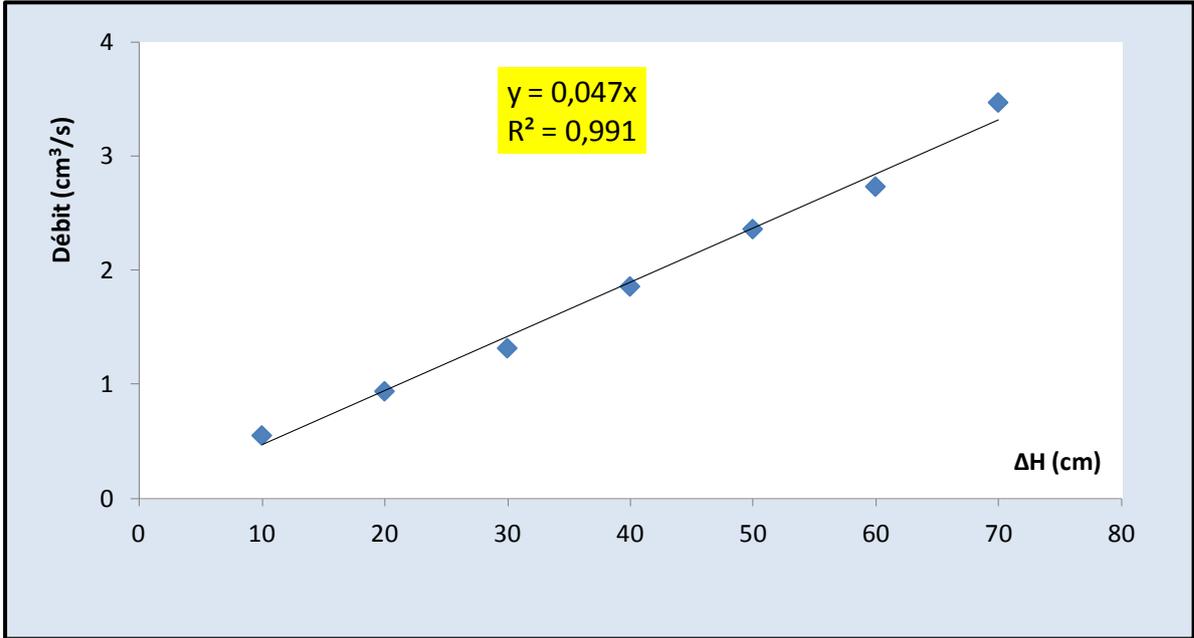


Figure (IV.1) : Relation débit-charge hydraulique (cas du sable de la station de traitement)

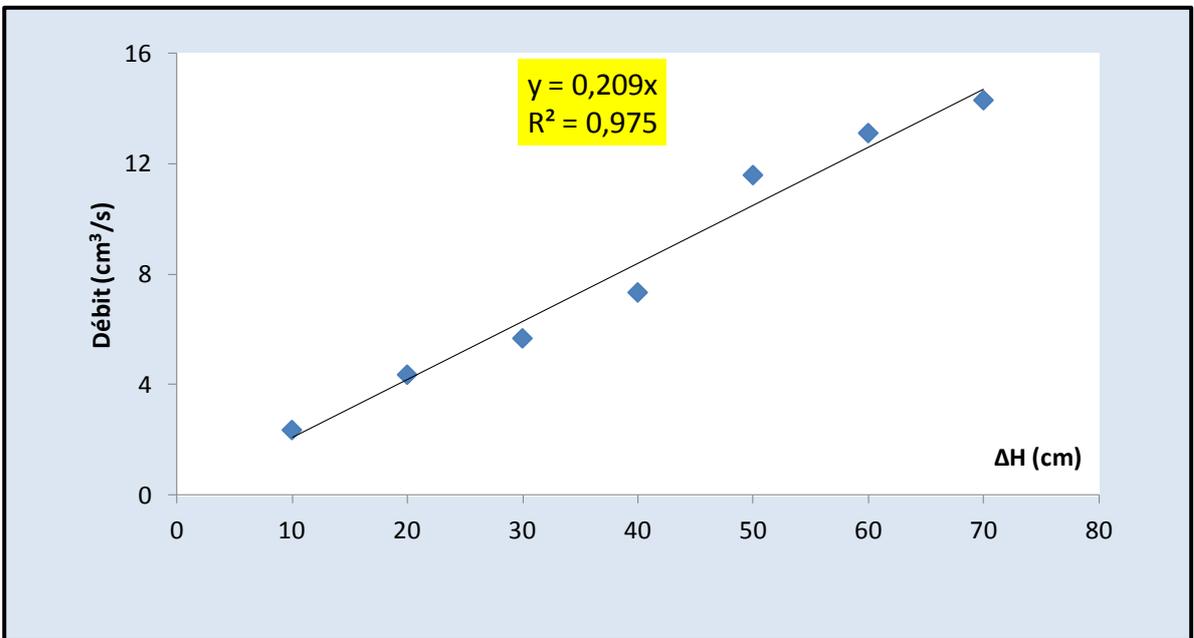
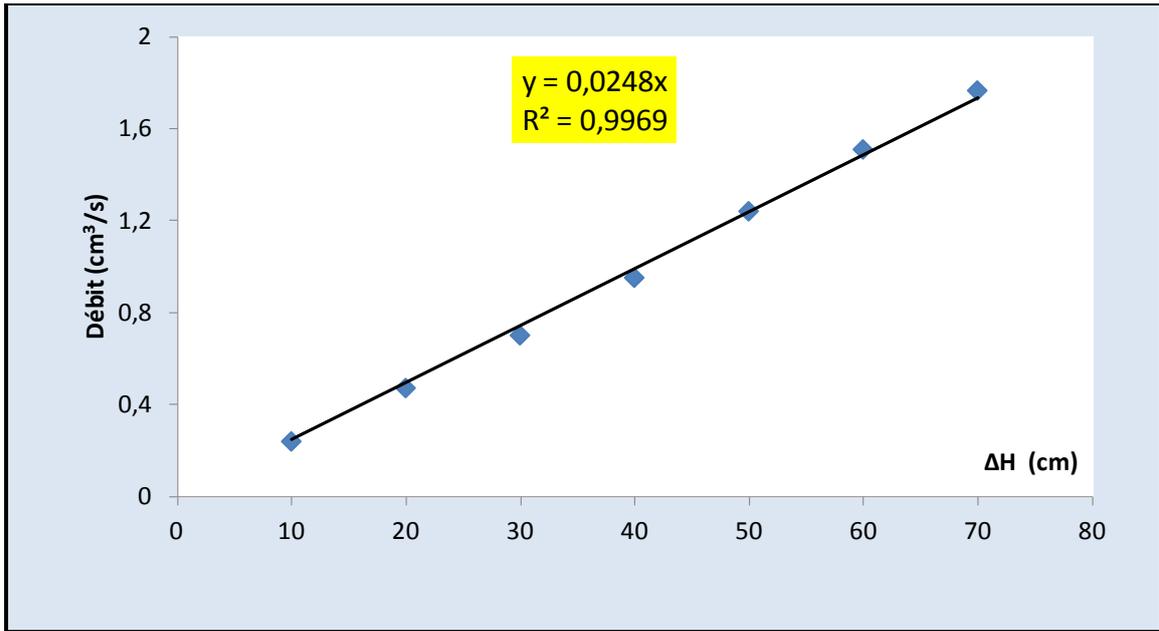


Figure (IV.2) : Relation débit - charge hydraulique (cas du sable de l'Oued)



**Figure (IV.3) :** Relation débit-charge hydraulique (cas du sable de mer)

**Tableau (IV.1) :** Calcul de la perméabilité des trois types de sables par régression linéaire à partir de la relation : débit-charge hydraulique

Type de sable	Relation Débit-Charge	Coefficient de régression ( $R^2$ )	Pente de la droite	Longueur /Section	Perméabilité ( $\text{cm/s}$ )
Station	$Q = 0,047 \times \Delta H$	0,991	0,047	1,77	0,08
Oued (tamisé)	$Q = 0,209 \times \Delta H$	0,975	0,209	1,77	0,37
Mer	$Q = 0,024 \times \Delta H$	0,996	0,024	1,77	0,04

## IV.2. Résultats des mesures des porosités

**Tableau (IV.2) :** Calcul de la porosité totale du sable de la station de traitement

Z (cm)	$\Delta Z$ (cm)	Volume de sable (cm <sup>3</sup> )	Volume des vides = Volume eau (cm <sup>3</sup> )	Porosité totale
$Z_0 = 104,20$				
99,60	4,60	129,90	50,00	0,38
95,60	4,00	112,96	50,00	0,44
90,10	5,50	155,32	50,00	0,32
87,00	3,10	87,54	50,00	0,57
			<b>Moyenne</b>	<b>0,43 (43 %)</b>

**Tableau (IV.3) :** Calcul de la porosité de drainage du sable de la station de traitement

Z (cm)	$\Delta Z$ (cm)	Volume de sable (cm <sup>3</sup> )	Volume d'eau gravitaire	Porosité de drainage
$Z_0 = 28,30$				
36,20	7,90	223,25	30,00	0,13
37,20	1,00	28,26	10,00	0,35
38,10	0,90	25,43	10,00	0,39
39,80	1,70	48,04	20,00	0,42
43,40	3,60	101,74	30,00	0,29
46,20	2,80	79,13	20,00	0,25
			<b>Moyenne</b>	<b>0,31 (31 %)</b>

**Tableau (IV.4) :** Calcul de la porosité totale du sable de l'Oued tamisé

Z (cm)	$\Delta Z$ (cm)	volume sable (cm <sup>3</sup> )	Volume des vides = Volume eau (cm <sup>3</sup> )	Porosité totale
$Z_0 = 47,50$				
41,90	5,60	158,256	50,00	0,32
38,70	3,20	90,432	50,00	0,55
34,70	4,00	113,04	50,00	0,44
31,50	3,20	90,432	50,00	0,55
<b>Moyenne</b>				<b>0,47 (47 %)</b>

**Tableau (IV.5) :** Calcul de la porosité de drainage du sable de l'Oued tamisé

Z (cm)	$\Delta Z$ (cm)	Volume de sable (cm <sup>3</sup> )	Volume d'eau gravitaire	Porosité de drainage
$Z_0 = 27,00$				
31,90	4,90	138,47	20,00	0,14
34,30	2,40	67,82	20,00	0,29
35,70	1,40	39,56	20,00	0,51
37,40	1,70	48,04	20,00	0,42
39,10	1,70	48,04	20,00	0,42
48,10	9,00	254,34	100,00	0,39
<b>Moyenne</b>				<b>0,36 (36 %)</b>

**Tableau (IV.6) :** Calcul de la porosité totale du sable de mer

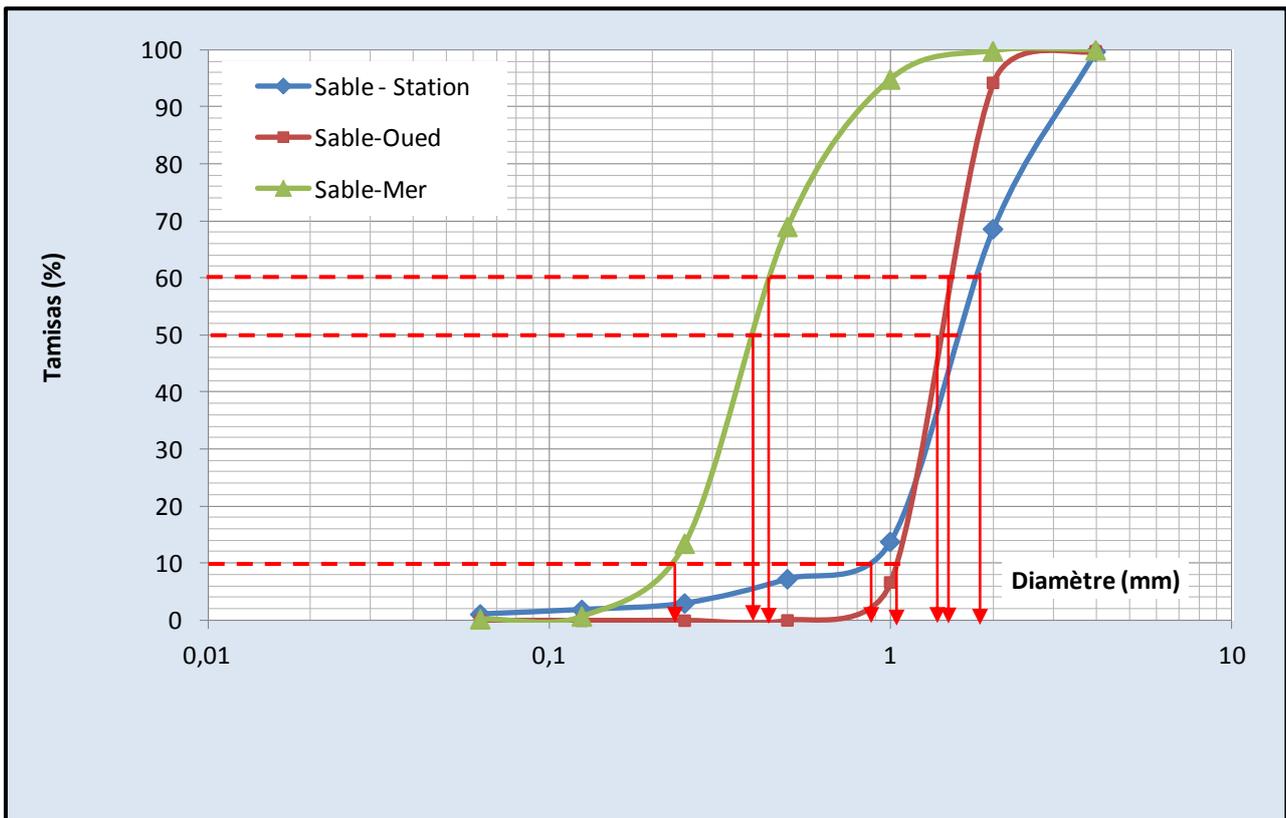
Z (cm)	$\Delta Z$ (cm)	volume sable (cm <sup>3</sup> )	Volume des vides = Volume eau (cm <sup>3</sup> )	Porosité totale
$Z_0 = 50,00$				
42,00	8,00	226,080	100,00	0,44
32,90	9,10	257,166	100,00	0,39
18,10	14,80	418.245	100,00	0,24
			<b>Moyenne</b>	<b>0,36 (36 %)</b>

**Tableau (IV.7) :** Calcul de la porosité de drainage du sable de mer

Z (cm)	$\Delta Z$ (cm)	Volume de sable (cm <sup>3</sup> )	Volume d'eau gravitaire	Porosité de drainage
$Z_0 = 20,00$				
32,75	12,75	360,32	20,00	
37,00	4,25	120,11	20,00	0,17
39,40	2,40	67,82	20,00	0,29
42,30	2,90	81,95	20,00	0,24
45,00	2,70	76,30	20,00	0,26
47,20	2,20	62,17	20,00	0,32
			<b>Moyenne</b>	<b>0,26 (26 %)</b>

### IV.3. Résultats de l'analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est effectuée sur une série de tamis de diamètre : 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm, 0,125 mm et 0,063 mm. Ce qui a permis de tracer les courbes granulométriques pour les trois sables étudiés représentés sur la figure (IV.4) ci-dessous :



**Figure (IV.4) :** Courbes granulométriques des sables de la station, de l'oued et de mer

L'analyse des courbes granulométriques, figure (IV.4), a permis de déduire les différents paramètres caractéristiques de chacun des sables étudiés. Ces paramètres sont regroupés dans le tableau (IV.8) suivant :

**Tableau (IV.8) :** Résultats de l'analyse granulométrique

Types de sable	Station de traitement	Oued tamisé	Mer
$d_{10}$	0,90	1,10	0,24
$d_{50}$	1,65	1,45	0,4
$d_{60}$	1,85	1,65	0,45
$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$	2,05	1,14	1,875
Granulométrie	variée	uniforme	uniforme

#### IV.4. interprétation des résultats

Les différents résultats obtenus sont regroupés dans le tableau (IV.9) suivant :

**Tableau (IV.9) :** Tableau récapitulatif des différents paramètres caractéristiques calculés

	Type de sable	Station de traitement	Oued tamisé	Mer
Paramètres caractéristiques	$d_{10}$	0,90	1,10	0,24
	$d_{50}$	1,65	1,45	0,40
	$d_{60}$	1,85	1,65	0,45
	$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$	2,10	1,50	1,90
	Granulométrie	variée	uniforme	uniforme
	Perméabilité K (cm/s)	0,08	0,37	0,04

Porosité totale	0,38	0,47	0,36
Porosité de drainage	0,31	0,36	0,26
Coefficient de Hazen : $C_H = \frac{k}{(d_{10})^2} \text{ (ms}^{-1}\text{/mm}^2\text{)}$	0,0010	0,0031	0,0069

Selon les résultats regroupés dans le tableau ci-dessus on constate que :

- La perméabilité est proportionnelle à  $d_{10}$ , à la porosité totale et à la porosité de drainage, cependant elle ne présente pas de proportionnalité par rapport à d'autres paramètres ;
- La perméabilité du sable de l'oued tamisé est de 4 fois et de 9 fois plus élevée par rapport à celles du sable de la station et du sable de mer, respectivement ;
- La perméabilité des trois sables :  $K \geq 10^{-5}$  m/s, d'où la possibilité de l'application de la relation de Hazen  $K = C_H \times (d_{10})^2$ , on obtient ainsi :
  - ❖  $K = 0.001 (d_{10})^2$  pour le sable de la station
  - ❖  $K = 0.0031 (d_{10})^2$  pour le sable de l'oued tamisé
  - ❖  $K = 0.0069 (d_{10})^2$  pour le sable de mer

Les figures (IV.1), (IV.2) et (IV.3) montrent bien que, les extrapolations linéaires effectuées sur les mesures du débit en fonction du gradient hydraulique, sont bien ajustées aux points de mesure, avec des coefficients de corrélation  $R^2 \geq 0,97$ .

*Conclusion*  
*générale*

## Conclusion générale

L'analyse granulométrique par tamisage a montrée, que sur les trois sables analysés, seul le sable de la station de traitement qui possède une granulométrie variée ( $Cu > 2$ ), les deux autres ont une granulométrie uniforme ( $Cu < 2$ ).

Les essais au laboratoire conduit au moyen d'un perméamètre à charge constant ont permis de mesurer avec précisions la conductivité hydraulique à saturation, et ce, pour les trois types de sables étudiés, comme le montre si bien les coefficients de corrélation très proche de 1, établis à partir de 7 points de mesures. Ce qui a permis d'estimer également la porosité totale et de drainage, avec une moyenne de 3 mesures pour la première et 4 à 5 mesures pour la seconde.

La comparaison entre l'analyse granulométrique et les mesures au moyen de perméamètre montre que :

- La perméabilité est proportionnelle à  $d_{10}$ , à la porosité totale et à la porosité de drainage, cependant elle ne présente pas de proportionnalité par rapport à d'autres paramètres.
- La perméabilité du sable de l'oued tamisé est de 4 fois et de 9 fois plus élevée par rapport à celles du sable de la station et du sable de mer, respectivement.

On a constaté que la perméabilité des trois sables :  $K \geq 10^{-5}$  m/s, ce qui offre la possibilité d'appliquer la relation de Hazen pour chacun de ces sables.

Il est a noté que l'usage des sables comme système de filtration des eaux (filtre à sable) obéit à plusieurs exigences techniques et économiques. Cela dépend notamment de la nature et du type des matières en suspension dans l'eau à traiter, du coût de réalisation des infrastructures et des bassins de filtration et de la disponibilité de l'espace pour leurs emplacements.

Généralement ce procédé est insuffisant, à lui seul, pour un traitement efficace des eaux très chargées, cas des eaux usées. À cet effet, il nécessite au préalable des traitements de coagulation, de floculation et de décantation.

L'établissement des caractéristiques physiques et hydrodynamiques des sables est très intéressant, cependant, il nécessite d'être complété par une analyse physico-chimique pour pouvoir analyser leurs réactions aux différents éléments qui peuvent être acheminés, par les eaux à filtrer.

## Références bibliographiques

1. ANCTIL F, LAUZON N et ROUSSELLE J. 2005. Hydrologie : cheminements de l'eau. Québec : Presses internationales polytechnique.
2. ATTAB Sarah. 2011 « Amélioration de la qualité microbiologique des eaux épurées par boues activées de la station d'épuration Haoud Berkaoui par l'utilisation d'un filtre à sable local ». Mémoire de magister : Microbiologie appliquée : Université Kasdi Merbah-Ouargla.
3. BEZZIOU Assia et MEKKAOUI Rima. 2013 « Essai de traitement biologique des eaux usées en utilisant des filtres bicouches ». Mémoire de master académique : Science de l'environnement : Université Kasdi Merbah Ouargla.
4. BIR M Said. 2012 «Ecoulements au travers les milieux poreux : Approche stochastique ». Mémoire de magistère : géotechnique et environnement : l'Université de Mouloud Mammeri TIZI OUZOU.
5. CHOSSAT J-C. 2005. La mesure de la conductivité hydraulique dans les sols. TEC &DOC éd. Paris : *Hermès – Lavoisier*.
6. CHRETIEN J et PEDRO G. 1987. *Granulométrie, porosité et spectre poral de sols développés sur formations détritiques, Cas des terrasses alluviales de la Saône. Cahiers. ORSTOM, série. Pédol, vol. XXIII, N° 1, pp 43-54*
7. CASTANY G. 1961. Méthodes d'études des nappes aquifères. AISH/IAHS publication n°56, 55-67.
8. CASTANY G, MARGAT J.1977. Dictionnaire français d'hydrogéologie. Éd BRGM. *Orléans : service géologique national*.
9. CASTANY G. 1982. Hydrogéologie, principes et méthodes. Paris : DUNOD.
10. CAUCHI A et VIGNOLES CH. 2011. Petites installations d'assainissement. Ed Technip. Paris : VEOLIA EAU.
11. DELACHE Alexandre. 2005. Etude analytique et numérique des installations spatio-temporelles des écoulements de convection mixte en milieu poreux : comparaison avec expérience. Thèse de doctorat : Mécanique : Université de Lille 1.
12. DISJARDINS R. 1997. Le Traitement des eaux. 2<sup>ème</sup> éd. Québec : Ecole de polytechnique de Montréal.
13. DEVALLOIS Valérie. 2009 « Transferts et mobilité des éléments traces métalliques dans la colonne sédimentaire des hydro-systèmes continentaux ». Thèse de doctorat : Sciences de l'Environnement : l'Université de Provence.

14. FEKHART Karim. 2012 « Simulation numérique du phénomène d'infiltration dans un milieu poreux ». Mémoire de magister : Génie civil : l'Université de Mouloud Mammeri TIZI OUZOU.
15. GILLI E, MANGAN C et MUDRY J. 2004. Hydrogéologie, Objets, méthodes, applications. Paris : DUNOD.
16. HAMZA Ali. 2007 « Simulation numérique des écoulements transitoires en milieux poreux saturés et non saturés ». Thèse de doctorat : Génie civil : l'Université de Mouloud Mammeri TIZI OUZOU.
17. KAZI TANI H.A, BOUANANI A et BABA-HAMED K. 2002. *Etude du transfert des particules solides dans les eaux souterraines. Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, N°22, June 2015, pp. 49-57
18. KAZI TANI HYCHEM ABDESSLEM. 2011 « Etude du transport en suspension dans un milieu poreux au laboratoire ». Mémoire de Magister en Hydraulique : Ecoulement et Transport Solide : Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen.
19. MAIGA Amadou H et SAMA Matowa B. *Filtration lente sur sable : épuration physico-chimique et décontamination bactériologique*. Ecole Inter-états d'Ingénieurs de l'Équipement Rural (E.I.E.R.), pp 25-36
20. MERMOUD A. 2006. Cours de physique du sol, propriétés de base du sol et de la phase liquide. Suisse : école polytechnique fédérales de Lausanne.
21. METREVETI V. Hydrogéologie et phénomène de transport. 1, place centrale de Ben Aknoun Alger : office des publications universitaires.
22. MUSY A et SOUTTER M. 1991. Physique du sol. 1<sup>ère</sup> éd. Suisse : Benteli AG.
23. PARRIAUX A. 2009. Géologie, Bases pour l'ingénieur. 2<sup>ème</sup> éd. Suisse : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
24. ROBERT D, HOLTZ, WILLIAM D ET KOVACS. 1991. Introduction à la géotechnique. Montréal : Presses inter Polytechnique de Montréal.
25. SAOULI Ouacil. « Simulation du transport de solutés réactifs en milieux poreux hétérogènes ». Thèse de doctorat : Génie des Procédés : Université Mentouri Constantine.
26. TAIET R, VILLAIN L et FEBVRE P. 2009. Dictionnaire de physique. 2<sup>ème</sup> éd. Bruxelles : Boeck université.