

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou
Faculté du génie de la construction
Laboratoire de recherche géomatériaux, Environnement et
Aménagement



Mémoire

En vue d'obtention du diplôme Master en génie civil

Option : géotechnique et environnement

Thème

ETUDE EXPÉRIMENTALE ET ANALYTIQUE DE LA PERMÉABILITÉ DES SABLES STRATIFIÉS

Réalisé par :

 **M^{elle} KASMI Rezika**

Encadre par :

Mr HAMZA ALI

Promotion : 2015

Remerciements

J'exprime en premier lieu mes gratitudes à la compassion du dieu, qui me donne la volonté, la patience et le courage pour réaliser ce travail.

Je remercie infiniment l'ensemble des personnes citées ci-dessous

- Mon promoteur M. HAMZA Ali pour avoir bien voulu accepter de m'encadrer et pour ses orientations.

- Les gens du laboratoire de recherche géomatériaux, Environnement et Aménagement (L.G.E.A) du département Génie Civil de l'université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou M. LACHEBI Kamel et M. LASHEB Missibsa pour leur disponibilité, leur gentillesse et leurs exhortations.

- M^{me} MOBAREK pour son aide et ses orientations.

- M. BOUDLAL Omar pour avoir mis à ma disposition une documentation riche.

- Les gens de laboratoire L.H.C.C de Tizi-Ouzou pour leurs conseils et leurs orientations.

Je remercie les honorables membres du jury qui m'ont fait l'honneur de corriger et juger mon travail.

- Mon très cher frère Fateh

- Mes amis: Mehenna, Hafidha, Khaled,sonia et Nassima pour leur soutien et leurs encouragements

- Mes collègues de promotion

A tous qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

DEDICACE

Pour que ma réussite soit complète, je la partage avec toutes les
Personnes que j'aime.

Je dédie ce modeste travail à:

A ma très chère grande mère;

A mes très chers parents;

A la mémoire de mon oncle: khial Said;

A mes frère: Amar, Slimane, Kamal, Fateh;

A mes sœurs: Naïma, Ratiba, Nassira;

A mes oncles et mes tentes;

A mes cousin (es) ;

A tous mes amis (es);

Et à tous ceux qui m'ont donnés de l'aide et de soutien durant
mon travail ;

A tous ceux qui m'aiment; et tous ceux que J'aime.



SOMMAIRE :

LISTE DES NOTATIONS ET INDICES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

ANNEXES

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I : Généralités sur le sol

1-Introduction	3
2- Paramètres de définition des sols	4
2.1- Modèle élémentaire d'un sol	4
2.2- Les poids volumiques.....	4
2.3- Les paramètres d'état.....	5
3- Identification des sols.....	6
3.1- La masse volumique et particules solide γ_s	6
3.2-Les essais granulométriques	6
3.3- Essais sur des sols pulvérulents	7
3.4- Essais sur les sols fins	8
3.5- Classification des sols	12
3.5.1-Classification des sols non organiques ($M_o < 3\%$)	12
3.5.2- Classification des sols organiques ($M_o > 3\%$)	13
4- Les Sables	14
4.1- Origine des sables	14
4.2- Composition du sable	15
4.3- Minéraux du sable	15
4.4- Caractéristiques physiques des sables	15
4.5- Utilisation et économie	16
4.5.1- Agriculture	16

4.5.2- La géotechnique	16
4.5.3- Autres domaines	17
4.5.4- Economie	17
5- L'eau dans le sol	18
5.1- L'eau de constitution	18
5.2- L'eau liée ou absorbée	18
5.3- L'eau libre	19
5.4- L'eau capillaire	19
6- L'eau dans la nature	19
7- Infiltration et écoulement de l'eau dans le sol	19
7.1- L'infiltration	20
7.2- L'écoulement.....	21
7.2.1- L'écoulement de surface	21
7.2.2- L'écoulement de subsurface	22
7.2.3- L'écoulement souterrain	22
7.2.4- Ecoulement dû à la fonte de neige	23
8- Conclusion	23

CHAPITRE II : Généralités sur la perméabilité

1- Introduction	24
2 -Définition	24
3- Considérations générales sur la perméabilité des sols grenus	24
4 -Validité de la loi de Darcy	26
5- Facteurs affectant la perméabilité	29
5.1- Influence de la taille des particules	29
5.2- Influence de la distribution granulométrique	30
5.3 -Influence de la forme	31

5.4- Influence de la structure de sable	33
5.5- Influence de composition	33
5.6- Influence de degré de saturation	33
5.7- Influence de l'état de surface	34
5.8- Influence de la teneur en eau	35
6- Formules utilisées pour le calcul de la perméabilité	36
6.1- Formule de Kozeny et Carman	36
6.2- Formule de Cazenove	37
6.3- Formule de Hazen	37
6.4- Formule d'Awad et Amer	37
7- Conclusion	38

CHAPITRE III : Les essais de perméabilité

1- Essais in situ	39
1.1-Essais de pompage	39
1.1.1- Domaine d'application	39
1.1.2- Principe de l'essai	39
1.2- Essai lefranc	40
1.2.1-Application	40
1.2.2- Avantage	42
1.2.3- Limitations	42
1.2.4- Précautions d'emploi	43
1.3- Essai lugeon	44
1.3.1- Application.....	44
1.3.2 -Avantage	46
1.3.3- Limitations	46
1.4- Essai porchet: (test de percolation)	47

1.5- Slug- test	49
1.6- Pulse-test	50
2- Essais au laboratoire	51
2.1- Objectif	51
2.2 - Méthode de mesures	51
3- Formules empiriques utilisées pour le calcul de la perméabilité des sols	54
4- Conclusion	55

CHAPITRE IV : matériaux de l'étude et leur identification

1- Introduction	56
2- Description des sables choisis	56
3 -Origine de prélèvement des échantillons de l'étude	57
4-Identification des matériaux d'étude	57
4.1- Analyse granulométrique	57
4.1.1- Traçage de la courbe granulométrique	59
4.2- La masse volumique apparente.....	60
4.3- La densité	61
4.4- La porosité	62
4.5 - Indice des vides.....	63
4.6 - Degré de saturation.....	63
4.7 - Propreté (équivalent de sable)	64
4.7.1 - Principe de l'essai	64
4.7.2- Appareillage	64
5 - Conclusion	66

CHAPITRE V : étude expérimentale et analytique de la perméabilité

1 – Introduction	67
2 - L'essai de perméabilité a charge constante	67
3 - Les étapes de déroulement des essais.....	67
4 - Description de l'appareil	68
5 - But de l'essai	70
6 -Matériel utilise	70
7 -Mode opératoire	70
8 -Présentation des résultats	70
8.1- Couche unique	73
8.1.1- Essais sans compactage	73
8.1.2- Essais avec compactage	74
8.2 - Sables stratifiés	76
8.2.1- Stratification verticale	76
8.2.1.1-Essais sans compactage	76
8.2.1.2- Essais avec compactage.....	77
8.2.2- Sable mélangé	79
8.2.2.1- Essai sans compactage	79
8.2.2.2- Essai avec compactage	79
8.2.3 - Stratification horizontale	80
8.2.3.1- Essai sans compactage	80
8.2.3.2- Essais avec compactage	81
9-Interprétation des résultats	82
10- Etude analytique de la perméabilité des sols stratifiés	83

11- Comparaison entre l'étude analytique et les résultats expérimentaux	87
12- Conclusion	92
CONCLUSION GENERALE	93

LISTES DES NOTATIONS ET INDICES :

V_a : volume de l'air.

V_w : volume de l'eau

V_s : volume des grains solides

V_v : volume des vides

V : volume total du sol

W_w : poids de l'eau

W_s : poids des grains solides

W : poids total

γ : Le poids volumique (spécifique) total ou humide

γ_s : Le poids volumique des grains solides

γ_d : Le poids volumique du sol sec

γ_w : Le poids volumique de l'eau

γ_{sat} : Poids volumique du sol saturé

γ' : Poids volumique déjaugé

G_s : La gravité spécifique

$W\%$: La teneur en eau

e : L'indice des vides

S_r : Le degré de saturation

η : La porosité

C_u : Le coefficient d'uniformité de Hazen

C_c : Le coefficient de courbure

D_{10}, D_{30}, D_{60} : diamètres efficaces des tamis laissant passer respectivement 10%, 30%, 60%

I_D : Indice de densité

e : Indice des vides du sol en place

e_{max} : Indice des vides du sol à l'état le plus lâche

e_{min} : Indice des vides du sol à l'état le plus dense

I_p : I de plasticité

I_c : Indice de consistance

IL : Indice de liquidité

ρ : Masse volumique apparente

ESP : Equivalent de sable

Δh : Perte de charge

K_i : Coefficient de perméabilité entre deux point de l'appareil

K_h : Coefficient de perméabilité horizontale

K_v : Coefficient de perméabilité verticale

l : Longueur de l'échantillon

A : Section de l'échantillon

t : Temps d'écoulement d'eau traversant l'échantillon

Q : Débit d'écoulement mesuré a la sortie

q : Débit par unité de temps

D_a : Densité apparente

LISTE DES TABLEAUX :

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE SOL

Tableau I.1 : Caractérisation des sols à partir de la valeur de E.S	7
Tableau I.2 : Compacité d'un sol en fonction de l'indice de densité	8
Tableau I.3 : Familles d'argile et leurs caractéristiques	9
Tableau I-4 : Type de sol en fonction de I_p	10
Tableau I-5 : Etat de consistance du sol en fonction de I_c	10
Tableau 1.6 : Etat de consistance du sol en fonction de « IL »	10
Tableau I-7 : Type de sol en fonction de la valeur «VBS »	11
Tableau I-8 : Type de sol en fonction du % en $CaCO_3$	11
Tableau I-9 : Type de sol en fonction du % en MO.....	12
Tableau I-10 : Classification des sols grenus (plus de 50% des éléments > 80 μ m)	14

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LA PERMEABILITE

Tableau II-1 : variation de la perméabilité en fonction de la forme	33
--	----

CHAPITRE IV : MATERIAUX DE L'ETUDE ET LEUR IDENTIFICATION

Tableau IV-1 : Analyse granulométrique du sable S 0/5	58
Tableau IV-2 : Analyse granulométrique du sable S 0/2	58
Tableau IV-3 : Analyse granulométrique du sable S 0/1	59
Tableau IV-4 : coefficients C_u et C_c	60
Tableau IV-5 : masses volumiques des sables.....	61
Tableau IV-6 : densité apparente des sables	61
Tableau IV-7 : la porosité des sables	63
Tableau IV-8 : indice des vides des sables	63
Tableau IV-9 : résultats de l'essai de l'équivalent de sable	65
Tableau IV-10 : valeurs de ESP	65

CHAPITRE V : ETUDE EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE DE LA PERMEABILITE

Tableau V-1 : Essais de perméabilité sur sable fin non compacté.....	73
Tableau V-2 : Essais de perméabilité sur sable moyen.....	73
Tableau V-3 : Essais de perméabilité sur sable grossier.....	74
Tableau VI-4 : Essais de perméabilité sur sable fin compacté.....	74
Tableau V-5 : Essais de perméabilité sur sable moyen compacté.....	75
Tableau V-6 : Essais de perméabilité sur sable grossier compacté.....	75
Tableau V-7 : Essais de perméabilité sur sable stratifié (fin-moyen-gros).....	76
Tableau VI-8 : Essais de perméabilité sur sable stratifié (moyen-fin-gros).....	76
Tableau V-9 : Essais de perméabilité sur sable stratifié (grossier-moyen-fin).....	77
Tableau V-10 : Essais de perméabilité sur sable stratifié compacté (fin-moyen-grossier)....	77
Tableau V-11 : Essais de perméabilité sur sable stratifié compacté (moyen-fin-grossier)....	78
Tableau V-12 : Essais de perméabilité sur sable stratifié compacté (grossier-moyen-fin)....	78
Tableau V-13 : essais de perméabilité sur sable mélangé.....	79
Tableau V-14 : Essais de perméabilité sur sable mélangé compacté.....	79
Tableau V-15 : Essais de perméabilité sur sable stratifié horizontalement (fin-grossier).....	80
Tableau V-16 : Essais de perméabilité sur sable stratifié horizontalement (moyen-grossier)	80
Tableau V-17 : Essais de perméabilité sur sable stratifié horizontalement (fin-moyen).....	80
Tableau V-18 : Essais de perméabilité sur sable stratifié horizontalement (fin-grossier).....	81
Tableau V-19 : Essais de perméabilité sur sable stratifié horizontalement (moyen-grossier).	81
Tableau V-20 : Essais de perméabilité sur sable stratifié horizontalement (fin-moyen).....	81
Tableau V.21 : Coefficients moyens de perméabilité entre les points 1 et 3	87

LISTE DES FIGURES :

Figure I-1 : Modèle d'un sol.....	4
Figure I-2 : Classification des sols fins (Diagramme de plasticité)	13
Figure I-3 : Différents états de l'eau dans le sol	18
Figure II-1 : Principe de perméamètre 25	
Figure II-2 : (a) et (b) Gradient seuil apparent et déviation de linéarité (Miller et low, 1963)	28
Figure II-3: Influence de la taille des particules du mélange sur les valeurs de la porosité d'après GUERIN (2004)	30
Figure II-4: Evolution de la densité de l'empilement de particules sèches en fonction de la Déviation standard géométrique (GUERIN, 2004)	31
Figure II-5 : Evolution de la porosité en fonction de la sphéricité pour différentes formes de Particules (GUERIN, 2004)	32
Figure II-6 : la perméabilité en fonction de degré de saturation pour un sable (OLSON et DANIEL, 1979)	34
Figure II-7 : Evolution de la porosité en fonction de la teneur en eau pour un sable (FENG et YU, 1998)	36
Figure III-1 : Réalisation d'une cavité pour un essai d'eau Lefranc	44
Figure III-2 : perméamètre à charge constante	52
Figure III-3: Perméamètre à charge variable	53
Figure III-4: caractéristique de la perméabilité et de drainage des sols (Terzaghi et al, 1996)	54
Figure IV-1 : courbe d'analyse granulométrique	59
Figure IV-2 : Essais de porosité	62
Figure IV-3 : appareil de l'équivalent de sable	64
Figure IV-4 : essai de l'équivalent de sable	65
Figure V-1 : Variation de la porosité en fonction de la densité apparente.....	69
Figure V-2 : Coefficients de perméabilité en fonction des densités apparentes des sables non compactés.....	71

Figure V-3 : Coefficients de perméabilité en fonction des densités apparentes des sables

non compactés.....71

Figure V-4 : Coefficients de perméabilité en fonction des densités apparentes des sables

Compactés.....72

Figure V-5 : Ecoulement parallèle et perpendiculaire à la stratification.....87

Figure V-6 : coefficient de perméabilité en fonction de la stratification verticale des sables

non compactés.....89

Figure V-7: coefficient de perméabilité en fonction de la stratification verticale des sables

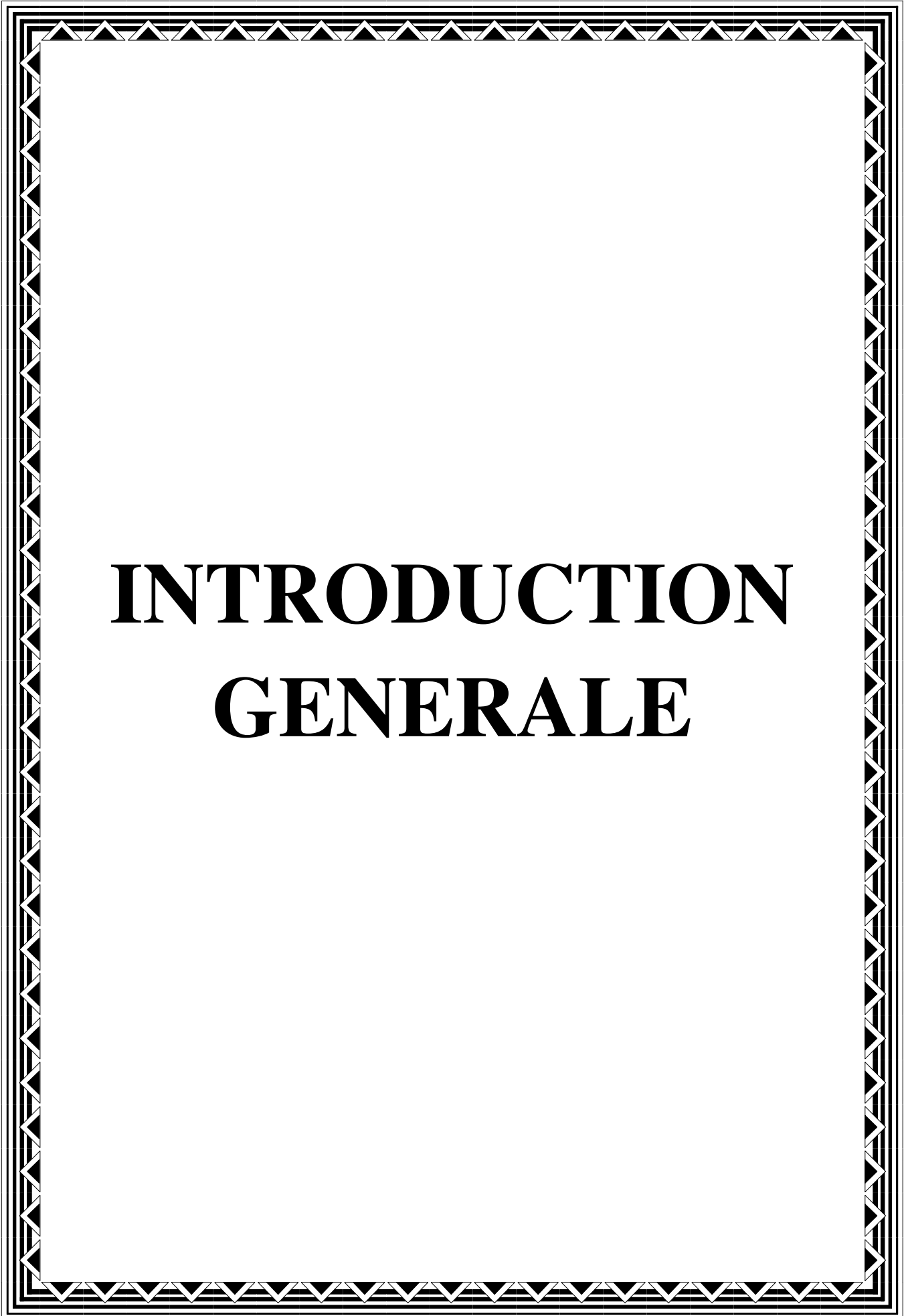
Compactés.....89

Figure V-8: coefficient de perméabilité en fonction de la stratification horizontale des sables

non compactés.....90

Figure V-9: coefficient de perméabilité en fonction de la stratification horizontale des sables

Compactés.....90



INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE :

Dans la conception des projets géotechniques, l'une des propriétés la plus importante d'intérêt pour l'ingénieur du sol est la perméabilité. À un certain degré, la perméabilité jouera un rôle dans la conception de presque n'importe quelle structure. Par exemple, la longévité de béton est liée à sa perméabilité. Dans les conceptions qui se servent des matériaux de terre, la perméabilité de ces matériaux sera habituellement d'une grande importance.

Pour illustrer l'importance de la perméabilité dans la conception géotechnique, on considère les applications suivantes où la connaissance de la perméabilité est exigée :

- La perméabilité influence le taux de règlement d'un sol saturé chargé.
- Le débit aux puits d'une couche aquifère dépend de la perméabilité.
- La conception des barrages est tout d'abord basée sur la perméabilité du terrain.
- L'exécution des recouvrements de remblai est basée sur leur perméabilité.
- La stabilité des pentes et des structures de retenue peut être considérablement affectée par la perméabilité des sols impliqués.
- La conception des filtres conçus pour empêcher l'érosion est basée suivant leurs perméabilités.

Les mesures in situ ou en laboratoire pour la détermination des propriétés hydrauliques sont longues et chères, et comportent de nombreuses incertitudes au regard de la validité et de l'interprétation des données. De plus la perméabilité présente une variabilité dans l'espace et dans le temps, ce qui rend très délicat l'interprétation des résultats de mesure.

Dans ce travail de recherche, nous explorons la possibilité de mettre en relation la perméabilité et les autres propriétés des sols facilement mesurable qui sont aussi fonction de la structure interne de milieu poreux tel que la porosité et la taille des grains.

Ce travail comporte deux grandes parties, la première est consacrée à une étude bibliographique dans laquelle on définit la perméabilité, les paramètres qui l'affectent, les méthodes et les essais utilisés pour la déterminer au laboratoire ou sur site, les modèles prédictifs utilisés jusqu'à maintenant.

La seconde partie, expérimentale a été consacrée à l'identification des matériaux utilisés à savoir : le sable fin, le sable moyen et le sable grossier, à la détermination de la perméabilité avec le perméamètre à charge constante et à comparer l'évolution de la perméabilité de ces trois matériaux aux différents essais effectués. Ce qui nous a permis de mettre en évidence l'influence de la taille des grains d'un sol sur sa perméabilité.

Chapitre I

GENERALITES SUR LE SOL

1- INTRODUCTION :

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 sont basées en général sur la division des particules en trois gammes de tailles ou textuelles connues : sable, limon et argiles. Une autre classification est également utilisée mais qui est basée sur les rapports de masse des trois facteurs cités ci-dessus.

L'analyse granulométrique permet d'étudier la distribution de la taille des particules et de dresser la courbe granulométrique qui donne le pourcentage en poids des grains en fonction d'un diamètre donné. L'analyse granulométrique se fait par tamisage ou par sédimentation d'après la loi de Stokes.

La structure du sol est définie par l'arrangement réciproque et l'orientation des particules dans le sol. En général la notion de structure est utilisée d'une façon qualitative dans la mesure où le sol est très complexe pour déterminer une telle caractéristique géométrique d'une façon pratique et directe, il existe des méthodes indirectes qui mesurent des propriétés influencées par la structure.

Dire d'un terrain perméable qu'il est homogène équivaut à dire qu'il présente en tout point dans une direction donnée, la même résistance à un écoulement de filtration.

Si la résistance à l'écoulement de filtration dans un sol est la même quelle que soit la direction on dit qu'il est isotrope dans le cas contraire il est anisotrope.

2 - PARAMETRES DE DEFINITION DES SOLS :**2.1 - MODEL ELEMENTAIRE D'UN SOL :**

Un sol étant composé de grains solides, d'eau et d'air, on peut rassembler chaque phase en un volume partiel unique de section unité. Les notations suivantes sont utilisées :

Volumes**Poids**

Va		Air		Wa=0
Vw		Eau		Ww
Vs		Grains solides		Ws

Figure I.1 : modèle d'un sol

Va : volume de l'air.

Vw : volume de l'eau.

Vs : volume des grains solides.

Vv = Va + Vw : volume des vides.

V = Vv + Vs : volume total du sol

W w: poids de l'eau , Ws : poids des grains solides

W = Ww + Ws : poids total

2.2 - LES POIDS VOLUMIQUES :

- Le poids volumique (spécifique) total ou humide :

$$\gamma = \frac{W}{V}$$

- Le poids volumique des grains solides :

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

- Le poids volumique du sol sec :

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$$

- Le poids volumique de l'eau :

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} = 10 \text{ kN/m}^3 = 1 \text{ t/m}^3$$

- Poids volumique du sol saturé :

$$\gamma_{sat} = \frac{W}{V}$$

- Poids volumique déjaugé :

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

- La gravité spécifique :

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

2.3- LES PARAMETRES D'ETAT :

Ils indiquent dans quelles proportions existent les différentes phases d'un sol.
On définit :

- La teneur en eau :

$$W\% = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

- L'indice des vides :

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

- Le degré de saturation :

$$S_r\% = \frac{V_w}{V_v} \times 100$$

- La porosité :

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

Tous ces paramètres ne sont pas indépendants. Ils sont reliés par des relations que l'on peut retrouver à l'aide du modèle élémentaire. Exemple de formules :

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e}$$

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1$$

$$S_r = \frac{wG_s}{e}$$

3- IDENTIFICATION DES SOLS :

Pour caractériser un sol, il faut déterminer les paramètres de nature et les paramètres d'état.

Les paramètres de nature indiquent les caractéristiques intrinsèques du sol. Ils ne varient pas au cours du temps (poids volumique des grains solides, granularité, argilosité, limites d'Atterberg, teneur en matières organiques,...).

Les paramètres d'état sont fonction de l'état du sol et caractérisent le comportement du sol sous l'effet d'un chargement donné (teneur en eau, indice des vides, porosité, Equivalent de sable,...).

Nous regroupons dans ce paragraphe les essais géotechniques de laboratoire classiques qui permettent de caractériser un sol.

3.1- LA MASSE VOLUMIQUE DES PARTICULES SOLIDES γ_s :

Sa détermination se fait à l'aide d'un pycnomètre. Une masse de sol sec m_s est introduite dans un pycnomètre contenant de l'eau distillée. Après avoir éliminé toutes les bulles d'air, on mesure le volume d'eau déplacé par les grains solides V_s .

N.B : Pour les sols (à part les sols organiques) : $26 \text{ kN/m}^3 \leq \gamma_s \leq 28 \text{ kN/m}^3$

3.2 LES ESSAIS GRANULOMETRIQUES :

Ils permettent d'obtenir la répartition en pourcentage des grains solides selon leurs dimensions. Deux types d'essais sont envisageables selon le sol à tester :

- Par tamisage (par voie humide ou sèche) pour les éléments de diamètre $\varnothing \geq 80\mu\text{m}$.
- Par sédimentométrie pour les éléments de diamètre $\varnothing < 80\mu\text{m}$.

Les résultats sont traduits sous forme d'une courbe granulométrique, tracée dans des axes semi-logarithmiques, à partir de laquelle on peut déterminer :

- Le coefficient d'uniformité de Hazen :

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

- Le coefficient de courbure :

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \times d_{10}}$$

di : diamètre correspondant à i% de pourcentage de tamisât cumulé.

3.3- ESSAIS SUR DES SOLS PULVERULENTS :

Le comportement de ces sols dépend des paramètres qui caractérisent le squelette solide, à savoir les dimensions des grains et l'indice des vides. Les essais les plus courants sont :

- a) **Equivalent de sable (ES%)** : Permet de caractériser la propreté des sables et le type de sol analysé.

ES	Type de sol
0	Argile pure
20	Sol plastique
40	Sol non plastique
100	Sable pur et propre

Tableau 1.1 : Caractérisation des sols à partir de la valeur de E.S

- b) **Densité relative (ou indice de densité)** : Permet de caractériser la compacité d'un sol grenu et son aptitude à supporter des charges.

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$

Avec :

- e : indice des vides du sol en place.
- e_{max} : indice des vides du sol à l'état le plus lâche.
- e_{min} : indice des vides du sol à l'état le plus dense.

I_D	Compacité du sol
0	Très lâche
< 0,5	Lâche
0,5	Moyennement dense
> 0,5	Très compact
1	Très bien compact

Tableau 1.2 : Compacité d'un sol en fonction de l'indice de densité

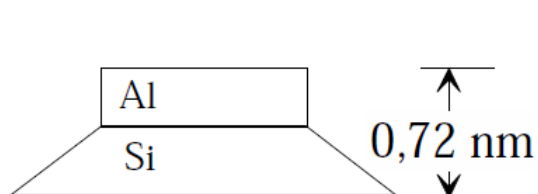
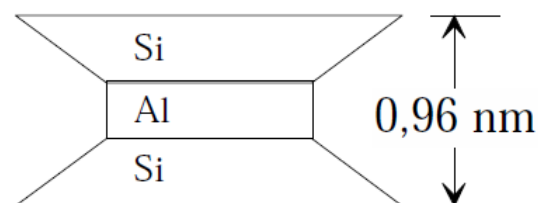
3.4 : ESSAIS SUR LES SOLS FINS :

Le comportement de ces sols dépend :

- de la composition minéralogique (types de minéraux argileux)

Les argiles sont composées d'aluminosilicates hydratés. Les grains solides ont une forme de plaquette. Ils sont formés par un empilement de feuillets (composés d'une superposition de couches octaédriques et tétraédriques constituées par un maillage d'ions Si, O, OH, Al et Mg) :

- les feuillets 1/1 sont formés d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique (kaolinite),
- les feuillets 2/1 sont formés d'une couche octaédrique entourée de deux couches tétraédriques (illite, smectite).

**Feuillet 1/1****Feuillet 2/1**

Le tableau 1.3 présente les familles d'argile et leurs caractéristiques.

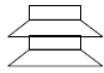
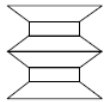
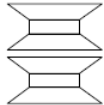
Noms	Feuillets élémentaires	Nombre de feuillets par particule	Dimension d'une particule l x e (µm x µm)	Surface spécifique (m²/g)
Kaolinite		100 - 150	1 x 0,1	20 - 70
Illite		10	0,3 x 0,01	10 - 40
Montmorillonite		1	0,1 x 0,01	100

Tableau 1.3 : Familles d'argile et leurs caractéristiques

- de la **structure**

dispersée : contact face-face entre les particules

floculée : contact bord-face entre les particules

- de la **teneur en eau** w%.

Elle est obtenue par passage à l'étuve à 105°C d'une quantité de sol. C'est le rapport de la masse d'eau évaporée à la masse du sol sec (grains solides).

a) Les limites d'Atterberg :

Suivant la consistance d'un sol remanié, qui est fonction de sa teneur en eau, on distingue 4 états schématisés comme suit :

ETAT	Solide		plastique	liquide
	Sans retrait	Avec retrait		
ω	ω _s		ω _l	ω _p
Limite de	retrait		plasticité	liquidité

w_s , w_l et w_p sont les limites d'Atterberg déterminées en laboratoire sur la fraction du sol passant au tamis 0.40mm (méthode de la coupelle de Casagrande et du rouleau et appareil de retrait).

A partir de ces limites, on peut déterminer :

- L'indice de plasticité « I_p »

$$IP = w_L - w_P$$

Indice de plasticité (%)	Type de sol
$< 1\%$	Pulvérulent
$1\% < I_p < 7\%$	Sable argileux
$7\% < I_p < 17\%$	Argile sableuse
$I_p > 17\%$	Argile

Tableau I.4 : Type de sol en fonction de I_p

- L'indice de consistance: « I_c »

$$I_c = \frac{w_L - w}{I_p}$$

Indice de consistance	consistance du sol
$I_c < 0$	Liquide
$0 < I_c < 1$	Plastique
$I_c = 1$	Solide plastique
$I_c > 1$	Solide ou semi solide.

Tableau I.5 : Etat de consistance du sol en fonction de I_c

- L'indice de liquidité: « I_L »

$$I_L = \frac{w - w_p}{I_p}$$

Indice de liquidité	Consistance du sol
$I_L < 0$	Très dure
$0 < I_L < 1$	Dure à très plastique
$I_L > 1$	Fluide

Tableau 1.6 : Etat de consistance du sol en fonction de « I_L »

- b) Valeur du bleu de méthylène : « VBS »

Elle représente la quantité de bleu pouvant être adsorbée sur les surfaces internes et externes des particules du sol. La valeur VBS s'exprime en masse de bleu pour 100g de sol.

VBS	Type de sol
0,1	Sol insensible à l'eau
0,2	Seuil au-dessus duquel le sol est sensible à l'eau.
1,5	Seuil distinguant les sols sablo- limoneux des sols sablo- argileux.
2,5	Seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques de sols limoneux moyennement plastiques
6	Seuil distinguant les sols limoneux et les sols argileux
8	Seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux.

Tableau I.7 : Type de sol en fonction de la valeur «VBS »

c) Teneur en carbonate : % de CaCO_3

L'essai est réalisé au calcimètre Dietrich-Fruhling afin de déterminer la teneur pondérale en carbonates d'un sol qui est le rapport entre la masse de carbonate contenue dans le sol à sa masse sèche totale. La détermination se fait par décomposition du carbonate de calcium.

CaCO_3 contenu dans le sol par l'acide chlorhydrique.

Teneur en Carbonate en %	Type de sol
0 - 10	Non marneux
10 - 30	Faiblement marneux
30 - 70	Marneux
70 - 90	Calco - marneux
90 - 100	Calcaireux – crayeux

Tableau I.8 : Type de sol en fonction du % en CaCO_3

d) La teneur en matières organiques : « MO »

C'est le quotient de la masse de matières organiques contenues dans un échantillon de sol par la masse totale des particules solides minérales et organiques. Sa détermination se fait par calcination.

Teneur en matières organiques (MO%)	Type de sol
MO < 3	Non organique
3 < MO < 10	Faiblement organique
3 < MO < 30	Moyennement organique
MO > 30	Très organique

Tableau I.9 : Type de sol en fonction du % en MO

3.5- CLASSIFICATION DES SOLS :

Elle consiste à regrouper les sols qui ont une nature, un état et un comportement similaires par rapport à une application géotechnique particulière (routes, fondations, etc...) En première approximation, on peut adopter, lorsque les dimensions des grains sont peu différentes, la classification suivante selon le diamètre moyen des grains



3.5.1- CLASSIFICATION DES SOLS NON ORGANIQUES (MO < 3%)

On distingue :

- Les sols grenus (plus de 50% des éléments solides ont un $\varnothing > 80\text{mm}$)
- Les sols fins (plus de 50% des éléments solides ont un $\varnothing > 80\text{mm}$).

a) Les sols grenus

On adopte la classification des laboratoires des ponts et chaussées (LPC).

b) Les sols fins :

On utilise le diagramme de Casagrande .

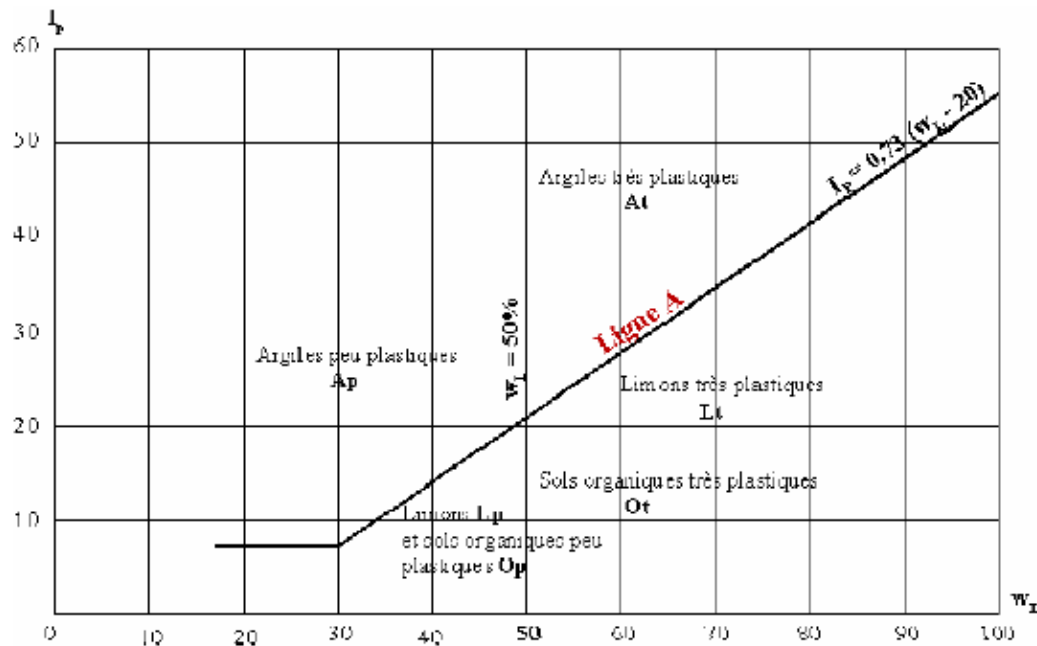


Figure I.2 : Classification des sols fins (Diagramme de plasticité)

3.5.2- CLASSIFICATION DES SOLS ORGANIQUES (MO>3%) :

Les caractéristiques utilisées pour la classification de ces sols sont :

- La teneur en matières organiques : % MO
 - Sol « fo » pour $3\% < MO < 10\%$
 - Sol « mo » pour $10\% < MO < 30\%$
 - Sol « to » pour $MO > 30\%$
- Les limites d'Atterberg pour les sols « fo » (utiliser le diagramme de Casagrande en rajoutant le terme « fo »).
- Les résultats du test d'humification pour les sols « mo » et « to ». On obtient 10 classes de sols organiques de H_1 à H_{10} .

Définitions			Symboles L.P.C.	Conditions	Appellations
Graves	Plus de 50% des éléments > 80µm ont un diamètre > 2mm	Moins de 5% d'éléments < 80µm	Gb	$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} < 4$ et $1 < C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} < 3$	Grave propre bien graduée
			Gm	Une des conditions de Gb non satisfaite	Grave propre mal graduée
		Plus de 12% d'éléments < 80µm	GL	Limites d'Atterberg au-dessous de A	Grave limoneuse
			GA	Limites d'Atterberg au-dessus de A	Grave argileuse
Sables	Plus de 50% des éléments > 80µm ont un diamètre > 2mm	Moins de 5% d'éléments < 80µm	Sb	$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ Et $1 < C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} < 3$	Sable propre bien gradué
			Sm	Une des conditions de Sb non satisfaite	Sable propre mal gradué
		Plus de 12% d'éléments < 80µm	SL	Limites d'Atterberg au-dessous de A	Sable limoneux
Si 5% d'éléments < 80µm < 12%, on utilise un double symbole					

Tableau I.10 : Classification des sols grenus (plus de 50% des éléments > 80µm)

4- LES SABLES :

Les sables sont des grains de roches ou des minéraux ayant un diamètre compris entre 0,0625 mm et 2 mm (ou 4,47 mm et 5 mm, selon le système de classification utilisé). Nous utilisons le sable, en usage dans différents domaines comme la géotechnique, le génie civil ainsi que dans le domaine de l'agriculture.

4.1- ORIGINE DES SABLES :

Le sable provient de l'altération et la désagrégation naturelle des roches et autres matériaux de la surface terrestre, sous l'effet de climat. Les matériaux fragmentés peuvent ensuite être transportés par l'eau et le vent ultimement jusque dans les océans qui bordent les continents.

Des accumulations exploitables de sable peuvent se former durant leur long transport vers les océans.

4.2- COMPOSITION DU SABLE :

Les grains de sables sont composés des fragments de roche, de minéraux et peuvent également contenir des débris d'origine organique ou synthétique. En plus des fragments de coquillages, on trouve maintenant sur les plages marines actuellement en formation une certaine proportion de débris d'origine synthétique comme le verre, la terre cuite et la porcelaine.

Cependant, les débris d'origine organique et synthétique ne sont une composante importante uniquement dans les sables de plages et de deltas marins actuels, les sables d'origine glaciaire ou fluvioglaciaire ne contiennent pratiquement jamais de débris organiques et jamais de débris synthétiques.

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

4.3- MINERAUX 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. À l'intérieur des continents, le quartz est normalement le premier minéral en abondance dans la composition du sable. Pour les sables de plages marines et tropicales, là où abondent les mollusques, coraux et autres producteurs de calcite, la calcite est souvent le premier minéral en abondance.

D'autres minéraux comme c'est le cas de la magnétite, à la fois durs et inaltérables, peuvent se concentrer dans le sable, par disparition des minéraux fragiles durant le transport.

4.4- CARACTERISTIQUES PHISQUES DES SABLES :

Le sable se caractérise par sa capacité à s'écouler. Plus les grains sont ronds, plus le sable s'écoule facilement. On peut différencier un sable qui a été transporté par le vent d'un sable transporté par l'eau. Le premier est de forme plus ronde, sphérique, alors que le deuxième est plus ovoïde. De plus, le sable éolien présente une diaphanéité plus mate que le sable fluviatile, ou marin qui est dit "émoussé-luisant". Un sable issu d'une roche volcanique est plutôt noir tandis qu'un sable marin s'enrichit de débris de coquillages.

4.5- UTILISATION ET ECONOMIE :

4.5.1- AGRICULTURE :

Dans ce domaine, le sable est utilisé dans le but d'amélioration des caractéristiques physiques du sol.

✓ **Principal avantages :**

Très perméable à l'eau et à l'air, il se réchauffe rapidement, un atout précieux en hiver, qui permet à de nombreuses plantes d'être protégées même si le thermomètre indique des températures dangereuses.

✓ **Inconvénient :**

En été, il va avoir tendance à sécher très rapidement, d'où des besoins assez importants en arrosage. Par ailleurs, comme il retient mal les éléments fertilisant, il faudra régulièrement amender le sol pour que les cultures ne l'épuisent pas complètement.

La terre est composée de quatre éléments principaux : argile, sable, calcaire (carbonate de chaux) et humus.

Une terre bien équilibrée (terre franche), contient 20% d'argile, 10% de calcaire, 65% de sable et 5% d'humus.

4.5.2- LA GEOTECHNIQUE :

Dans la géotechnique, le sable est utilisé pour la réalisation des drains, dans des sols gorgés d'eau pour faciliter l'évacuation de l'eau interstitielle au sein de ces sols et accélérer ainsi leur consolidation en vue, soit :

- ✚ De réduire les tassements ultérieurs.
- ✚ D'augmenter la capacité portante de sol.
- ✚ D'augmenter la résistance au cisaillement des sols.
- ✚ Diminuer le temps de consolidation par création d'éléments drainant.
- ✚ Diminuer les risques induits par les phénomènes de liquéfaction lors des séismes.

- ✚ Les sables à utiliser, tant pour les drains proprement dits que pour le tapis de sable destiné à assurer l'écoulement à la surface des sols à drainer, devront avoir une perméabilité spécifique à leur fonction respective.

4.5.3- AUTRES DOMAINES :

- ✚ -En maçonnerie, le sable est utilisé comme agrégat mélangé à un liant comme la chaux ou le ciment.
- ✚ -En fonderie de métaux ferreux ou alliages légers, les moules peuvent être réalisés en sable aggloméré par des résines ou des argiles, pour couler les pièces.
- ✚ -En cuisine, il a été utilisé au XIX^e siècle pour la conservation de la viande.
- ✚ -Il est utilisé comme matière première du verre.
- ✚ -Il peut être utilisé pour filtrer les liquides (comme l'eau de piscine, les eaux usées...), des gaz ou de l'air (filtre à sable filtrant les vapeurs d'un four à plomb, ou filtre à sable filtrant un air susceptible de contenir des radionucléides accidentellement émis dans l'air d'une installation nucléaire).
- ✚ -De fait de sa facilité de manipulation, il est également employé lorsque l'on a besoin d'acheminer de la matière dans un endroit, par exemple pour protéger (sac de sable contre les éclats d'explosion et les balles).
- ✚ -Il est utilisé comme abrasif dans des usines pour nettoyer des pièces métalliques : ce procédé est le sablage.
- ✚ -Le sable est également un élément important dans le domaine touristique, lorsqu'il est présent dans les plages et les dunes où il est également un élément indispensable à la protection de la côte.
- ✚ -Il est également utilisé en jet à haute pression pour donner l'effet délavé aux jeans.

4.5.4- ECONOMIE :

Après l'air et l'eau, le sable est la ressource la plus utilisée au monde. Il représente un volume d'échanges internationaux de 70 milliards de dollars par an.

5- L'EAU DANS LE SOL :

L'eau appartient à de nombreuses sciences de la nature et de la vie. Elle intéresse les gestionnaires des ressources en eau, les chimistes, les biologistes, les météorologues, les spécialistes des sols agricoles, les écologistes, les marins... Pour sa part, l'ingénieur de génie civil connaît surtout l'eau comme composante du sol et pour l'interaction mécanique avec les ouvrages.

L'eau peut se trouver dans plusieurs états à l'intérieur d'un sol, suivant l'intensité des forces liant ses molécules aux particules solides (Figure I.3), on distingue :

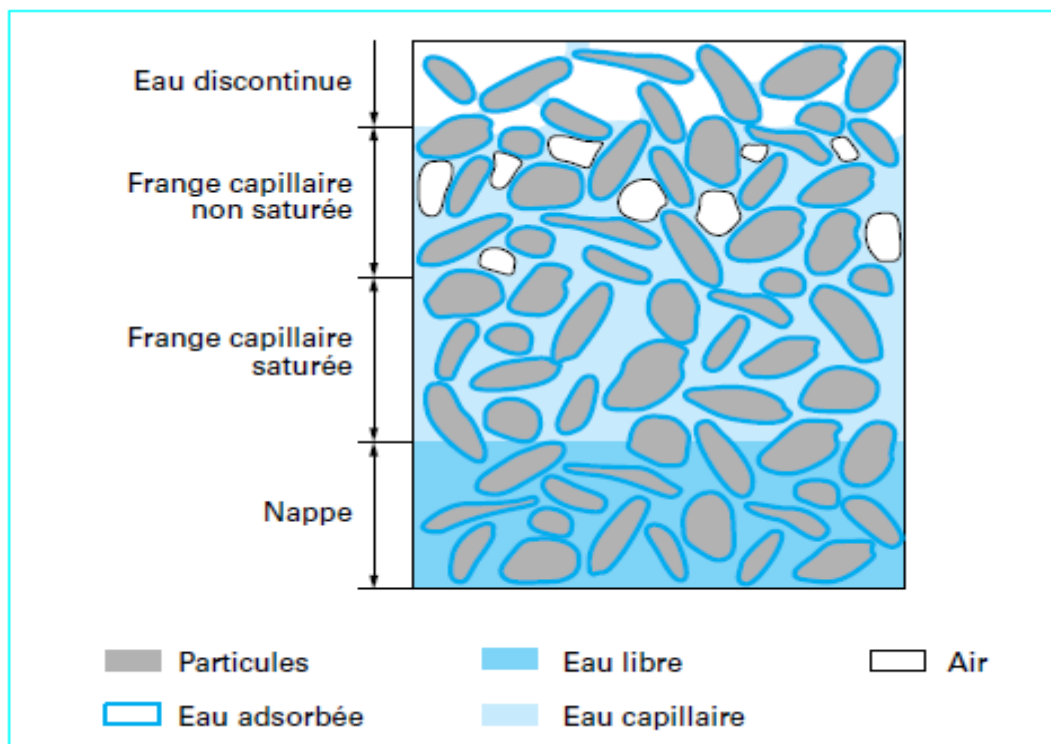


Figure I.3 : Différents états de l'eau dans le sol

5.1- L'EAU DE CONSTITUTION :

Qui entre dans la composition chimique des minéraux dont les particules de sol sont formées.

5.2-L'EAU LIEE 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.

5.3- L'EAU LIBRE :

Qui circule librement dans les pores du sol sous l'effet des forces de pesanteur.

5.4- 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. Dans les sols fins argileux, l'eau peut se trouver dans les quatre états indiqués ci-avant et la hauteur de la frange capillaire peut atteindre plusieurs dizaines de mètres au-dessus de la surface de la nappe. Dans les sables, il n'y a pas d'eau de constitution et en général pas d'eau liée et la frange capillaire a quelques centimètres de hauteur. Au delà de la hauteur limite d'ascension capillaire (frange capillaire), l'eau n'est plus continue dans l'espace des pores et n'intervient pas de façon autonome dans le comportement mécanique du sol.

6- L'EAU DANS LA NATURE :

L'eau présente dans le sol ne présente qu'une faible partie de l'eau existant à la surface du globe terrestre. L'essentiel de cette eau est salée et se trouve dans les océans et les mers (97,2%). L'eau douce est répartie entre les glaciers (2%), les nappes souterraines (0,58%, soit environ huit millions de kilomètres cubes), les lacs et cours d'eau (0,16%) et l'atmosphère sous forme de vapeur (0,001%). L'eau souterraine communique avec les réservoirs d'eau douce et salée, avec les rivières et avec l'atmosphère (évaporation et précipitations). Par ailleurs, en fonction de la température, elle peut se changer en glace ou se former à partir de la glace.

7- INFILTRATION ET ECOULEMENT DE L'EAU DANS LE SOL :

Les écoulements représentent une partie essentielle de 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 des cours d'eau et des écoulements de surface et souterrain parvenant à son exutoire. La proportion entre ces deux types d'écoulements est définie par la quantité d'eau infiltrée dans le sol.

7.1- L'INFILTRATION :

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. L'infiltration influence de nombreux aspects de l'hydrologie, du génie rural ou de l'hydrogéologie. Afin d'appréhender le processus d'infiltration, on peut définir :

- Le régime d'infiltration $i(t)$, nommé aussi taux d'infiltration, qui désigne le flux d'eau pénétrant dans le sol en surface. Il est généralement exprimé en mm/h. Le régime d'infiltration dépend avant tout du régime d'alimentation (irrigation, pluie), de l'état d'humidité et des propriétés du sol.
- L'infiltration cumulative, notée $I(t)$, est le volume total d'eau infiltrée pendant une période donnée. Elle est égale à l'intégrale dans le temps du régime d'infiltration.

$$I(t) = \int_{t=t_0}^t i(t) \cdot dt$$

Avec :

$I(t)$: infiltration cumulative au temps t [mm],

$i(t)$: régime ou taux d'infiltration au temps t [mm/h].

- La conductivité hydraulique à saturation K_s est un paramètre essentiel de l'infiltration. Il représente la valeur limite du taux d'infiltration si le sol est saturé et homogène. Ce paramètre entre dans de nombreuses équations pour le calcul de l'infiltration.
- La capacité d'infiltration ou capacité d'absorption (ou encore infiltrabilité) représente le flux d'eau maximal que le sol est capable d'absorber à travers sa surface, lorsqu'il reçoit une pluie efficace ou s'il est recouvert d'eau. Elle dépend, par le biais de la conductivité hydraulique, de la texture et de la structure du sol, mais également des conditions aux limites, c'est à dire, la teneur en eau initiale du profil et la teneur en eau imposée en surface.
- La percolation désigne l'écoulement plutôt vertical de l'eau dans le sol (milieu poreux non saturé) en direction de la nappe phréatique, sous la seule influence de la gravité.

Ce processus suit l'infiltration et conditionne directement l'alimentation en eau des nappes souterraines.

- La pluie nette représente la quantité de pluie qui ruisselle strictement sur la surface du terrain lors d'une averse. La pluie nette est déduite de la pluie totale, diminuée des fractions interceptées par la végétation et stockée dans les dépressions du terrain. La séparation entre la pluie infiltrée et la pluie écoulee en surface s'appelle fonction de production.

7.2 : L'ÉCOULEMENT :

De par la diversité de ses formes, on ne peut plus aujourd'hui parler d'un seul type d'écoulement mais bien des écoulements. On distingue dans un premier temps deux grands types d'écoulements, à savoir : les écoulements « 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. Les écoulements qui gagnent rapidement les exutoires pour constituer les crues se subdivisent en écoulement de surface et écoulement de subsurface :

7.2.1- L'ÉCOULEMENT DE SURFACE :

Après interception éventuelle par la végétation, il y a partage de la pluie disponible au niveau de la surface du sol :

- en eau qui s'infiltré et qui contribue, par un écoulement plus lent à travers les couches de sol, à la recharge de la nappe et au débit de base,
- et en ruissellement de surface dès que l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration du sol (elle-même variable, entre autre selon l'humidité du sol). Cet écoulement de surface, où l'excès d'eau s'écoule par gravité le long des pentes, forme l'essentiel de l'écoulement rapide de crue.

L'écoulement par dépassement de la capacité d'infiltration du sol (écoulement Hortonien) est considéré comme pertinent pour expliquer la réponse hydrologique des bassins en climats semi-arides ainsi que lors de conditions de fortes intensités pluviométriques. Il est généralement admis que même des sols naturels présentant une conductivité hydraulique

élevée en climats tempérés et humides peuvent avoir une capacité d'infiltration inférieure aux intensités maximales des précipitations enregistrées.

Cependant des crues sont fréquemment observées pour des pluies d'intensité inférieure à la capacité d'infiltration des sols. Dans ce cas, d'autres processus tel que l'écoulement sur des surfaces saturées en eau, permettent d'expliquer la formation des écoulements. Des zones de sol peuvent être saturées soit par contribution de l'eau de subsurface restituée par exfiltration (d'une nappe perchée par exemple), soit par contribution directe des précipitations tombant sur ces surfaces saturées.

Il existe ainsi deux modes principaux d'écoulement de surface qui peuvent se combiner :

- l'écoulement par dépassement de la capacité d'infiltration (écoulement hortonien),
- l'écoulement sur surfaces saturées.

7.2.2- L'ÉCOULEMENT DE SUBSURFACE :

Une partie des précipitations infiltrée chemine quasi horizontalement dans les couches supérieures du sol pour réapparaître à l'air libre, à la rencontre d'un chenal d'écoulement. Cette eau qui peut contribuer rapidement au gonflement de la crue est désignée sous le terme d'écoulement de subsurface (aussi appelé, dans le passé, écoulement hypodermique ou retardé). L'importance de la fraction du débit total qui emprunte la voie subsuperficielle dépend essentiellement de la structure du sol. La présence d'une couche relativement imperméable à faible profondeur favorise ce genre d'écoulement. Les caractéristiques du sol déterminent l'importance de l'écoulement hypodermique qui peut être important. Cet écoulement tend à ralentir le cheminement de l'eau et à allonger la durée de l'hydrogramme.

7.2.3- L'ÉCOULEMENT SOUTERRAIN :

Lorsque la zone d'aération du sol contient une humidité suffisante pour permettre la percolation profonde de l'eau, une fraction des précipitations atteint la nappe phréatique. .

L'importance de cet apport dépend de la structure et de la géologie du sous-sol ainsi que du volume d'eau précipité. L'eau va transiter à travers l'aquifère à une vitesse de quelques mètres par jour à quelques millimètres par an avant de rejoindre le cours d'eau. Cet

écoulement, en provenance de la nappe phréatique, est appelé écoulement de base ou écoulement souterrain.

A cause des faibles vitesses de l'eau dans le sous-sol, l'écoulement de base n'intervient que pour une faible part dans l'écoulement de crue. De plus, il ne peut pas être toujours relié au même événement pluvieux que l'écoulement de surface et provient généralement des pluies antécédentes. L'écoulement de base assure en générale le débit des rivières en l'absence de précipitations et soutient les débits d'étiage (l'écoulement souterrain des régions karstiques fait exception à cette règle).

7.2.4- ECOULEMENT DÛ À LA FONTE DE NEIGE :

L'écoulement par fonte de neige ou de glace domine en règle générale l'hydrologie des régions de montagne ainsi que celles des glaciers ou celles des climats tempérés froids. Le processus de fonte des neiges provoque la remontée des nappes ainsi que la saturation du sol. Selon les cas, il peut contribuer de manière significative à l'écoulement des eaux de surface. Une crue provoquée par la fonte des neiges dépendra : de l'équivalent en eau de la couverture neigeuse ; du taux et du régime de fonte et finalement des caractéristiques de la neige.

8- CONCLUSION :

Pour résoudre les problèmes de mécanique des sols, il est important de caractériser un sol mais aussi de les classer, c'est à dire de les mettre dans un groupe ayant des comportements similaires. Il va de soi qu'une telle classification ne peut être basée que sur des corrélations empiriques, elles-mêmes basées sur une grande expérience. la perméabilité est un paramètre non négligeable pour cette classification.

Chapitre II

GENERALITES SUR LA PERMEABILITE

1- INTRODUCTION :

La perméabilité traduit la capacité que le sol possède de restituer l'eau qu'il a accumulée dans ses pores. La perméabilité s'exprime le plus souvent en volume d'eau restituée par unité de temps (débit naturel au captage) ou encore en distance parcourue par l'eau par unité de temps (vitesse d'écoulement de l'eau dans l'aquifère). Plus l'eau circule rapidement plus le sol est perméable. La perméabilité d'un sol dépend de nombreux facteurs à savoir la nature de sa porosité (macroporosité ou microporosité), de la nature colloïdale et surtout de la richesse en élément fins. En effet, la présence d'éléments fins crée une microporosité réduisant le volume possible d'eau gravitaire et surtout augmente la part d'eau adsorbée qui ne peut plus percoler.

2- DEFINITION :

La perméabilité d'un milieu poreux caractérise son aptitude à laisser circuler un fluide (liquide ou gaz) au sein de son espace poreux. Elle dépend de la structure interne de l'espace poreux et particulièrement de la connectivité de ses différents éléments. C'est une propriété de transport macroscopique exprimant le rapport entre une force (gradient de pression) imposée à un fluide pour traverser le milieu et le débit résultant. On peut mesurer la perméabilité d'un milieu à l'échelle d'un échantillon au laboratoire ou sur terrain avec des essais in situ, ou bien l'évaluer en modélisant la circulation des fluides dans un milieu poreux dont on tient compte de la microstructure.

3- CONSIDERATIONS GENERALES SUR LA PERMEABILITE DES SOLS GRENUS :

En 1856, DARCY, ingénieur de corps impérial des ponts et chaussées et des mines, a étudié les possibilités d'alimentation en eau de la ville de Dijon en utilisant un système d'aqueducs et de tuyaux. Le projet incluait le système de filtration de l'eau. L'option la plus pratique était la percolation de l'eau à travers un lit de sable fin. Dans ce contexte, Darcy a effectué de nombreuses expériences afin d'étudier le débit d'écoulement à travers les couches filtrantes de sable. Des échantillons de sables de différentes épaisseurs ont été testés et soumis à une série de pressions d'eau, de haut et en bas des échantillons. Le dispositif expérimental a permis de maintenir une charge hydraulique constante de haut en bas de l'échantillon durant le test (**figure II.1**). A partir des résultats de ces tests, il a établi empiriquement la relation suivante :

$$Q = k \frac{H_A - H_B}{L} A = k i A$$

Où :

Q : débit d'écoulement mesuré à la sortie (L^3/T)

K : constante, connue sous le nom de coefficient de perméabilité de Darcy (L/T)

H_A : hauteur séparant le niveau de référence et le niveau de l'eau à l'entrée de la colonne de la couche filtrante (L)

H_B : hauteur séparant le niveau de référence et le niveau de l'eau à la sortie de la colonne de la couche filtrante (L)

L : longueur de l'échantillon

i : gradient hydraulique

A : section normale de l'échantillon perpendiculaire à la direction de l'écoulement (L^2)

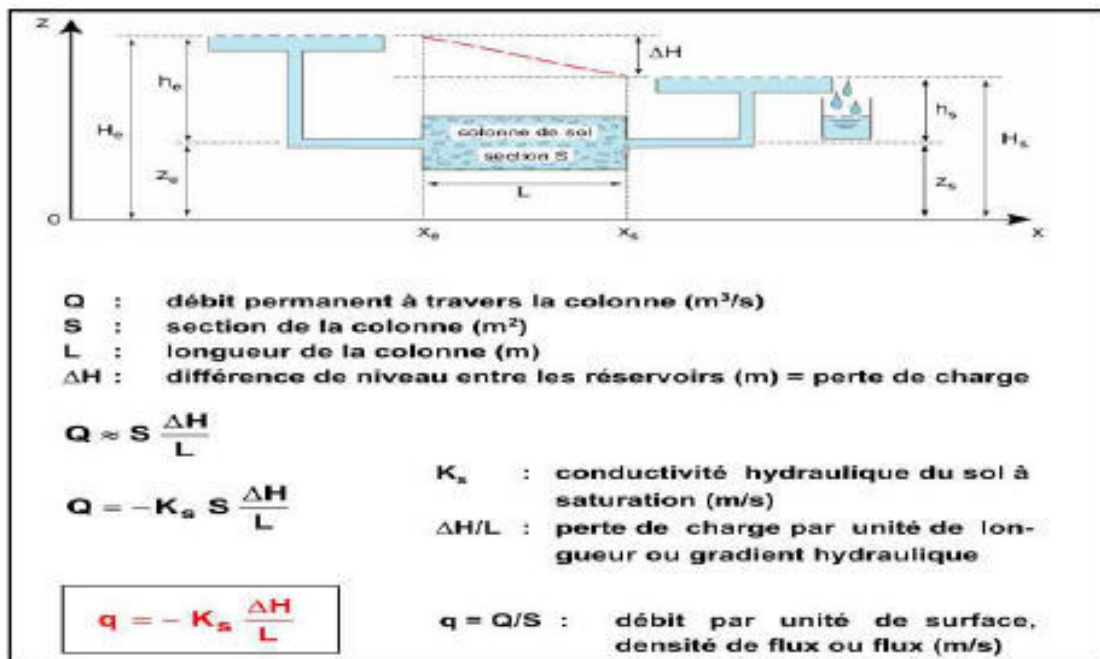


Figure II.1 : principe de perméamètre

4- VALIDITE DE LA LOI DE DARCY :

Depuis que DARCY a présenté ses travaux en 1856, l'équation a été sujette à examen par grand nombre de chercheurs et d'ingénieurs utilisant les différents sols et testant les équipements et les conditions d'essais.

Les nombreuses références existantes prouvent de façon quasi certaine la validité de la loi de DARCY pour la plus part des types d'écoulements dans les sols ayant des dimensions allant du sable moyen au limon. Cependant, les déviations de la loi de Darcy ont été constatées pour les sols à grains de dimensions extrêmes (gros sable et graviers et sols à grains fins argiles : limons argileux).

Les études de laboratoire ont permis de constater que la relation $v = ki$ est bien vérifiée pour tout les sols mais seulement à l'intérieur d'un certain intervalle de variation du gradient hydraulique. Pour de très faibles vitesses de décharge, l'écoulement réel ne correspond pas à l'écoulement théorique par suite des phénomènes colloïdaux. Pour les fortes vitesses, les divergences de ($v = ki$) sont dues aux forces d'inertie dans un mouvement non uniforme. Le nombre de REYNOLDS (Re) correspond au rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité.

MUSKAT en 1936 a proposé de prendre comme limite de sécurité la vitesse critique correspondant au nombre de REYNOLDS égal à 1, mais les expériences de Lewis et Barnes en 1938 ont conduit à constater que la loi était valable pour $Re < 10$. On peut donc dire que la loi de DARCY est une excellente approximation pour un faible nombre de Reynolds mais qu'elle devient de moins en moins bonne lorsque V augmente.

- **Sable grossier**

Depuis longtemps, il a été reconnu que la relation entre le flux et le gradient hydraulique n'est pas linéaire aux grandes vitesses d'écoulements pour lesquelles les forces d'inerties ne sont pas négligeables devant les forces de viscosités. La loi de Darcy est applicable seulement pour les écoulements laminaires (vitesses lentes) et dans les cas où l'interaction sol-eau n'introduit pas de changements dans la fluidité. Dans les sables grossiers et les graves, des gradients hydrauliques bien supérieurs à l'unité peuvent cependant développer des conditions d'écoulement non laminaire et la loi de Darcy n'est pas toujours applicable.

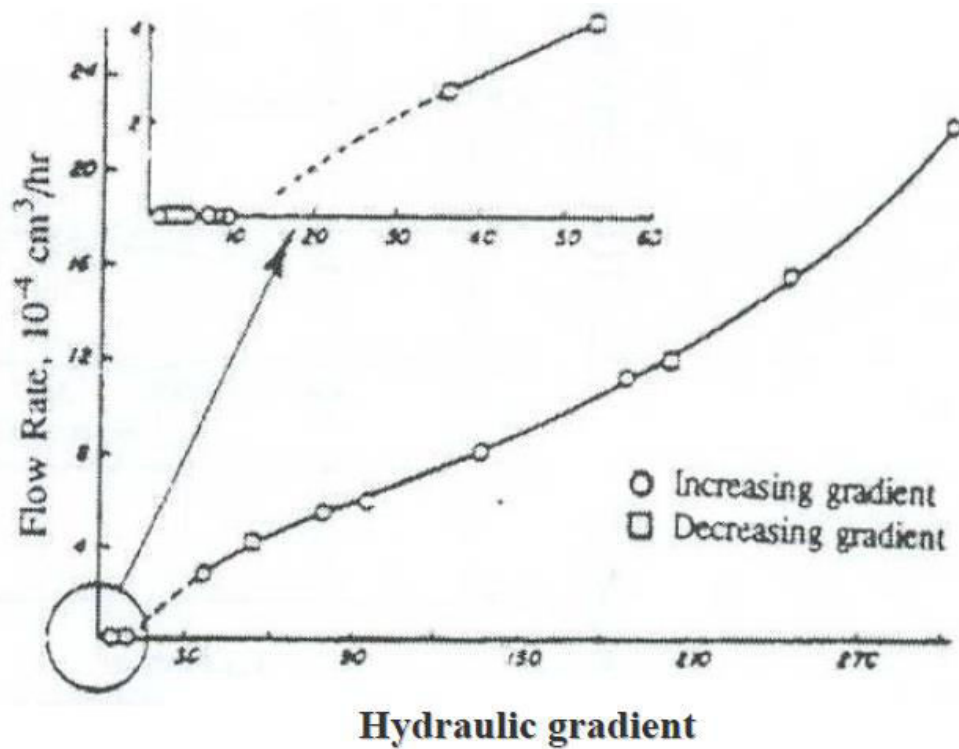
- **Sols fins**

La loi de Darcy est généralement valable pour les sols fins (Olson et Daniel, 1981.). Cependant, certains chercheurs ont montré des déviations du comportement prévu dans les cas des argiles et des sols argileux (Izbash, 1931 ; Lutz et Kemper, 1959 ; Hansbo, 1960 ; Miller et Low, 1963 ; Mitchell et Younger, 1967 ; Gardner, 1974 ; Zou, 1996 ; Sri Rajan et Karthigesu, 1996). Ces déviations sont de deux types :

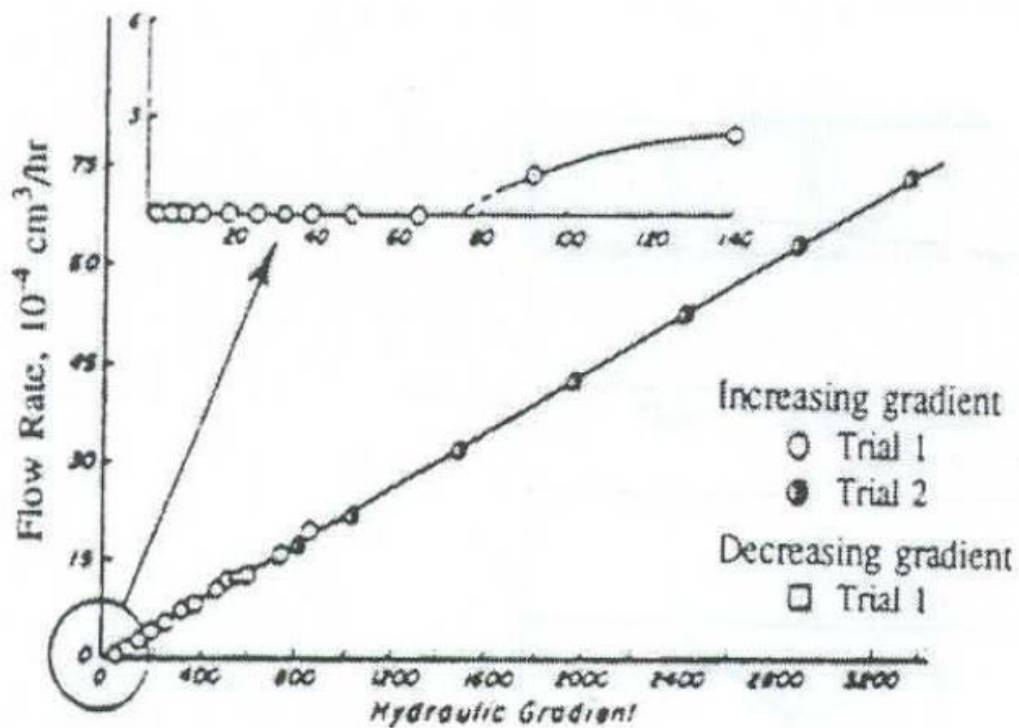
- Le gradient seuil apparent : en dessous duquel le flux est soit nul soit au moins inférieur à celui prédit par la relation de Darcy.
- Non linéarité de la loi de Darcy : La relation entre l'écoulement et le gradient n'est pas linéaire, en d'autres termes, la perméabilité n'est pas constante.

Cette déviation de la linéarité peut être rapportée aux très faibles et aux très forts gradients.

($i \leq 10$; $i \geq 100$)



(a) 32,2% sodium montmorillonite



(b) 55,5% sodium montmorillonite

Figure II.2 : (a) et (b) Gradient seuil apparent et déviation de linéarité (Miller et low, 1963)

En résumé, la compréhension courante est que la loi de Darcy est valide tant que toutes les conditions environnementales restent inchangeables.

- Pas de changement de structure,
- Pas de changement dans la chimie de l'eau interstitielle,
- Pas de variation de la contrainte effective,
- Pas de migration des particules,
- Pas de température différentielle.

Les essais en laboratoire pourraient être menés sous des conditions qui reproduisent tous les détails de l'environnement du terrain mais ces essais ne sont pas toujours représentatifs car les échantillons de laboratoire sont relativement petits et les essais aux très faibles gradients ne sont pas une tâche facile.

5- FACTEURS AFFECTANT LA PERMEABILITE :

Les écoulements dans les milieux poreux se font par des chemins complexes et tortueux à travers des séries de pores interconnectés et de différentes tailles et formes. En règle générale la perméabilité d'un milieu dépend :

- Du volume des pores (fonction de la densité du degré de saturation).
- De la distribution de la taille des pores (structure interne des pores).

Les différents paramètres qui affectent la perméabilité peuvent être classés en trois catégories :

- ✓ Composition : minéralogie, distribution de la taille des pores, etc,
- ✓ Environnemental : structure, saturation, etc,
- ✓ Facteurs associés aux techniques de mesure de la perméabilité : méthode d'essais, condition d'essais, etc.

5.1- INFLUENCE DE LA TAILLE DES PARTICULES :

Les résultats de (GUERIN, 2004) reportés sur la figure(n° de fig en dessous), montre que la porosité est dépendante de la taille des particules constitutives du mélange. Que ce soit à la suite d'un empilement en vrac non tassé (random loose packing – RLP) ou tassé (random close packing – RCP), une diminution de la taille des particules va entraîner à partir d'une certaine valeur, l'augmentation de la porosité et la perméabilité de l'empilement,

GUERIN fixe ce seuil à la valeur de $15\mu\text{m}$. Cependant, on retrouve dans la littérature d'autres valeurs critiques égales à $100\mu\text{m}$ (YU, 2003), $200\mu\text{m}$ (FENG, 1998).

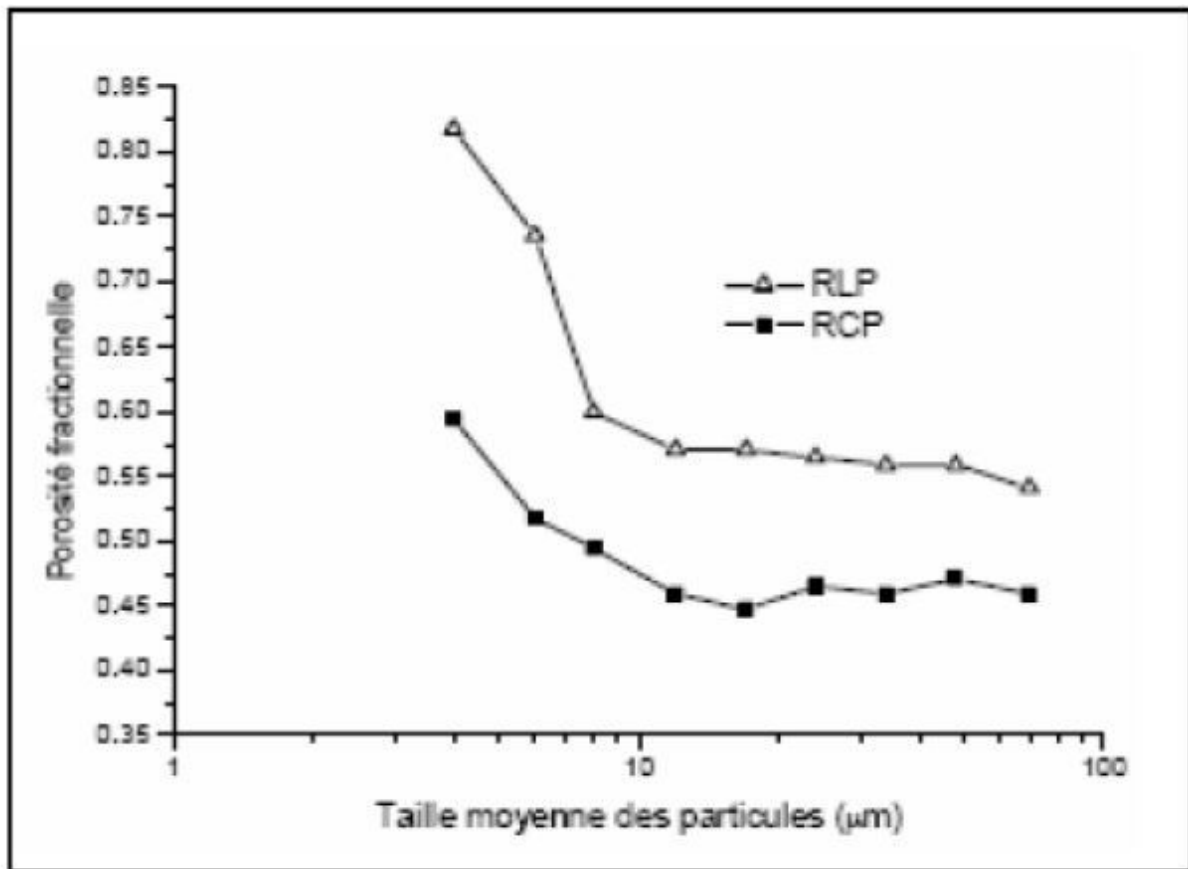


Figure II.3: Influence de la taille des particules du mélange sur les valeurs de la porosité d'après GUERIN (2004)

La relation entre la taille des particules et la porosité a été établie expérimentalement et modélisée, elle sera applicable quelle que soit la forme des particules elle a été confirmée par simulation numérique (YANG, 2000). Ces essais caractérisent la densification des particules mono dispersées dont la taille varie, d'un essai à l'autre, de $1\mu\text{m}$ à $1000\mu\text{m}$.

5.2- INFLUENCE DE LA DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE :

La distribution de tailles des particules est un paramètre pouvant influencer la compacité d'un empilement de particules sèches (GUERIN, 2004). La **figure II.4** permet de constater que l'augmentation de la distribution granulométrique et donc de la déviation standard géométrique, induit à la formation d'un empilement dont la densité va en grandissant.

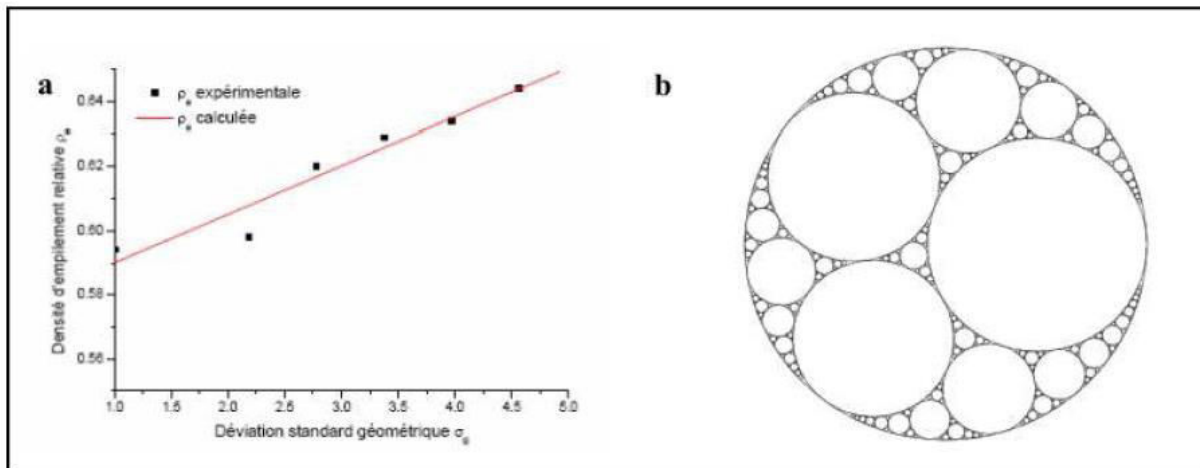


Figure II.4: Evolution de la densité de l'empilement de particules sèches en fonction de la déviation standard géométrique (GUERIN, 2004)

Pour des raisons d'encombrement géométrique, plus la distribution est large et plus les petites particules pourront se loger dans les pores créés entre les plus grosses d'entre elles, ce qui entraîne une diminution de la porosité. L'empilement maximal est obtenu dans une configuration théorique appelée « empilement apollonien » où tous les pores sont comblés par des particules (**figure II.4** En dessus).

A partir de la distribution granulométrique d'un ensemble de particules sèches et d'un paramètre nommé compacité virtuelle décrivant chaque classe de grains, (PULIOT, 2001) à mis au point un modèle analytique permettant la prédiction de la compacité d'un mélange granulaire.

Ce dernier s'appelle Modèle d'Empilement Compressible (MEC). Il permet de passer de l'empilement maximal virtuel, qu'on ne peut en pratique pas atteindre, à la compacité réelle de l'empilement granulaire qui est fonction de l'énergie déployée lors de sa mise en place à travers l'indice de serrage.

5.3- INFLUENCE DE LA FORME :

La sphéricité est le paramètre le plus souvent retenu pour étudier l'influence de la forme des particules sur la porosité d'un sable. Elle est définie comme étant le rapport entre la surface de la sphère ayant le même volume que la particule étudiée et la surface de cette particule. De manière générale il est accepté que la diminution de la sphéricité induit une

augmentation de la porosité (GUERIN, 2004). Celui-ci est lié à une forte probabilité de formation de pontages et à l'augmentation des frictions interarticulaires pour des particules présentant des angularités.

La **figure II.5** (en dessous) montre l'influence de la sphéricité sur l'état de densification. De manière générale, la variation de la porosité est contraire à celle de la sphéricité sauf pour les empilements très compacts où l'on observe que la sphéricité entraîne un abaissement de la porosité. Les résultats montrent aussi que la porosité d'un assemblage de particules est extrêmement dépendante de leur forme réelle. Les courbes relatives aux formes cylindriques (carrées) et disques (cercles) constituent les deux extrema entre lesquels peuvent évoluer les porosités des autres formes. Ceci montre bien que la connaissance de la sphéricité ne peut pas, à elle seule, permettre la détermination de la porosité.

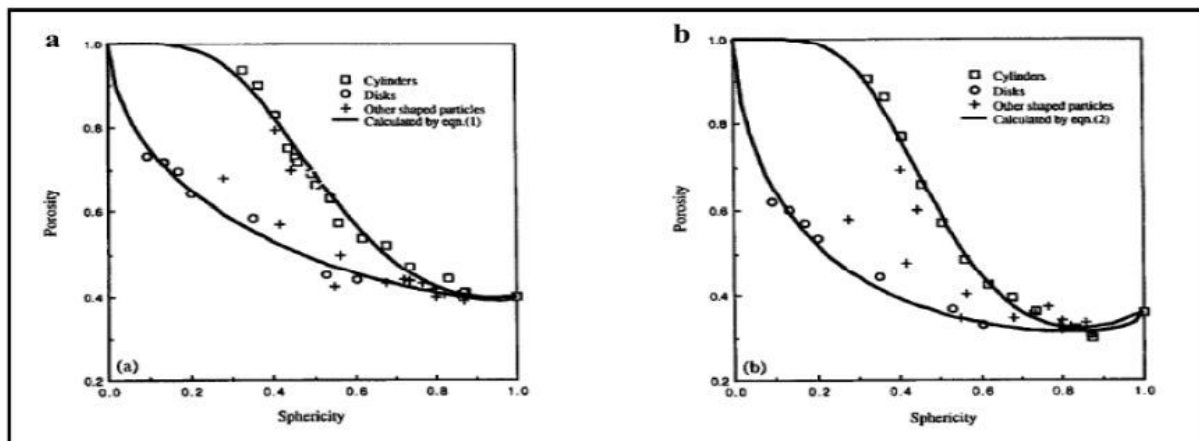


Figure II.5 : Evolution de la porosité en fonction de la sphéricité pour différentes formes de particules (GUERIN, 2004)

5.4- INFLUENCE DE LA STRUCTURE DE SABLE :

La structure peut influencer considérablement sur le taux de perméabilité indiqué comme suit :

forme	Type de structure	perméabilité
lamellaire	Se chevauchant beaucoup	Très faible
anguleuse	Se chevauchant beaucoup	Très faible
prismatique	Se chevauchant légèrement	Très forte
granulaire	Se chevauchant légèrement	Très forte

Tableau II.1 : variation de la perméabilité en fonction de la forme

5.5- INFLUENCE DE COMPOSITION :

La composition comprend les propriétés mécaniques, physiques et chimiques des grains formant l'ossature de l'échantillon de sable. Ces propriétés sont importantes pour la détermination des plages et des limites de propriétés géotechniques des sables et en particulier de la perméabilité.

5.6- INFLUENCE DE DEGRE DE SATURATION:

Dans les sables partiellement saturés, les pores de sol contenant de l'air piégé ne participent pas parfaitement à l'écoulement de fluide et la section effective à travers laquelle l'écoulement s'effectue se trouve réduite. Ainsi, la perméabilité maximale possible est celle de l'échantillon complètement saturé.

La **figure II.6** présente des résultats obtenus par OLSON et DANIEL. En 1979, ou pour des conditions d'essais spécifiques, la perméabilité est tracée en fonction du degré de saturation. Le coefficient de perméabilité tend à croître plus rapidement avec le S_r pour des faibles degrés de saturation. Il est possible que l'échantillon étant en saturation, les pores les plus larges s'emplissent en premier, ce qui correspond à la première portion de la courbe. Au-delà de cette phase initiale, la relation entre K et S_r varie.

La forme exacte de la relation ne peut être généralisée, et peut varier en magnitude selon la structure interne du sol. Il est intéressant ici de noter que LAMBE en 1954 juge que « l'importance de l'effet de la saturation sur K est relativement faible en comparaison avec la composition, la structure et l'indice des vides ».

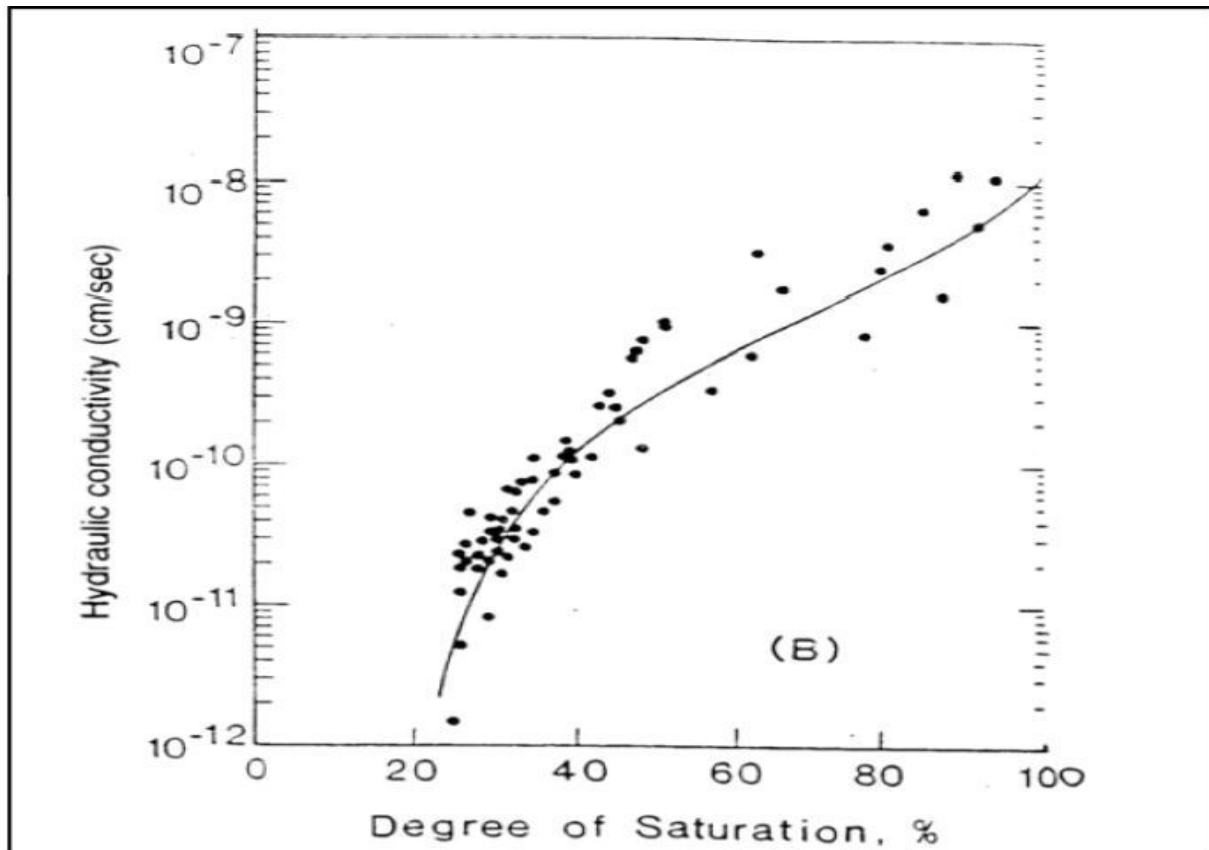


Figure II.6 : la perméabilité en fonction de degré de saturation pour un sable
(OLSON et DANIEL, 1979)

5.7- INFLUENCE DE L'ETAT DE SURFACE :

L'augmentation de la friction entre particules, causée par une modification de la forme ou une augmentation de la rugosité de la surface, entraîne la diminution du nombre de coordination et une augmentation de la porosité donc perméabilité. Les forces de frictions, historiquement mises en évidence par (AMONTONS, 1699) puis par (COUMONB, 1781), donnent une stabilité à l'arrangement granulaire au travers de l'angle de friction. Celui-ci est d'autant plus grand que la rugosité du contact est forte (CLAUDEN, 1999). Concernant les milieux granulaires, le critère de MOHR-COULOMB permet de préciser sous quelles conditions un tel milieu au repos est stable ou s'il s'apprête à glisser dans une direction, la stabilité d'un empilement étant fortement influencer par l'état de surface des particules dont on étudie la densification.

5.8- INFLUENCE DE LA TENEUR EN EAU :

L'influence du mouillage sur l'évolution de la porosité d'un lit de sable a été étudiée sur des particules dont la taille minimale est supérieure à $250\mu\text{m}$ afin de pouvoir s'affranchir de l'action des forces de VAN DER WAALS. Différents auteurs montrent que l'ajout d'un liquide va se traduire en terme de porosité par un phénomène dont l'allure est identique à celle produite par l'augmentation des forces de cohésion à sec (FENG et YU, 1998). La figure...présente, pour différentes tailles de sable, l'évolution de la porosité en fonction de la teneur en eau. Trois régimes sont identifiés :

- ✚ le régime de mouillage : au cours duquel la porosité croît avec la teneur en eau jusqu' à une valeur maximale (ϵ_{max}) à laquelle correspond une teneur critique (M_{critique}). Cette augmentation de porosité correspond à la définition du phénomène de foisonnement, particulièrement connu en géotechnique. Il consiste en l'augmentation du volume vrac d'un matériau pulvérulent suite à un remaniement ou à une augmentation de la teneur en eau. Les auteurs associent ce régime à un état pendulaire de l'eau au sein de la matrice.
- ✚ le régime de remplissage : au cours duquel la porosité va rester stable jusqu'à une teneur en eau donnée (M_{max}).
- ✚ le régime de sédimentation : à partir duquel le milieu va se densifier sous l'effet de la lubrification des contacts et de la dominance des actions gravitaires.

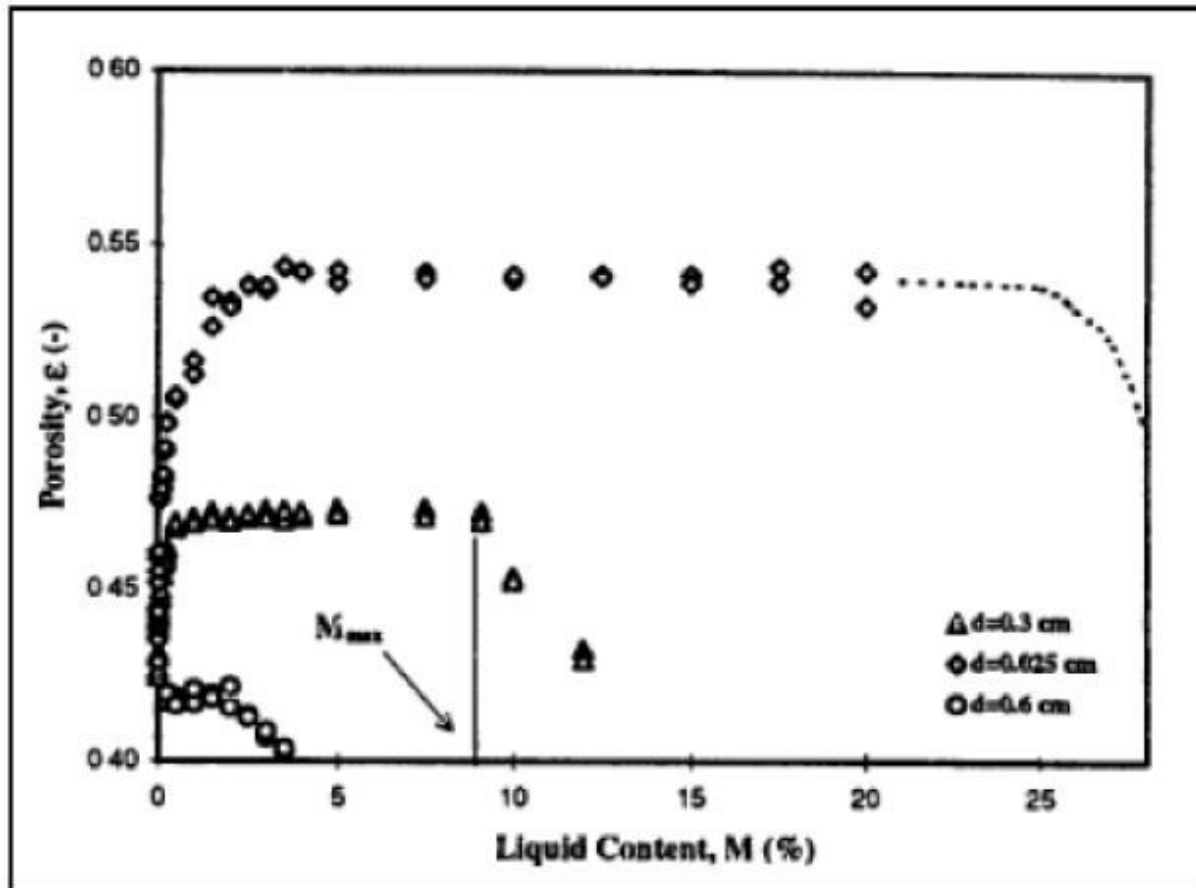


Figure I.7 : Evolution de la porosité en fonction de la teneur en eau pour un sable
(FENG et YU, 1998)

6- FORMULES UTILISEES POUR LE CALCUL DE LA PERMEABILITE :

6.1- FORMULE DE KOZENY ET CARMAN :

Plusieurs auteurs ont cherché à relier la perméabilité intrinsèque à la porosité du sol et à la dimension moyenne des grains, en particulier (KOZENY, 1927) et (CARMEN, 1956). Ces auteurs ont généralisé la notion de rayon hydraulique en définissant celui-ci comme le rapport entre le volume total des vides et la somme des surfaces latérales limitant le volume de ces vides. Comme les contacts entre les grains sont ponctuels, la somme de ces surfaces est égale à la somme des surfaces des grains.

Les deux auteurs ont proposés pour le calcul de coefficient de perméabilité k la formule suivante :

$$k = \alpha \left(\frac{\Omega}{S} \right)^2 \frac{n^3}{(1-n^2)}$$

Avec :

- Ω la somme des volumes des grains ;
- S la somme des surfaces des grains ;
- N porosité du sol ;
- A coefficient de viscosité de l'eau ;

6.2- FORMULE DE CAZENOVE :

Pour l'écoulement des eaux à travers des graviers roulés à granulométrie serrée, CAZENOVE propose la formule suivante :

$$k' = c \sqrt{\frac{n^3}{1-n}} d_{10}$$

Avec :

c : coefficient de viscosité ;

n : porosité du sol ;

d_{10} : diamètre efficace des grains ;

6.3- FORMULE DE HAZEN :

Pour les sables fin et les sables limoneux ayant un coefficient d'uniformité inférieur à 5, HAZEN à proposé la formule suivante :

$$K = 100 d_{10}^2$$

Avec :

d_{10} : diamètre efficace des grains ;

6.4- FORMULE D'AWAD ET AMER :

Les auteurs AWED et AMER ont proposé une formule pour le calcul de la perméabilité donnée ci-dessous :

$$K = C_4 D_{10}^{2.32} C_u^{0.6} \times \frac{e^3}{1+e^3}$$

Avec :

C_4 : constante qui dépend de la dimension moyen des grains ;

$C = 25$ pour des grains de 15 mm.

$C = 100$ pour des grains compris entre 0,1 et 3 mm.

$C = 80$ pour des grains compris entre 3 et 6 mm.

$C = 65$ pour des grains compris entre 5 et 8 mm.

$C = 45$ pour des grains compris entre 8 et 15 mm.

C_u : coefficient d'uniformité des échantillons.

D_{10} : diamètre efficace des grains.

e : indice des vides.

7 CONCLUSION :

La perméabilité des sables secs dépend de cinq propriétés principales des particules : leur taille, leur distribution granulométrique, leur forme, leur état de surface et leur composition minéralogique. Tous ces paramètres interagissent pour faire varier la porosité (perméabilité) qui est le paramètre macroscopique permettant le mieux de traduire les modifications de la microstructure de sable.

La perméabilité des sables humides dépend de deux paramètres à savoir le degré de saturation et la teneur en eau, lorsque le taux de saturation est important, le coefficient de perméabilité est élevé.

Chapitre III

LES ESSAIS DE PERMEABILITE

1- ESSAIS IN SITU :

Les essais sont classés par domaine de perméabilité.

1.1- ESSAIS DE POMPAGE :

1.1.1- DOMAINE D'APPLICATION : l'essai de pompage est réalisé dans un sol acquière dont la perméabilité est telle que le pompage provoque, en quelques heures, un rabattement de la surface piezométrique.

Son domaine est :

.les sols grenus,

.les sols fins ou rocheux traversés par un réseau de discontinuités.

Les essais de pompage sont réalisés lors des études hydrogéologiques. Ils permettent d'estimer le rayon d'action du pompage et de calculer le coefficient de perméabilité horizontal des terrains lorsque l'épaisseur de la couche aquifère est connue.

Ces essais sont fréquemment mis en œuvre dans le cas de réalisation d'ouvrages enterrés (fondations, tranchées couvertes, déblais sous nappe...). Pour assurer la sécurité des personnels et la stabilité de l'ouvrage, il sera nécessaire de connaître avec précision les propriétés hydrodynamiques de la nappe, et de définir les besoins de pompage (dimensionnement de la pompe, nécessité d'évacuation des eaux pompées ...etc.)

1.1.2- PRINCIPE DE L'ESSAI : cet essai consiste à forer un puits jusqu'au niveau de la nappe et pomper l'eau avec un débit constant Q jusqu'à ce que l'on atteigne un régime permanent. En supposant les équipotentiels verticales on a alors :

$$K=Q \frac{\ln\left(\frac{R}{r'}\right)}{\pi(H^2-h^2)}$$

Avec :

R : rayon de rabattement de la nappe.

r' : rayon du puits.

H : hauteur de la nappe.

h : hauteur du niveau d'eau à l'intérieur du puits.

1.2- ESSAI LEFRANC : L'essai Lefranc est un essai qui permet d'évaluer ponctuellement la perméabilité horizontale d'un terrain aquifère situé au-dessous de la nappe (sol saturé).

Il consiste :

- à créer une charge différentielle, par rapport à la charge correspondant au niveau initial de la nappe, dans une cavité de dimension connue préalablement réalisée dans le terrain à la base d'un forage et aménagée de telle sorte que la filtration de l'eau engendrée par cette charge différentielle ne se fasse que par les parois de cette cavité ;
- à mesurer l'évolution dans le temps de cette charge différentielle qui peut être produite soit par le prélèvement soit par l'apport dans la cavité d'un débit d'eau constant.

1.2.1- APPLICATION : L'essai Lefranc est le plus connu et le plus utilisé parce qu'il s'intéresse aux terrains très perméables (perméabilité de l'ordre de 1.10^{-2} à 1.10^{-7} m/s. Dans la pratique, on l'utilise classiquement pour mesurer la perméabilité d'interstices de roches meubles (l'essai teste une épaisseur de sol de l'ordre de 50 cm). Il présente donc un caractère ponctuel et n'est représentatif que si plusieurs essais permettent d'établir une analyse statistique pour éventuellement caractériser des hétérogénéités.

- a. **Principe de l'essai :** cet essai est le plus simple à mettre en œuvre, tant pour le matériel que pour l'interprétation des données de l'essai. L'essai Lefranc consiste à injecter de l'eau dans des couches perméables et à mesurer le volume d'eau absorbé sous une charge hydraulique donnée.
- b. **Calcul de la perméabilité :** connaissant le volume injecté, le diamètre du forage et la charge hydraulique appliquée, on peut aisément calculer le coefficient de perméabilité qui est donné par l'équation :

$$Q = m K H D$$

D'où

$$K = \frac{Q}{m H D}$$

Avec

K : coefficient de perméabilité de la formation en m/s

D : diamètre du forage (de la chambre) en mètre

L : hauteur de la chambre en mètre

H : charge hydraulique en mètre d'eau

m : coefficient de forme de la chambre donné par la relation approchée

$$m = \frac{\frac{2pL}{D}}{\ln\left(\frac{2L}{D}\right)}$$

Cette méthode donne des résultats relativement précis pour des terrains de bonne perméabilité c'est-à-dire $K > 10^{-4}$ m/s

On peut ainsi, pour une couche donnée calculer un coefficient de perméabilité correspondant à une charge hydraulique donnée ; il faut toutefois opérer de telle sorte que la loi de Darcy soit applicable, c'est-à-dire de ne pas utiliser des charges trop élevées.

On reporte ensuite sur un graphique les résultats obtenus avec, en abscisse, les différents débits injectés et en ordonnée les valeurs des différentes charges hydrauliques.

L'essai n'est valable que lorsque la loi de Darcy est respectée et que les points s'alignent sur une droite. On obtient alors la relation :

$$K = \frac{1}{Ca}$$

a : est la pente de la droite. L'intersection de la droite et l'axe des ordonnées est la cote du niveau piézométrique.

c. **exécution de l'essai** : l'essai classique consiste à injecter 200 litres d'eau dans un temps constant, généralement 4 litres par minutes. Il peut se présenter 3 cas de figures :

- L'eau injectée est totalement absorbée par le terrain ;
- L'eau injectée est partiellement absorbée par le terrain ;
- Presque toute l'eau injectée ressort par l'annulaire.

Dans les deux premiers cas, on mesure le volume de l'eau absorbée et on utilise les données recueillies pour calculer le coefficient de perméabilité comme défini précédemment, dans le dernier cas, le volume d'eau recueilli donne une idée de la valeur relative de la perméabilité d'un terrain peu perméable et nous verrons ultérieurement des essais mieux adaptés à ce type de terrain.

1.2.2- AVANTAGE : Il s'agit d'un essai relativement simple à réaliser et à interpréter, d'un coût et d'une durée plus faibles que ceux d'un essai de pompage en vraie grandeur. Il est également réalisable avec des matériels de forage géotechnique usuels, et un matériel de mesure relativement simple.

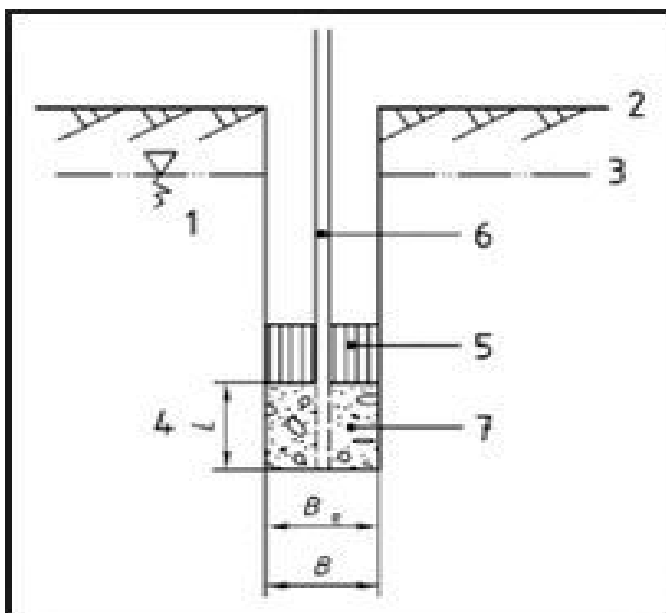
1.2.3- LIMITATIONS :

- ✚ L'essai est difficile à mettre en œuvre et à interpréter dans les formations hétérogènes.
- ✚ L'essai n'est pas adapté aux sols de perméabilité $k > 10^{-2}$ m/s
- ✚ L'essai n'est pas adapté aux sols de perméabilité $k < 10^{-7}$ m/s
- ✚ Il faut noter qu'il est difficile d'apprécier l'anisotropie et la perméabilité d'ensemble d'une formation géotechnique à l'échelle d'un projet.
- ✚ L'essai est très sensible à la qualité de réalisation de la crépine.
- ✚ Il faut prendre des précautions d'interprétation pour l'essai en régime transitoire.

1.2.4- PRECAUTIONS D'EMPLOI :

- ✚ Lors de la réalisation de la crépine il convient d'éviter :
- ✚ le lissage des parois lors de la remontée du tubage ;
- ✚ les circulations d'eau entre le tubage et le terrain naturel (condition plus ou moins contradictoire avec la première).
- ✚ Dans les sables, on portera attention aux phénomènes de Renard si l'essai est réalisé par pompage.
- ✚ Dans les sols fins, il conviendra de faire attention au colmatage si l'essai est réalisé par injection (l'interprétation permet de mettre en évidence un colmatage éventuel en cours d'essai).

La norme préconise un essai par pompage de préférence, et une interprétation en régime transitoire. Il peut néanmoins être intéressant de faire l'essai suivant différentes configurations complémentaire : charge d'eau constante, différents débits, suivi de la descente (débit = 0) ... , pour disposer de plusieurs interprétations et de pouvoir retenir une valeur représentative et/ou moyenne.



1 niveau nappe

2 terrain naturel

3 sol

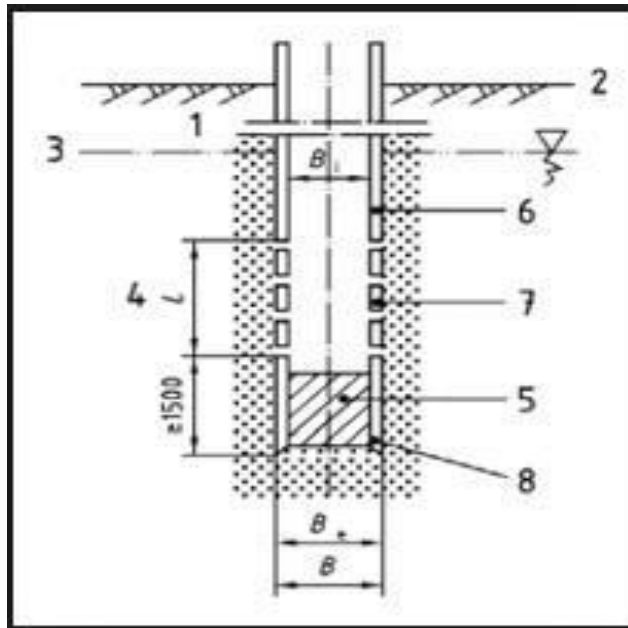
4 cavité

5 bouchon

6 tube d'écoulement

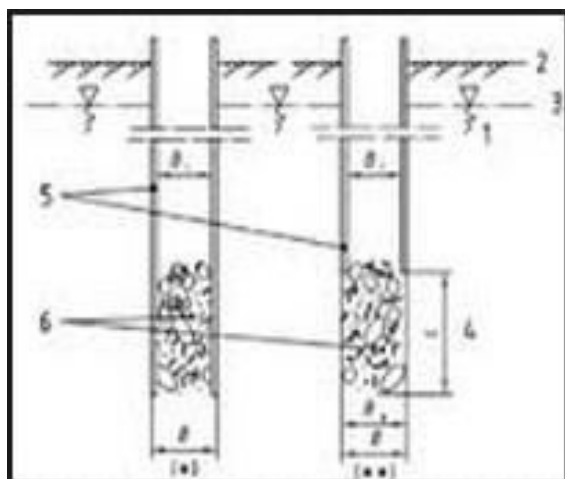
7 filtr

a) sol cohérent



- 1 sol
- 2 terrain naturel
- 3 niveau nappe
- 4 cavité
- 5 bouchon étanche obturât dilatable
- 6 tubage
- 7 manchon
- 8 sabot

b) sol pulvérulent



- 1 sol
- 2 terrain naturel
- 3 niveau nappe
- 4 cavité
- 5 tubage
- 6 matériaux filtre

c) phasage

Figure III.1 : Réalisation d'une cavité pour un essai d'eau Lefranc

1.3- ESSAI LUGEON : l'essai Lugeon est réservé pour les terrains de perméabilité moyenne à faible (perméabilité de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-8} m/s).

1.3.1- APPLICATION : L'essai Lugeon s'applique aux matériaux rocheux, maçonneries ou aux sols dont les caractéristiques mécaniques acceptent une pression d'eau compatible avec la réalisation de l'essai, soit 1 MPa.

a. principe de l'essai : L'essai Lugeon est essentiellement destiné à évaluer les possibilités de circulation de l'eau dans une roche ou une maçonnerie (il ne s'applique pas aux sols meubles de faible cohésion). Il consiste à injecter de l'eau sous pression dans une cavité constituée d'une portion de forage de dimensions connues, et à mesurer le débit d'injection pour différents paliers de pression, pendant un temps donné.

La cavité est réalisée dans le sol à la base d'un forage. Elle est limitée à sa partie inférieure par le fond du forage et à sa partie supérieure par un obturateur. Un tube d'injection relie cette cavité à la surface du sol. Le résultat de l'essai est un paramètre qualitatif d'absorption d'eau exprimé en unité Lugeon, laquelle correspond à un débit d'un litre par minute par mètre de longueur sous une pression de 1 MPa maintenue constante pendant 10 minutes.

b. calcul de la perméabilité : les différents paramètres, volume d'eau injecté, pression appliquée, différents pour chaque palier (seul le temps est constant), doivent être convertis en " absorption unitaire" qui s'exprime en unité Lugeon.

Comme nous avons déjà dit que 1 Lugeon = débit de 1 litre par minute injecté dans un tronçon de forage de 1 m sous une pression de 1 MPa (10 bars), maintenue constante pendant 10 minutes.

Si le débit ramené à 1m de forage est de n litres /minute, on dira que la perméabilité de la roche est de n Lugeon.

Si c'est une droite, on peut alors appliquer l'équation :

$$K = \frac{Q \ln\left(\frac{R}{r}\right)}{p L H}$$

Si c'est une courbe, la formule sera :

$$K = \frac{Q \ddot{O}}{2 p L R H}$$

K est exprimé en m/s avec :

Q : débit en m³/s

R : rayon d'action de l'essai, estimé à 200 mètres

r : rayon du forage (de la chambre) en mètre

L : hauteur de la chambre en mètre

H : charge hydraulique en mètres d'eau

c. **Exécution de l'essai** : les essais se font généralement pendant la foration, cela permet de n'utiliser qu'un obturateur que l'on gonfle à la cote choisie, pour ménager une chambre de mesure entre le fond (provisoire) du forage et l'obturateur. La hauteur de la chambre est généralement comprise entre 3 et 5 mètres. Il arrive cependant que l'on soit amené à faire un essai le forage terminé, il faut alors utiliser un double obturateur pour ménager une chambre aux cotes choisies. La mise en œuvre de l'essai, dans ce cas est bien entendu bien plus lourde et onéreuse.

Quelle que soit la méthode utilisée, l'essai classique se fait en 5 temps :

- 1-injection sous 2 bars pendant 10 minutes, mesure de volume injecté ;
- 2-injection sous 5 bars pendant 10 minutes, mesure de volume injecté ;
- 3-injection sous 10 bars pendant 10 minutes, mesure de volume injecté ;
- 4-injection sous 5 bars pendant 10 minutes, mesure de volume injecté ;
- 5-injection sous 2 bars pendant 10 minutes, mesure de volume injecté ;

Il est bien évident que la gamme des pressions utilisées dépend de la fissuration, toutefois, on dépasse rarement 10 bars afin de ne pas créer de fissures artificielles ou des soulèvements de couches ; c'est qu'on vérifie en faisant des injections avec des pressions décroissantes (cela permet également de s'assurer si les fissures sont délavées ou non).

1.3.2- AVANTAGE : Le principal avantage de cet essai est sa relative simplicité de mise en œuvre. Il permet de mettre en évidence des hétérogénéités de perméabilité dans les matériaux rocheux.

1.3.3- LIMITATIONS : La méthode ne s'applique pas aux sols meubles mais uniquement aux roches et sols à cohésion très élevée (> 1.5 Mpa). La perméabilité d'une roche étant essentiellement fissurale, le régime d'écoulement est généralement turbulent et donc hors du champ d'application de la loi de Darcy. En conséquence l'essai Lugeon s'apparente plus à

un test qualitatif de perméabilité qu'à un véritable essai de mesure de la perméabilité. Le résultat de l'essai est un paramètre d'absorption d'eau exprimé en unité Lugeon dont la correspondance avec une véritable perméabilité est fonction notamment du diamètre de la cavité d'essai.

Par ailleurs les pressions d'injection élevées peuvent conduire à des phénomènes de colmatage ou de claquage des terrains qui perturbent l'interprétation du résultat de l'essai.

Une catégorie d'essais n'entre pas dans le domaine des essais Lefranc ou Lugeon, ce sont les essais pour déterminer les très faibles perméabilités. La différence essentielle avec les essais précédents est que l'on exploite la phase transitoire de la remise à l'équilibre de la nappe. On peut utiliser alors des essais dérivés de ceux utilisés par les pétroliers, le « slug-test » et le « pulse-test ».

Le matériel utilisé pour ces essais de faible perméabilité est l'hydrotest que l'on équipe de plus ou moins d'accessoires suivant les essais demandés.

1.4- ESSAI PORCHET (TEST DE PERCOLATION) :

a. Principe: Des trous réalisés à faible profondeur sont remplis d'eau claire afin de mesurer la vitesse à laquelle le terrain absorbe l'eau. Il suffit, en conséquence, de mesurer le volume d'eau introduit pendant durée du test, volume nécessaire pour maintenir constante la hauteur d'eau dans le trou et calculer ainsi un coefficient K caractérisant le sol en place :

$$K \text{ (mm/h)} = \frac{\text{Volume d'eau introduit}}{\text{Surface d'infiltration X durée du test}}$$

(La surface d'infiltration comprend la totalité des surfaces du trou au contact avec l'eau.) Pour des terrains caractérisés par une faible perméabilité (inférieure à 6 millimètres par heure environ), l'évacuation des eaux usées par épandage souterrain doit être exclue au profit d'un autre mode de traitement et d'évacuation lorsque le site le permet.

Pour des terrains présentant une perméabilité à priori favorable à une épuration et une évacuation des eaux usées par le sol, la réalisation du test de percolation permet, de plus, d'examiner sur le terrain d'autres éléments intervenant sur la possibilité de mettre en place un épandage souterrain ; il s'agit :

- du niveau de remontée maximum de l'eau dans le sol (nappe phréatique ou nappe perchée) ;

- de la topographie du terrain.

Enfin, lorsque l'épandage souterrain est retenu, son dimensionnement doit tenir compte de la valeur de la perméabilité ainsi estimée

b. Appareillage pour la méthode à niveau constant : Pour la réalisation du test de percolation, l'appareillage suivant peut être préconisé :

- une réserve d'eau (environ 25 litres) ;
- une cellule de mesure (burette par exemple) ;
- un robinet "trois voies" pour un système manuel ou une électrovanne commandée par un système électronique 12 volts ;
- des tuyaux souples munis de raccords rapides ;
- une tige permettant de descendre le régulateur de niveau dans des trous forés pouvant atteindre 2 mètres de profondeur.

Les trous peuvent être réalisés avec une tarière à main.

c. Réalisation pour la méthode à niveau constant :

c.1 - Réalisation des trous : La profondeur du trou doit atteindre le niveau auquel serait placé l'épandage (50 à 70 cm en général).

Le nombre de trous de mesure dépend de l'homogénéité présumée du terrain ; il n'est pas souhaitable de descendre en dessous de trois points pour l'assainissement d'une maison d'habitation.

Dans le cas d'un sol argileux ou limoneux humide, les parois du trou sont scarifiées pour faire disparaître le lissage occasionné par la tarière, le fond du trou pouvant être garni d'une fine couche de graviers.

c.2 - Phase d'imbibition : Une phase préalable d'imbibition du terrain est nécessaire pendant une durée d'au moins quatre heures, la régulation du niveau étant directement reliée à la réserve d'eau.

En effet, la perméabilité mesurée se stabilise en général au bout de cette période.

c.3 - Phase de mesure : En fin de période d'imbibition, le régulateur de niveau est relié à la cellule de mesure. Avec le système automatique, le système électronique effectue les deux phases en l'absence d'opérateur. Les conditions expérimentales suivantes peuvent être proposées :

- diamètre du trou : 150 mm ;
- hauteur d'eau régulée : 150 mm ;
- durée du test : 10 minutes.

Dans cette hypothèse, la valeur de K peut être calculée de la manière suivante :

$$K \text{ (millimètres/heures)} = 6,79 \cdot 10^{-5} V$$

V : volume d'eau introduit en millimètres cubes

1.5- SLUG- TEST :

a. Principe : le Slug-test aussi nommé " essai d'injection relaxation" consiste à injecter de l'eau à débit constant pendant un temps déterminé, puis à stopper l'injection et à mesurer la relaxation de pression après fermeture. Cette méthode est fortement dépendante des moyens de mesures de pression et de débit, ce qui limite ce type d'essai à des zones de perméabilités de l'ordre des 10^{-10} m/s à 10^{-11} m/s pour du matériel conventionnel.

b. calcul de la perméabilité : durant tout le temps de l'essai, tous les paramètres sont enregistrés, pression d'injection, temps de l'injection (T_{inj}), volume injecté, puis mesure de la chute de pression en fonction de temps.

L'interprétation des mesures est effectuée en régime transitoire à l'aide de la méthode de Horner :

$$P(dt) = f \left[1 + \frac{inj}{dt} \right]$$

Où dt le temps de mesure à partir de la fermeture.

Des logiciels provenant du monde pétrolier et mis en œuvre par ME2i permettent l'interprétation de ces essais. Ils permettent de déterminer :

- si l'essai s'est déroulé dans de bonnes conditions ;
- si la paroi et éventuellement la boue de forage jouent un rôle dans la perméabilité mesurée ;
- si les conditions aux limites apparaissent, présence d'une interface, d'un deuxième régime de perméabilité, etc.

c. Exécution de l'essai : l'utilisation d'un obturateur ou de deux se fait dans les mêmes conditions que pour l'essai Lugeon, mais pour le Slug-test, on établit une pression, préalablement déterminée, par injection d'eau pendant un temps donnée. On note la quantité

d'eau injectée en fonction du temps en maintenant la pression constante, puis on coupe l'injection et on note la chute de pression en tête et au niveau de la chambre formée par l'obturateur.

1.6- PULSE-TEST :

a. Principe : l'évaluation de la faible perméabilité de certaines formations, pose quelques difficultés avec les méthodes classiques d'injection relaxation, en effet, il existe plusieurs limitations à ce type d'essai, telles que la nécessité de faire d'autant plus de mesures que la perméabilité est faible ; l'obligation d'utiliser les appareils de mesure de pression et de débit plus précis et, un enregistrement automatique (durée de l'essai nettement augmentée), d'où un coût de l'opération plus élevé.

C'est pour cette raison qu'une nouvelle méthode, appelée "pulse-test" a été introduite par Bredehoeft en 1980.

La méthode de "pulse-test" est essentiellement une dérivation du test d'injection conventionnel, la différence majeure étant l'absence de débit pendant la phase d'impulsion (fermeture quasi-instantanée du puits après ouverture) : l'interprétation mise en œuvre par ME2i s'effectue avec le même groupe de logiciel que ceux utilisés pour le Slug-test.

b. Exécution de l'essai : le même dispositif que pour le Slug-test est mis en place avec simple ou double obturateur. Chambre isolée, on établit une pression d'eau de 10 bars puis on ouvre la liaison avec la chambre pendant 10 à 15 secondes (attention de bien maintenir la pression constante pendant l'injection), on isole à nouveau la chambre puis on mesure la chute de pression. Il est indispensable d'utiliser un enregistrement automatique des mesures pendant les différentes phases, aussi bien en tête qu'au niveau de la chambre car il faut pouvoir mesurer la pression effective d'injection (et sa constance) et il faut pouvoir noter la pression dans les premières secondes qui suivent la fermeture des vannes et l'isolement de la chambre.

- **Quelques remarques sur les essais :** Les essais en transitoire (pulse-test et Slug-test) peuvent être mis en œuvre sans difficultés majeures. Il faut toutefois :
- Que le matériel soit bien adapté aux exigences de faible perméabilité ;
 - Que le personnel qui réalise les essais soit compétent et qu'il y ait une réelle complémentarité entre foreurs et mesureurs ;
 - Que les logiciels d'exploitation soient bien adaptés ;

- Tenir compte de l'augmentation du volume des chambres de mesure ;
- Tenir compte également de l'augmentation des devis d'essais lorsque l'on mesure des très faibles perméabilités (temps, matériels et personnels mis en œuvre).

2- ESSAIS AU LABORATOIRE :

2.1- OBJECTIF :

Pour l'interprétation des phénomènes observés in-situ, des expérimentations au laboratoire sont effectuées sur des échantillons de sols ou matériaux comparable à ceux testés sur terrain. Cette comparaison est indispensable pour valider certaines hypothèses et méthodes d'analyse des mesures brutes. Le dispositif de mesure de la perméabilité au laboratoire doit reproduire au mieux la configuration adoptée in-situ.

La théorie des essais de perméabilité est relativement simple, mais les difficultés pratiques généralement rencontrées limitent sérieusement la précision des résultats obtenus.

2.2- METHODE DE MESURES :

a. Principe d'un perméamètre : Un perméamètre est composé d'une enceinte étanche dans laquelle est placé un échantillon de sol de section S et de longueur L . les deux extrémités de l'échantillon sont reliées à deux tubes par l'intermédiaire de pierres poreuses.

b. perméamètre à charge constante : Il convient pour des sols très perméables. Pour exécuter l'essai, on crée un gradient hydraulique à l'intérieur de l'échantillon et l'eau s'écoule à travers le sol. La charge Δh reste constante et on mesure le débit d'eau qui passe à travers le sol pendant un temps donné.

On calcul alors K :

$$Q = K S \Delta h / L \rightarrow K = Q L / (S \Delta h)$$

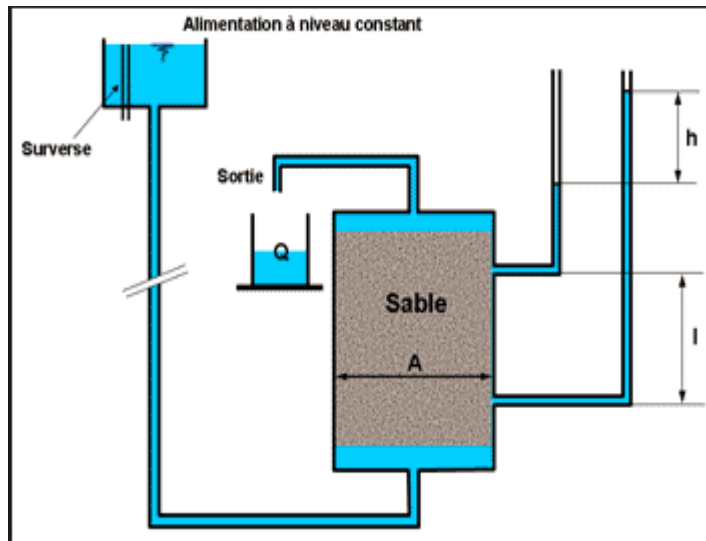


Figure (III-2): perméamètre à charge constante

- d. **Perméamètre à charge variable**: dans le perméamètre à charge variable le tube supérieur est rempli d'eau ; l'essai consiste à mesurer la baisse de son niveau en fonction du temps.

$$Q = KA \frac{h}{L} = -a \frac{dh}{dt} = -\frac{A}{a} K \frac{dh}{dt}$$

D'où

$$\ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right) = -\frac{AK}{aL} (t-t_0)$$

Avec :

A = section de l'échantillon

a = section de tube fin supérieur

h_2 = hauteur d'eau initiale

h_1 = hauteur d'eau finale

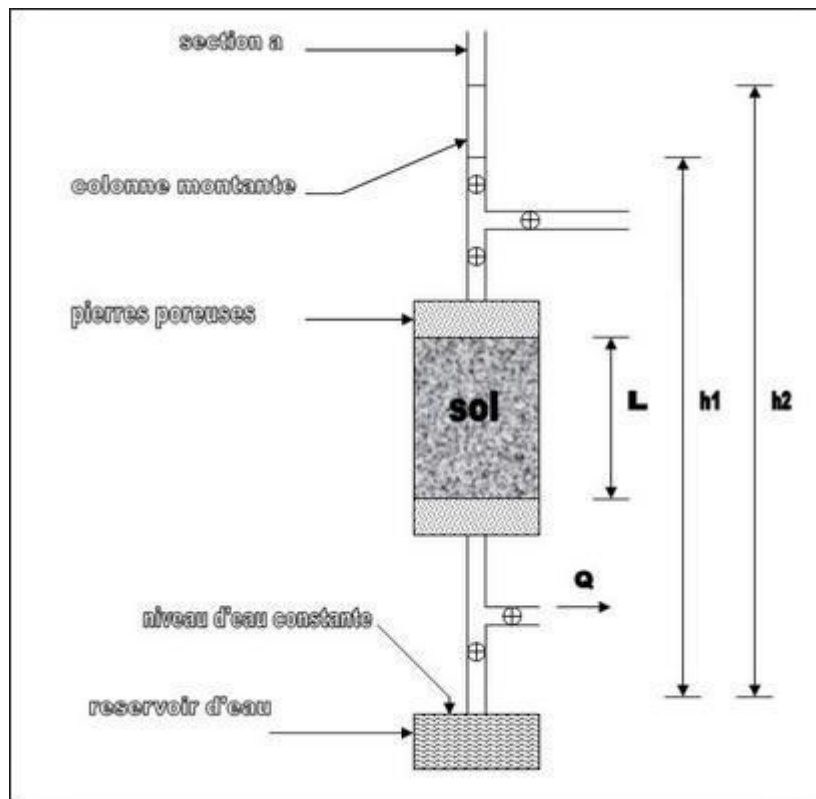


Figure (III-3): Perméamètre à charge variable

d.Oedo-perméamètre :

L'échantillon est enfermé au centre de la cellule entre deux pierres poreuses. La partie supérieure de la cellule est composée d'un piston qui permet de laisser libre le gonflement ou éventuellement d'appliquer une contrainte sur l'éprouvette.

Après saturation et consolidation sous une contrainte donnée, la mesure de la perméabilité peut être effectuée de deux manières :

Soit à charge constante, en régime permanent ; on applique une différence de charge entre les deux faces de l'éprouvette et on mesure le débit qui traverse celle-ci en régime permanent (loi de Darcy).

Soit à charge variable, on applique au moyen d'une burette une charge sur l'une des faces de l'éprouvette, l'autre étant drainée à pression atmosphérique. La charge va diminuer progressivement jusqu'à l'obtention d'une charge nulle. Le volume écoulé par unité de temps

et par unité de surface de l'éprouvette, est proportionnel au gradient hydraulique. On doit vérifier également que les débits entrant et sortant sont égaux.

- e. **Perméamètre radial** : pour les roches, cet essai consiste à injecter sous pression de l'eau dans la partie centrale d'un cylindre de roche ou à l'extérieur de celui-ci.

3- FORMULES EMPIRIQUES UTILISEES POUR LE CALCUL DE LA PERMEABILITE

DES SOLS :

Plusieurs formules ont été éditées reliant la perméabilité des sols, particulièrement les sables, à leurs caractéristiques de dimension particulière et à d'autres données de classification.

Selon le type de sol examiné, les valeurs de la perméabilité K peuvent changer tout à fait considérablement. Des valeurs typiques pour différents types de sol sont indiquées dans la figure ci-dessous :

Permeability (m/s)												
	10^0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}
Drainage	Good						Poor		Practically impervious			
Soil Types	Clean gravel	Clean sands, clean sand & gravel mixtures				Very fine sands, organic & inorganic silts, mixtures of sand silt & clay, glacial till, stratified clay deposits, etc.				Impervious soils e.g., homogeneous clays below zone of weathering		
					"Impervious" soils modified by effects of vegetation & weathering							

Figure III.4: caractéristique de la perméabilité et de drainage des sols

(Terzaghi et al, 1996)

Darcy a étudié la première fois les propriétés d'écoulement de l'eau dans le sable en 1856. Il a développé le rapport reliant la perméabilité, la vitesse de décharge et le gradient hydraulique d'un sol, dans un milieu granulaire poreux, dans les conditions régulières et l'écoulement laminaire comme suit :

$$V = ki$$

Où,

V = vitesse de décharge

k = coefficient de perméabilité

i = gradient hydraulique (chute dans la tête hydraulique par unité de longueur)

Hansbo (1960), Holtz et Broms (1972) ont constaté qu'il y avait une déviation de la loi de Darcy pour l'argile. C'est contrairement à Mitchell (1976) qui on passé en revue un certain nombre d'investigations concernant l'application de la loi de Darcy et ont déclaré " la loi de Darcy est valide, même pour les sols granuleux fins à de bas gradients hydrauliques ". Mitchell (1976) a cité les difficultés liées à obtenir des valeurs fiables de perméabilité, examinant les matériaux de perméabilité très faibles, dans des conditions de laboratoire comme source principale de déviation. Le déplacement d'air enfermé, la migration des fines et les variations de ma température des essais sur une longue période sont seulement certains des problèmes significatifs qui le rendent difficiles d'obtenir des résultats fiables.

4- CONCLUSION :

Les mathématiques ne résolvent pas tout, et qu'il est toujours plus difficile d'analyser un phénomène pour en dégager des hypothèses réalistes que d'effectuer un savant calcul.

En hydraulique souterraine, plus encore peut- être que dans les autres disciplines du génie civil, le dernier mot devra rester à l'expérience car, la pensée purement logique ne peut nous donner aucune connaissance du monde de l'expérience. Toute connaissance au sujet de la réalité commence avec l'expérience et se termine en elle.

Chapitre IV

MATERIAUX DE L'ETUDE ET LEUR IDENTIFICATION

1- INTRODUCTION :

Pour effectuer cette étude, des échantillons de sable ont été prélevés dans différents sites :

Sable d'oued, sable de mer.

Le sable, est un matériau granulaire constitué des petits éléments (provenant de la désagrégation d'autres roches) dont la dimension est comprise entre 0,063 et 2 mm selon la définition des matériaux granulaires en géologie. Un élément individuel est appelé grain de sable. La composition du sable peut révéler jusqu'à 180 minéraux différents. Les principaux sont le quartz, les micas et les feldspaths, ainsi que les débris calcaires de coquillage et de corail.

2- DISCRIPTION DES SABLES CHOISIS :

Un sable peut être défini par différentes caractéristiques qu'on peut citer ci-dessous :

▪ Caractéristiques avant le prélèvement :

-indice des vides

-porosité

-état de comportement

-contraintes in situ

-poids volumique humide

-la densité

-la minéralogie

▪ Caractéristiques après le prélèvement :

-forme des grains

-indice des vides et porosité

-la rugosité

-l'état de surface

-les différents poids volumiques

-la teneur en eau

-le degré de saturation

-la granulométrie

Dans cette étude, les facteurs importants sont la porosité, l'indice des vides, les poids volumiques des différents échantillons, la densité, la forme des grains et la granulométrie.

3- ORIGINE DE PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS DE L'ETUDE :

Les sables utilisés pour cette étude proviennent des origines différentes à savoir :

-Le Sable fin est d'origine de boussaada

-Les Sables moyen et grossier proviennent de la sablière de BAGHLIA de l'Oued SEBAOU situé à 40 Km à l'ouest de la ville de Tizi-Ouzou.

4- IDENTIFICATION DES MATERIAUX D'ETUDE :

Les échantillons ont été soumis au séchage dans une étuve à la température de 105°C pendant 24 heures. Par la suite, une étude d'identification a été réalisée. Cette étude comporte les essais suivants :

- Analyse granulométrique NF P 18.560 (sep.1990).
- Masse volumique.
- Densité apparente des sables.
- Porosité et degré de saturation.
- Indice des vides.
- Equivalent de sable NF EN 933.8 (AOUT 1999).

4.1- ANALYSE GRANULOMETRIQUE :

L'analyse granulométrique traduit la distribution pondérale des grains par classe granulaire.

La classe granulométrique définit des dimensions d'ouverture de mailles carrées avec des conditions déterminées des tamis et de refus. L'essai a été réalisé selon les modalités de la norme NFP 18-560.

Le résultat d'analyse granulométrique des sables est récapitulé dans les tableaux suivants :

Ouverture des tamis [mm]	Poids [g]	Pourcentage [%]	
	Refus Cumulés	Refus Cumulés	Passants
6,3	0,00	0,00	100
5	276,058	7,90	92,09
2	1883,087	53,95	46,04
1,25	2445,964	70,07	29,92
0,63	3256,767	93,30	6,69
0,315	3410,521	97,71	2,28
0,16	3461,939	99,18	0,81
0,08	3490,194	99,99	0,003
Fond			

Tableau IV.1 : Analyse granulométrique du sable S 0/5

Ouverture des tamis [mm]	Poids [g]	Pourcentage [%]	
	Refus Cumulés	Refus Cumulés	Passants
5	0,00	0,00	100
2,5	35,53	1,08	98,91
2	915,67	27,93	72,06
1,25	1169,67	36,79	63,20
0,63	2393,212	73,02	26,97
0,315	2944,031	89,82	10,17
0,16	3189,816	97,32	2,67
0,08	3264,197	99,59	0,40

Tableau IV.2 : Analyse granulométrique du sable S 0/2

Ouverture des tamis [mm]	Poids [g]	Pourcentage [%]	
	Refus Cumulés	Refus Cumulés	Passants
1	0,00	0,00	100
0,63	33,346	1,22	98,77
0,400	269,968	9,91	90,08
0,315	501,098	18,40	81,59
0,200	2213,658	81,32	18,67
0,16	2464,557	90,53	9,46
0,08	2713,958	99,69	0,30

Tableau IV.3 : Analyse granulométrique du sable S 0/1

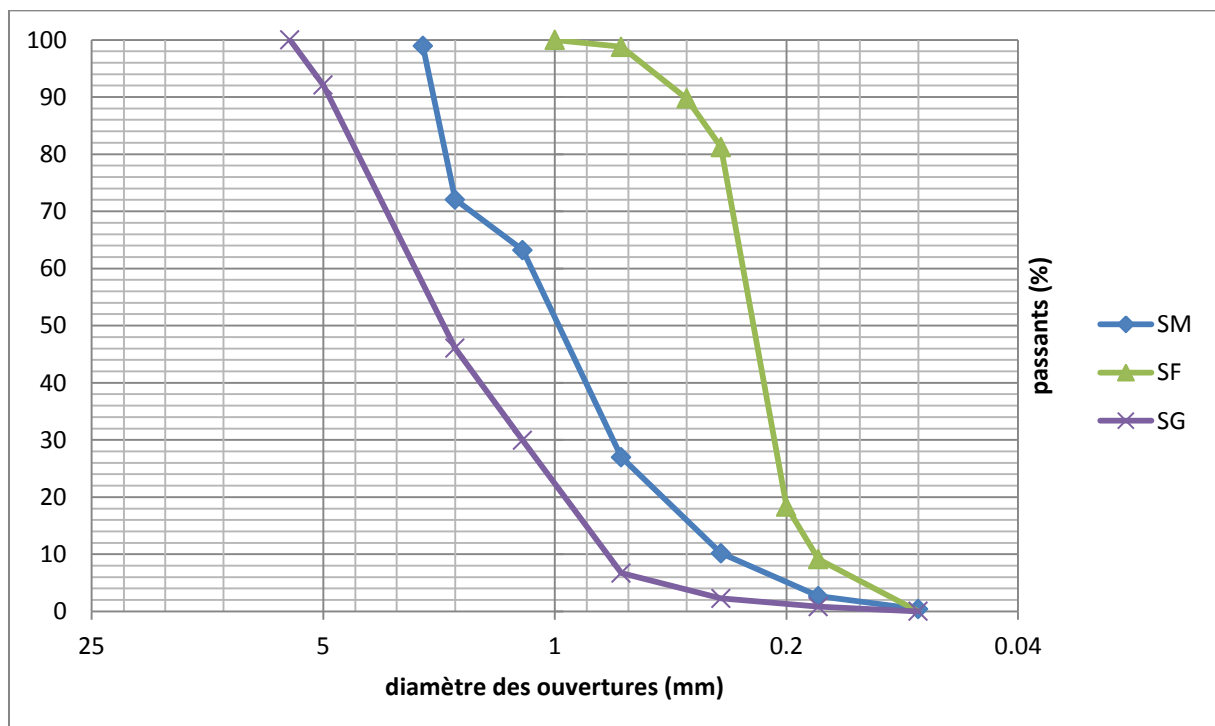
4.1.1- TRAÇAGE DE LA COURBE GRANULOMETRIQUE :

Figure IV.1 : courbe d'analyse granulométrique

A partir de cette courbe, on peut déterminer :

-le coefficient d'uniformité de HAZEN :

$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$ qui caractérise la pente de la courbe granulométrique.

-le coefficient de courbure :

$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \times d_{10}}$ qui caractérise la forme la plus ou moins régulière de la courbe.

Avec :

d_{10} : diamètre correspondant à 10% des passants

d_{30} : diamètre correspondant à 30% des passants

d_{60} : diamètre correspondant à 60% des passants

	d_{10}	d_{30}	d_{60}	C_u	C_c
Sable fin	0,1	0,24	0,35	3,5	1,64
Sable moyen	0,42	0,8	1,6	3,8	0,95
Sable grossier	0,8	1,62	3,8	4,75	0,86

Tableau IV -4 : valeurs de C_u et C_c

4-2 : LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE:

La masse volumique apparente est définie comme le rapport de la masse sèche de l'échantillon sur le volume occupé par la matière solide et les vides qu'elle contient.

$$\rho = m/v$$

$$V = S \times H$$

$$S = \pi D^2/4 = 3.14 \times 8^2/4 = 50,24 \text{ cm}^2$$

$$H = 23,5 \text{ cm}$$

Donc :

$$V = 50,24 \times 23,5 = 1180,64 \text{ cm}^3$$

Sable fin :

$$m_{\text{sable fin}} = 2015,954 \text{ g}$$

$$\rho = 2015.954 / 1180,64 = 1,707 \text{ g/cm}^3$$

Sable moyen :

$$m_{\text{sable moyen}} = 1955,371 \text{ g}$$

$$\rho = 1955,371 / 1180,64 = 1,656 \text{ g/cm}^3$$

Sable grossier :

$$m_{\text{sable grossier}} = 1883,885 \text{ g}$$

$$\rho = 1883,885 / 1180,64 = 1,595 \text{ g/cm}^3$$

Classe granulaire	Masse vol. apparente (g/cm ³)
Sable fin	1,707
Sable moyen	1,656
Sable grossier	1,595

Tableau IV -5 : masses volumiques des sables

4-3 : LA DENSITE :

La densité est l'un des paramètres les plus importants dans les études portant sur la structure du sol. Elle est en effet liée à la nature et à l'organisation du sol. Elle permet en outre, de calculer la porosité et d'apprécier ainsi indirectement la perméabilité, la résistance à la pénétration des racines, la cohésion des horizons et la réserve en eau du sol.

Densité apparente = masse volumique du sol = poids sec sol / volume cylindre (en g/cm³)

Classe granulaire	Densité. apparente (sans compactage (g/cm ³))	Densité apparente (avec compactage (g/cm ³))
Sable fin	1,707	1,714
Sable moyen	1,656	1,733
Sable grossier	1,595	1,763

Tableau IV -6 : densité apparente des sables

4.4- LA POROSITE :

La porosité (n) est un indice de volume relatif des pores dans le matériau. La porosité d'un sol est toujours inférieure à 1, sa valeur varie généralement entre 0,3 et 0,6 (Hillel, 1988). Elle est définie comme le rapport entre le volume des vides et le volume total.

$$n = \frac{V_v}{V}$$

La porosité n'est qu'un facteur quantitatif de la fraction de ses pores et ne donne aucun renseignement sur la géométrie et la distribution des ses pores qui est une propriété importante du matériau qui conditionne l'écoulement.

-Mesure de la porosité :

- 1- mettre le sable dans un récipient gradué jusqu'à la graduation 350 ml ;
- 2-verser l'eau dans une éprouvette graduée jusqu'à la graduation 100 ml ;
- 3-calculer la porosité du matériau en divisant le volume d'eau versé dans le récipient par le volume total du matériau, ensuite exprimer le résultat obtenu en pourcentage.



Sable fin



sable moyen



sable grossier

Figure IV.2 : Essais de porosité

Type de matériau	Volume de matériau (ml)	Volume d'eau (espace poreux (ml))	Pourcentage d'espace poreux (porosité %)
Sable fin	350	94	26,85
Sable moyen	350	100	28,57
Sable grossier	350	109	31,14

Tableau IV.7 : la porosité des sables

4.5- INDICE DES VIDES :

L'indice des vides calcule un rapport entre le volume des vides et le volume des particules solides dans un échantillon donné de milieu poreux, perméable, semi-perméable ou hermétique.

Et aussi la relation qui relie l'indice des vides et la porosité est :

$$n = \frac{e}{e+1} \rightarrow e = \frac{n}{1-n}$$

Type de matériau	Porosité (%)	Indice des vides (e)
Sable fin	26,85	0,36
Sable moyen	28,57	0,39
Sable grossier	31,14	0,45

Tableau IV.8 : indice des vides des sables

4.6- DEGRE DE SATURATION :

Le rapport du volume de l'eau dans une masse donnée de sol au volume de vide inter granulaire, exprimé en pourcentage.

$$S = \frac{V_w}{V_v}$$

4.7- PROPRETE (EQUIVALENT DE SABLE) :

L'équivalent de sable est un indicateur, utilisé en géotechnique, caractérisant la propreté d'un sable ou d'une grave. Il indique la teneur en éléments fins, d'origine essentiellement argileuse, végétale ou organique à la surface des grains. Ce terme désigne également l'essai qui permet de déterminer cet indicateur. On parle d'« essai d'équivalent de sable piston » ou, plus simplement, d'« essai d'équivalent de sable »

L'essai est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis de 2 mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent. La valeur de l'équivalent de sable ES est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée, à la hauteur totale du floculat et la partie sableuse sédimentée.

4.7.1- PRINCIPE DE L'ESSAI :

L'essai consiste à verser un échantillon de sable et une petite quantité de solution flocculante dans un cylindre gradué et d'agiter de façon à détacher les revêtements argileux des particules de sable de l'échantillon. On complète alors le sable en utilisant le reste de solution flocculante afin de faire remonter les particules de fines en suspension au-dessus du sable. Après 20 min, les hauteurs des produits sont mesurées. L'équivalent de sable est le rapport hauteur du sable sur hauteur totale, exprimé en pourcentage.

4.7.2- APPAREILLAGE :

Figure IV. 3 : appareil de l'équivalent de sable

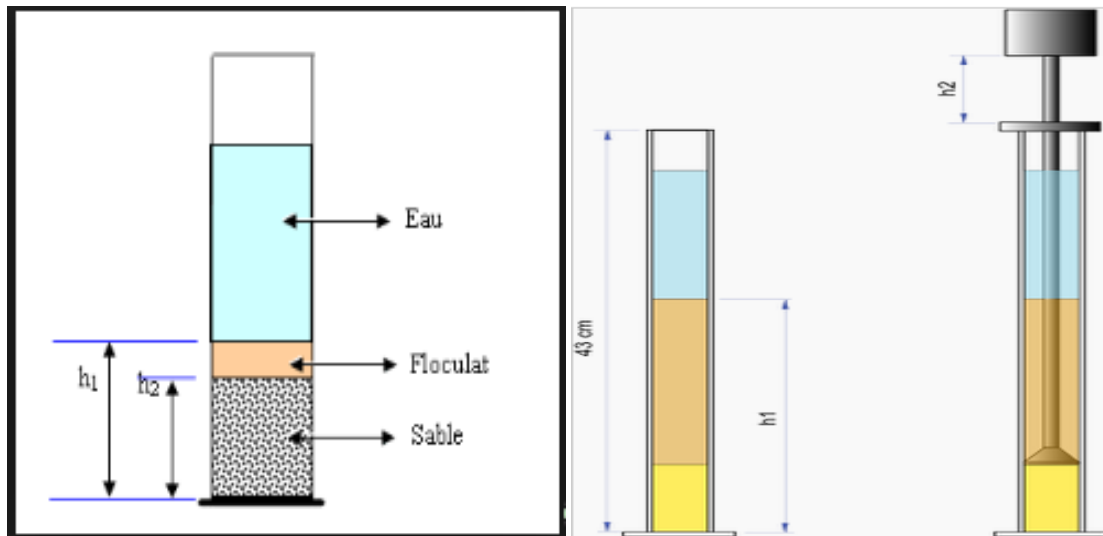


Figure IV.4 : essai de l'équivalent de sable

Donc : $ESP = h_2/h_1 \times 100$

Les résultats des essais réalisés au laboratoire sur des échantillons de sables sont présentés dans les tableaux ci-dessous:

Fraction granulaire	h_1	h_2	h_1/h_2	ESP
Sable fin	9,2	7,3	0,79	79,0
Sable moyen	7,1	5,1	0,71	71,0
Sable grossier	8,4	6,3	0,75	75,0

Tableau IV.9 : résultats de l'essai de l'équivalent de sable

Fraction granulaire	ESP	Valeur spécifiée (%)
S1 (fin)	79,0	ESP >65
S2 (moyen)	71,0	ESP >65
S3 (grossier)	75,0	ESP >65

Tableau IV.10 : valeurs de ESP

D'après les résultats de cet essai, nous constatons que le sable est un Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses.

4.8-CONCLUSION :

Les essais d'identification permettent de classer les sols, et les reconnaître plus facilement, ils sont simples et peu coûteux.

Chapitre V

ETUDE EXPERIMENTALE ET ANALYTIQUE DE LA PERMEABILITE

1 - INTRODUCTION :

Les essais de perméabilités sont effectués sur différentes tailles de grains, sable fin, sable moyen et sable grossier. Ils ont été réalisés au laboratoire de recherche L.G.E.A de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Un perméamètre à charge constante a été utilisé, pour tenir compte de la grosseur des grains de sable et de leur forme.

2 - L'ESSAI DE PERMEABILITE A CHARGE CONSTANTE :

L'essai de perméabilité à charge constante convient aux sols assez perméables comme les sables. Suivant la norme ASTM D2434 qui le décrit, cet essai doit satisfaire les conditions suivantes :

- L'écoulement d'eau à travers l'échantillon de sable est laminaire et permanent, de telle sorte que la vitesse d'écoulement de l'eau reste proportionnelle au gradient hydraulique i .
- L'échantillon de sable est saturé et ne subit pas de changement de volume durant l'essai.
- La perte de charge Δh demeure constante.

3 - LES ETAPES DE DEROULEMENT DES ESSAIS :

L'essai s'effectue en trois étapes qui sont :

- 1-la mise en place de l'échantillon de sable dans le moule de perméamètre.
- 2-la saturation de l'échantillon de sable.
- 3-la détermination du coefficient de perméabilité.

- La mise en place de l'échantillon de sable dans le moule de perméamètre :

On effectue l'essai de perméabilité à charge constante sur des échantillons de sable représentatif (fin, moyen, grossier), lavé et séché à l'air libre.

On dépose un papier filtre à la base du moule de perméamètre, afin de limiter le passage des grains de sable causé par le passage de l'eau.

On place notre échantillon de sable dans le moule de perméamètre à charge constante jusqu'à l'occupation de tout le volume de moule.

On complète le montage en insérant la tête du perméamètre (moule) et en fixant fermement celle-ci avec des écrous.

- La saturation de l'échantillon de sable :

La présence des bulles d'air dans les vides des échantillons de sable, compte tenue des faibles dimensions de l'échantillon dans le perméamètre, à pour effet d'abaisser la valeur de coefficient de perméabilité. Pour éliminer ces bulles, on doit saturer l'échantillon de sable. Quand le perméamètre est installé, on branche son entrée d'eau au réservoir à charge constante et on complète la saturation en ouvrant la valve d'alimentation pour remplir le réservoir à charge constante.

- La détermination du coefficient de perméabilité

Lorsque l'échantillon de sable est saturé, on dégage la pince qui bloque la sortie d'eau en tenant compte de garder le niveau d'eau constant dans le réservoir à l'aide d'un trop plein. On mesure ensuite la perte de charge (Δh) en tenant compte des caractéristiques de montage du perméamètre utilisé.

Pour déterminer le débit de l'écoulement, on mesure le temps requis (Δt) pour recueillir un volume d'eau donné (v) par l'intermédiaire d'un récipient gradué placé directement sous la sortie d'eau

4 - DESCRIPTION DE L'APPAREIL :

La perméabilité des sols est un facteur très important pour étudier les comportements des sols en place par rapports aux écoulements d'eau. Cet appareil est adapté pour les sols grossiers, tels que sables et gravier. L'éprouvette est obtenue dans une cellule acrylique perméable. On passe l'eau à travers cette cellule qui est connectée à un réservoir d'eau constant. La cellule de perméabilité a 3 positions de prise de pression, qui sont connectées au tube du manomètre, fixé sur le bâti et ayant une échelle graduée. Deux cellules à charge constante sont disponibles Ø 80 et Ø114 mm

- La cellule utilisée pour les essais effectués dans ce travail est celle $\varnothing$ de 80 mm :

Cylindre en plexyglass acrylique $\varnothing$ 80 mm intérieur, retenu entre deux plaques non métalliques et pourvu de 3 points de mesure de pression (1,2 et 3), poids 3 kg.

- Tubes manométriques et support métallique :

Composés de 3 tubes en verre avec raccords et connexions, à diamètre constant, échelle métrique et tubes de raccordement. Le tout monté sur un bâti stable.

Dimensions 210x50x1160 mm, poids 5 kg.

- Réservoir à niveau constant :

Fabriquée en plexyglass acrylique, avec tubes de trop-plein, réglable en hauteur en relation avec le réservoir. Poids 3 kg.



Figure V.1 : Perméamètre à charge constante

5 - BUT DE L'ESSAI :

Déterminer au laboratoire le coefficient de perméabilité à l'eau, des sols saturés en utilisant la méthode de perméamètre à charge constante.

6 -MATERIEL UTILISE :

-perméamètre à tubes piézométriques en verre à niveau constant.

-chronomètre pour déterminer le temps d'écoulement.

-l'échantillon de sable.

-deux éponges ou pierre poreuse pour filtrer l'eau.

-un récipient gradué pour mesurer le volume d'eau.

7 -MODE OPERATOIRE :

-on commence par amener l'échantillon à la saturation.

-ouvrir le robinet de perméamètre.

-rajout d'eau pour garder le niveau d'eau constant.

-après quelque temps, arrêter le chronomètre et mesurer le volume de l'eau ayant traversé l'échantillon et lire Δh .

8 -PRESENTATION DES RESULTATS :

Les essais de perméabilité sont effectués sur différents types de sable. Les matériaux sont mis en place sans compactage puis avec un compactage manuel à l'aide d'un outil à base circulaire après déversement sous forme de couche permettant un meilleur réarrangement des grains. Trois types de sable ont été utilisés (fin, moyen et grossier) et d'après les résultats obtenus dans le chapitre précédent, la porosité résultant des accroissements de densité apparente nous renseigne sur la réduction de l'espace poral dans le sol, ainsi que la diminution de coefficient de perméabilité comme les indiquent les figures ci-dessous :

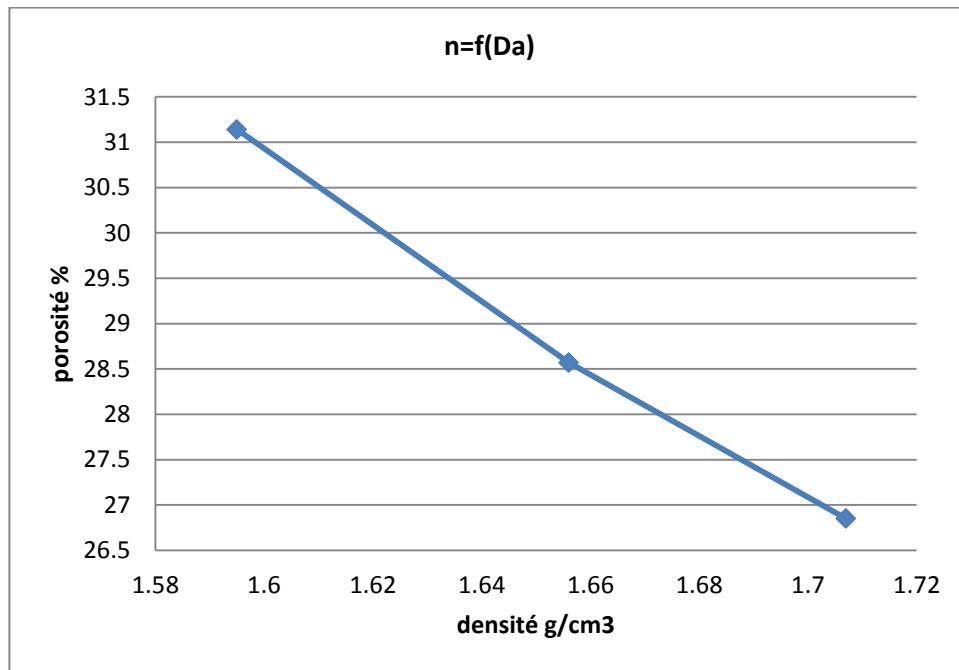


Figure V.2 : variation de la porosité en fonction de la densité apparente

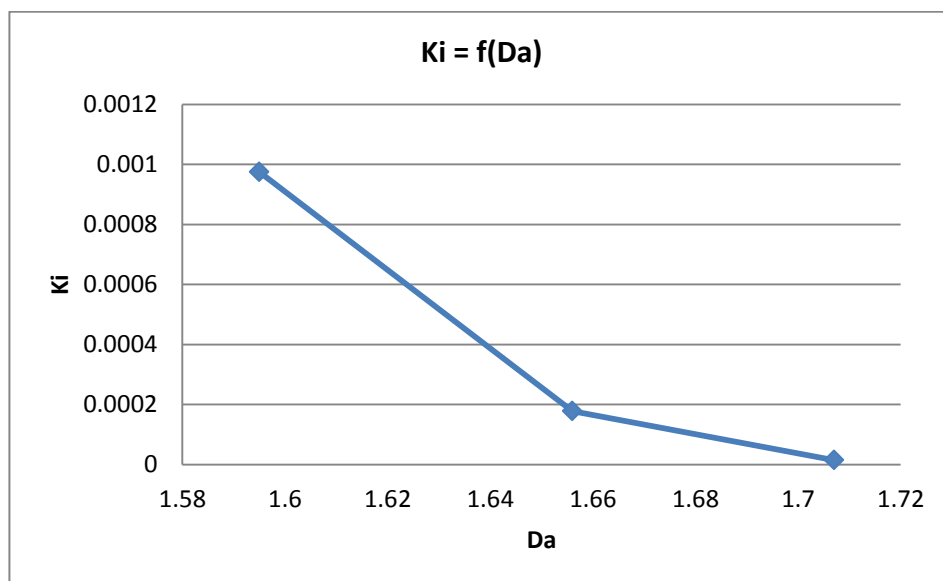


Figure V.3 : coefficients de perméabilité (k_i) en fonction des densités apparentes (D_a) des sables non compactés

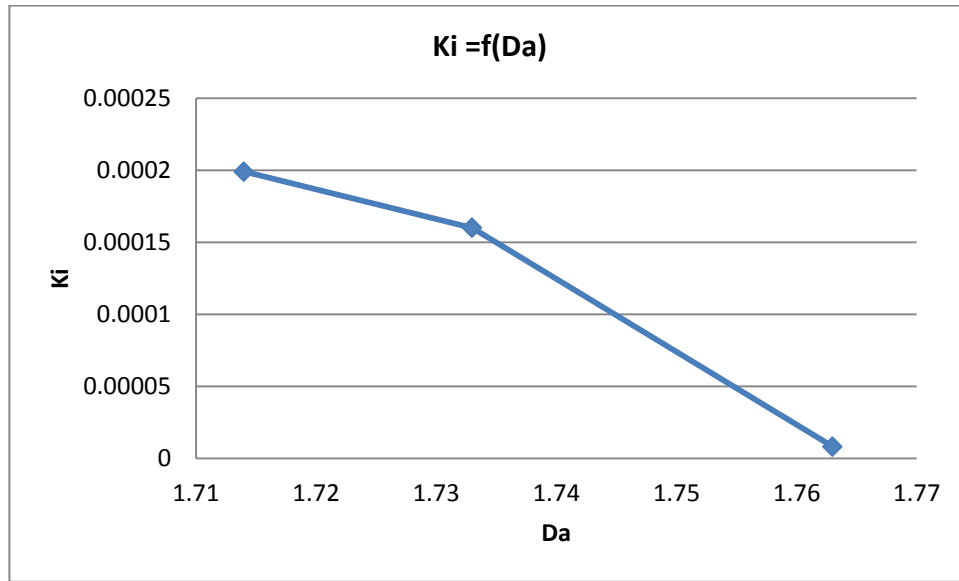


Figure V.4 : coefficients de perméabilité (Ki) en fonction des densités apparentes (Da) des sables compactés

Les résultats obtenus des essais sont présentés ci-après, avec :

$$Q = 600\text{ml} = 0,6\text{l} = 0,6\text{kg}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3,14 \times 8^2}{4} = 50,24\text{cm}^2$$

$$K = \frac{ql}{\Delta h A}$$

$l_{1-2} = 7\text{cm}$; $l_{2-3} = 7\text{cm}$; $l_{1-3} = 14\text{cm}$ avec l_{1-2} , l_{2-3} et l_{1-3} représentent les distances entre chaque deux points de perméamètre.

8.1- COUCHE UNIQUE :**8.1.1- ESSAIS SANS COMPACTAGE :**• **Sable fin:**

essai	Δh (cm)			t(s)			l(cm)			A(cm ²)	Q(kg)	q(kg/s)			k _i (cm/s)			k(cm/s)
	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3									
1	6,3	34,5	32,7	327	274	348	7	7	14	50,24	0,6	0,00183	0,00219	0,001724	4,06E-05	8,84E-06	1,47E-05	2,14E-05
2	14,6	33,8	32,1	343	315	352	7	7	14	50,24	0,6	0,00175	0,0019	0,001705	1,67E-05	7,85E-06	1,48E-05	1,31E-05
3	24,2	32,1	32,6	341	325	352	7	7	14	50,24	0,6	0,00176	0,00185	0,001705	1,01E-05	8,01E-06	1,46E-05	1,46E-05

Tableau V-1 : Essais de perméabilité sur sable fin non compacté• **Sable moyen :**

essai	Δh (cm)			t(s)			l(cm)			A(cm ²)	Q(kg)	q(kg/s)			k _i (cm/s)			k(cm/s)
	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3									
1	2,6	3,1	6	171	201	179	7	7	14	50,24	0,6	0,00351	0,00299	0,003352	0,000188	0,000134	0,000156	0,000159
2	2,4	2,9	4,1	168	175	183	7	7	14	50,24	0,6	0,00357	0,00343	0,003279	0,000207	0,000165	0,000223	0,000198
3	3,5	3,9	5,2	170	192	207	7	7	14	50,24	0,6	0,00353	0,00313	0,002899	0,000155	0,000112	0,000155	0,000141

Tableau V-2 : Essais de perméabilité sur sable moyen

- **Sable grossier :**

essai	$\Delta h(\text{cm})$			t(s)			l(cm)			A(cm ²)	Q(kg)	q(kg/s)			k _i (cm/s)			k(cm/s)
	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3									
1	1,3	2,2	0,2	322	301	329	7	7	14	50,24	0,6	0,00186	0,00199	0,001824	0,0002	0,000126	0,002541	0,000956
2	2,5	2,2	2,1	325	315	328	7	7	14	50,24	0,6	0,00185	0,0019	0,001829	0,000103	0,000121	0,000243	0,000155
3	2,1	2,3	4,1	210	245	289	7	7	14	50,24	0,6	0,00286	0,00245	0,002076	0,000141	0,000148	0,000141	0,000144

Tableau V-3 : Essais de perméabilité sur sable grossier

8.1.2- ESSAIS AVEC COMPACTAGE :

- **Sable fin:**

essai	$\Delta h(\text{cm})$			t(s)			l(cm)			A(cm ²)	Q(kg)	q(kg/s)			k _i (cm/s)			k(cm/s)
	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3									
1	2,3	17,4	12,4	1339	1219	1589	7	7	14	50,24	0,6	0,00045	0,00049	0,000378	2,71E-05	3,94E-06	8,49E-06	1,32E-05
2	6,3	15,3	12,6	1322	1215	1566	7	7	14	50,24	0,6	0,00045	0,00049	0,000383	1E-05	4,5E-06	8,47E-06	7,67E-06
3	5,8	15,8	14,4	1345	1239	1571	7	7	14	50,24	0,6	0,00045	0,00048	0,000382	1,07E-05	4,27E-06	7,39E-06	7,39E-06

Tableau V-4 : Essais de perméabilité sur sable fin compacté

- **Sable moyen :**

essai	$\Delta h(\text{cm})$			$t(\text{s})$			$l(\text{cm})$			$A(\text{cm}^2)$	$Q(\text{kg})$	$q(\text{kg/s})$			$k_i(\text{cm/s})$			$k(\text{cm/s})$
	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3									
1	0,8	1,5	1,2	813	616	760	7	7	14	50,24	0,6	0,00074	0,00097	0,000789	0,000129	9,05E-05	0,000183	0,000134
2	1,1	1,5	1,2	807	679	788	7	7	14	50,24	0,6	0,00074	0,00088	0,000761	9,42E-05	8,21E-05	0,000177	0,000118
3	0,9	1,9	1,8	798	648	769	7	7	14	50,24	0,6	0,00075	0,00093	0,00078	0,000121	6,79E-05	0,000121	0,000103

Tableau V-5 : Essais de perméabilité sur sable moyen compacté

- **Sable grossier :**

essai	$\Delta h(\text{cm})$			$t(\text{s})$			$l(\text{cm})$			$A(\text{cm}^2)$	$Q(\text{kg})$	$q(\text{kg/s})$			$k_i(\text{cm/s})$			$k(\text{cm/s})$
	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3									
1	1,9	1,6	1,9	377	423	360	7	7	14	50,24	0,6	0,00159	0,00142	0,001667	0,000117	0,000124	0,000244	0,000162
2	2,4	2,1	2	343	398	376	7	7	14	50,24	0,6	0,00175	0,00151	0,001596	0,000102	0,0001	0,000222	0,000141
3	2,1	1,7	3,4	320	345	374	7	7	14	50,24	0,6	0,00188	0,00174	0,001604	0,000124	0,000143	0,000131	0,000133

Tableau V-6 : Essais de perméabilité sur sable grossier compacté

8.2 - SABLES STRATIFIES :**8.2.1- STRATIFICATION VERTICALE :****8.2.1.1- ESSAIS SANS COMPACTAGE :**

essai	$\Delta h(\text{cm})$			$t(\text{s})$			$l(\text{cm})$			$A(\text{cm}^2)$	$Q(\text{kg})$	$q(\text{kg/s})$			$k_i(\text{cm/s})$			$k(\text{cm/s})$
	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3									
1	9,9	17,2	16,3	147	177	147	7	7	14	50,24	0,6	0,00408	0,00339	0,004082	5,74E-05	2,75E-05	6,98E-05	5,16E-05
2	10,5	16,4	16,8	151	169	149	7	7	14	50,24	0,6	0,00397	0,00355	0,004027	5,27E-05	3,02E-05	6,68E-05	4,99E-05
3	9,1	16,1	17,1	150	167	152	7	7	14	50,24	0,6	0,004	0,00359	0,003947	6,12E-05	3,11E-05	6,43E-05	5,22E-05

Tableau V-7: Essais de perméabilité sur sable stratifié (fin-moyen-gros)

essai	$\Delta h(\text{cm})$			$t(\text{s})$			$l(\text{cm})$			$A(\text{cm}^2)$	$Q(\text{kg})$	$q(\text{kg/s})$			$k_i(\text{cm/s})$			$k(\text{cm/s})$
	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3									
1	11	16,2	18,3	473	471	487	7	7	14	50,24	0,6	0,00127	0,00127	0,001232	1,61E-05	1,1E-05	1,88E-05	1,53E-05
2	9,9	15,9	18,1	467	464	498	7	7	14	50,24	0,6	0,00128	0,00129	0,001205	1,81E-05	1,13E-05	1,85E-05	1,6E-05
3	13	19,6	22	482	475	502	7	7	14	50,24	0,6	0,00124	0,00126	0,001195	1,33E-05	8,98E-06	1,51E-05	1,25E-05

Tableau V-8 : Essais de perméabilité sur sable stratifié (moyen-fin-gros)

essai	$\Delta h(\text{cm})$			t(s)			l(cm)			A(cm ²)	Q(kg)	q(kg/s)			ki(cm/s)			k(cm/s)
	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3			p1-2	p2-3	p1-3	p1-2	p2-3	p1-3	
1	13,8	16,1	15,2	492	471	509	7	7	14	50,24	0,6	0,00122	0,00127	0,001179	1,23E-05	1,1E-05	2,16E-05	1,5E-05
2	11,1	16,1	15,6	482	469	501	7	7	14	50,24	0,6	0,00124	0,00128	0,001198	1,56E-05	1,11E-05	2,14E-05	1,6E-05
3	14,3	15,2	13,3	495	481	506	7	7	14	50,24	0,6	0,00121	0,00125	0,001186	1,18E-05	1,14E-05	2,48E-05	1,6E-05

Tableau V-9 : Essais de perméabilité sur sable stratifié (grossier-moyen-fin)

8.2.1.2- ESSAIS AVEC COMPACTAGE :

	$\Delta h(\text{cm})$			t(s)			l(cm)			A(cm ²)	Q(kg)	q(kg/s)			ki(cm/s)			k(cm/s)
	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3									
1	3,5	7,8	4,4	516	416	580	7	7	14	50,24	0,6	0,00116	0,00144	0,001034	4,63E-05	2,58E-05	6,55E-05	4,59E-05
2	3,1	7,6	5,8	525	433	588	7	7	14	50,24	0,6	0,00114	0,00139	0,001386	5,14E-05	2,54E-05	6,66E-05	4,78E-05
3	2,8	8,1	6,1	518	438	579	7	7	14	50,24	0,6	0,00116	0,00137	0,00137	5,76E-05	2,36E-05	6,26E-05	4,79E-05

Tableau V-10 : Essais de perméabilité sur sable stratifié compacté (fin-moyen-grossier)

essai	Δh(cm)			t(s)			l(cm)			A(cm2)	Q(kg)	q(kg/s)			ki(cm/s)			k(cm/s)
	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3									
1	9,8	10,1	15,6	744	794	729	7	7	14	50,24	0,6	0,00081	0,00076	0,000823	1,15E-05	1,04E-05	1,47E-05	1,22E-05
2	9,9	10,4	18,1	738	778	725	7	7	14	50,24	0,6	0,00081	0,00077	0,000828	1,14E-05	1,03E-05	1,27E-05	1,15E-05
3	11,1	12,8	17,2	749	789	732	7	7	14	50,24	0,6	0,0008	0,00076	0,00082	1,01E-05	8,28E-06	1,33E-05	1,05E-05

Tableau V-11 : Essais de perméabilité sur sable stratifié compacté (moyen-fin-grossier)

essai	$\Delta h(\text{cm})$			t(s)			l(cm)			A(cm ²)	Q(kg)	q(kg/s)			k _i (cm/s)			k(cm/s)
	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3			1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3	
1	5,1	8,9	5,5	1386	861	1473	7	7	14	50,24	0,6	0,00043	0,0007	0,000407	1,18E-05	1,09E-05	2,06E-05	1,45E-05
2	5,2	8,8	6,3	1378	911	1475	7	7	14	50,24	0,6	0,00044	0,00066	0,000407	1,17E-05	1,04E-05	1,8E-05	1,34E-05
3	5,6	8,4	6,1	1391	898	1484	7	7	14	50,24	0,6	0,00043	0,00067	0,000404	1,07E-05	1,11E-05	1,85E-05	1,34E-05

Tableau V-12 : Essais de perméabilité sur sable stratifié compacté (grossier-moyen-fin)

8.2.2- SABLE MELANGE :**8.2.2.1- ESSAI SANS COMPACTAGE :**

essai	$\Delta h(\text{cm})$			$t(\text{s})$			$l(\text{cm})$			$A(\text{cm}^2)$	$Q(\text{kg})$	$q(\text{kg/s})$			$k_i(\text{cm/s})$			$k(\text{cm/s})$
	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3			1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3	
1	3,7	4,8	8,1	593	655	666	7	7	14	50,24	0,6	0,00101	0,00092	0,000901	3,81E-05	2,66E-05	3,1E-05	3,19E-05
2	4,8	5,1	6,3	583	659	628	7	7	14	50,24	0,6	0,00103	0,00091	0,000955	2,99E-05	2,49E-05	4,23E-05	3,23E-05
3	5,6	6,2	6,1	588	668	633	7	7	14	50,24	0,6	0,00102	0,0009	0,000948	2,54E-05	2,02E-05	4,33E-05	2,96E-05

Tableau V-13 : essais de perméabilité sur sable mélangé**8.2.2.2- ESSAI AVEC COMPACTAGE :**

essai	$\Delta h(\text{cm})$			$t(\text{s})$			$l(\text{cm})$			$A(\text{cm}^2)$	$Q(\text{kg})$	$q(\text{kg/s})$			$k_i(\text{cm/s})$			$k(\text{cm/s})$
	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3			1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3	
1	4,8	7	11	1491	1421	1502	7	7	14	50,24	0,6	0,0004	0,00042	0,000399	1,17E-05	8,4E-06	1,01E-05	1,01E-05
2	5,1	5,3	6,3	1475	1418	1495	7	7	14	50,24	0,6	0,00041	0,00042	0,000401	1,11E-05	1,11E-05	1,78E-05	1,33E-05
3	5,6	6,2	6,1	1484	1438	1499	7	7	14	50,24	0,6	0,0004	0,00042	0,0004	1,01E-05	9,38E-06	1,83E-05	1,26E-05

Tableau V-14 : Essais de perméabilité sur sable mélangé compacté

8.2.3 - STRATIFICATION HORIZONTALE :**8.2.3.1- ESSAIS SANS COMPACTAGE :**

essai	$\Delta h(\text{cm})$			$t(\text{s})$			$l(\text{cm})$			$A(\text{cm}^2)$	$Q(\text{kg})$	$q(\text{kg/s})$			$k_i(\text{cm/s})$			$k(\text{cm/s})$
	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3			1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3	
1	17,6	12,4	30,3	42	43	46	7	7	14	50,24	0,6	0,01429	0,01395	0,013043	0,000113	0,000157	0,00012	0,00013
2	16,2	12,4	29,3	43	46	47	7	7	14	50,24	0,6	0,01395	0,01304	0,012766	0,00012	0,000147	0,000121	0,000129
3	17,1	13,6	29,3	45	46	51	7	7	14	50,24	0,6	0,01333	0,01304	0,011765	0,000109	0,000134	0,000112	0,000118

Tableau V-15 : Essais de perméabilité sur sable stratifié horizontalement (fin-grossier)

essai	$\Delta h(\text{cm})$			$t(\text{s})$			$l(\text{cm})$			$A(\text{cm}^2)$	$Q(\text{kg})$	$q(\text{kg/s})$			$k_i(\text{cm/s})$			$k(\text{cm/s})$
	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3			1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3	
1	7,5	24,5	14,1	30	31	31	7	7	14	50,24	0,6	0,02	0,01935	0,019355	0,000372	0,00011	0,000383	0,000288
2	7,5	21,3	15,9	31	31	34	7	7	14	50,24	0,6	0,01935	0,01935	0,017647	0,00036	0,000127	0,000309	0,000265
3	9,2	21,9	15,6	33	32	34	7	7	14	50,24	0,6	0,01818	0,01875	0,017647	0,000275	0,000119	0,000315	0,000237

Tableau V-16 : Essais de perméabilité sur sable stratifié horizontalement (moyen-grossier)

essai	$\Delta h(\text{cm})$			$t(\text{s})$			$l(\text{cm})$			$A(\text{cm}^2)$	$Q(\text{kg})$	$q(\text{kg/s})$			$k_i(\text{cm/s})$			$k(\text{cm/s})$
	p1-2	p2-3	p1-3	p1-2	p2-3	p1-3	p1-2	p2-3	p1-3			p1-2	p2-3	p1-3	p1-2	p2-3	p1-3	
1	22,3	21,1	38,7	50	51	53	7	7	14	50,24	0,6	0,012	0,01176	0,011321	7,5E-05	7,77E-05	8,15E-05	7,81E-05
2	19,5	21,3	34,6	49	49	53	7	7	14	50,24	0,6	0,01224	0,01224	0,011321	8,75E-05	8,01E-05	9,12E-05	8,63E-05
3	24,6	23,2	37,9	53	48	55	7	7	14	50,24	0,6	0,01132	0,0125	0,010909	6,41E-05	7,51E-05	8,02E-05	7,31E-05

Tableau V-17 : Essais de perméabilité sur sable stratifié horizontalement (fin-moyen)

8.2.3.2- ESSAIS AVEC COMPACTAGE :

essai	$\Delta h(\text{cm})$			$t(\text{s})$			$l(\text{cm})$			$A(\text{cm}^2)$	$Q(\text{kg})$	$q(\text{kg/s})$			$k_i(\text{cm/s})$			$k(\text{cm/s})$
	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3			1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3	
1	23,4	15	32,3	46	49	47	7	7	14	50,24	0,6	0,01304	0,01224	0,012766	7,77E-05	0,000114	0,00011	0,000101
2	22,6	17,9	29,9	44	46	49	7	7	14	50,24	0,6	0,01364	0,01304	0,012245	8,41E-05	0,000102	0,000114	9,99E-05
3	23,3	16,6	34,1	44	47	47	7	7	14	50,24	0,6	0,01364	0,01277	0,012766	8,15E-05	0,000107	0,000104	9,77E-05

Tableau V-18 : Essais de perméabilité sur sable stratifié horizontalement (fin-grossier)

essai	$\Delta h(\text{cm})$			$t(\text{s})$			$l(\text{cm})$			$A(\text{cm}^2)$	$Q(\text{kg})$	$q(\text{kg/s})$			$k_i(\text{cm/s})$			$k(\text{cm/s})$
	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3			1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3	
1	13	11,1	30,9	37	36	40	7	7	14	50,24	0,6	0,01622	0,01667	0,015	0,000174	0,000209	0,000135	0,000173
2	12,6	12,9	29,9	37	37	39	7	7	14	50,24	0,6	0,01622	0,01622	0,015385	0,000179	0,000175	0,000143	0,000166
3	12,3	14,2	28,7	39	40	42	7	7	14	50,24	0,6	0,01538	0,015	0,014286	0,000174	0,000147	0,000139	0,000153

Tableau V-19 : Essais de perméabilité sur sable stratifié horizontalement (moyen-grossier)

essai	$\Delta h(\text{cm})$			$t(\text{s})$			$l(\text{cm})$			$A(\text{cm}^2)$	$Q(\text{kg})$	$q(\text{kg/s})$			$k_i(\text{cm/s})$			$k(\text{cm/s})$
	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3			1-2	2-3	1-3	1-2	2-3	1-3	
1	24,8	17,8	42,2	67	70	70	7	7	14	50,24	0,6	0,00896	0,00857	0,008571	5,03E-05	6,71E-05	5,66E-05	5,8E-05
2	26	21,2	37,3	67	64	69	7	7	14	50,24	0,6	0,00896	0,00938	0,008696	4,8E-05	6,16E-05	6,5E-05	5,82E-05
3	22,8	19,9	34,2	70	73	74	7	7	14	50,24	0,6	0,00857	0,00822	0,008108	5,24E-05	5,75E-05	6,61E-05	5,87E-05

Tableau V-20 : Essais de perméabilité sur sable stratifié horizontalement (fin-moyen)

9-INTEPRETATION DES RESULTATS :

D'après les tableaux résultants des essais de perméabilité effectués au laboratoire, nous constatons que :

Un faible diamètre des grains engendre un indice des vides faible causant une lente infiltration d'eau amenant à une diminution du coefficients de perméabilité et une pertes de charge considérablement importantes.

Le coefficient de la perméabilité diminue entre les points 2 et 3 qui est engendré par la migration des particules a faible diamètre est qui ont été porter par l'infiltration d'eau.

Pour le sable grossier et d'après la courbe granulométrique continue, nous constatons que le matériau possédant toutes les dimensions de grains, les particules à petites dimensions occupent les vides entre les gros grains ce qui conduit à une légère diminution de la porosité du sol, et a une très faible perte de charge.

Les essais sur des sables compactés indiquent une diminution du coefficient de la perméabilité comparant avec le sable non compacté qui est causé par l'augmentation de la densité apparente du sol résultant de l'effet de compactage donc diminution de la porosité ainsi qu'à un réarrangement des grains, donc une diminution de l'indice des vides, avec un temps d'écoulement très important et une augmentation de la perte de charge. Mais aussi pour le sable grossier, la perméabilité du sol est importante, à cause du diamètre des grains qui empêche l'enchevêtrement entre eux malgré le compactage effectué.

Pour les sables stratifiés non compactés, la perte de charge est quasiment importante dans un temps d'écoulement peut considérable. Le coefficient de la perméabilité est faible entre les points (2-3) comme le sable fin se caractérise par sa faible porosité placé entre le sable moyen et grossier, qui résulte ce dernier.

L'emplacement de sable fin en surface de la stratification, a conduit à un réarrangement des grains entre les différentes couches, vu que les petits grains viennent se loger dans les intervalles laissés par les gros grains. Se classement a provoqué une diminution dans la perméabilité du sol.

Après avoir sollicité le sol stratifié à un compactage, nous obtenons une augmentation de la densité apparente et un réarrangement des grains, engendrant une diminution de l'indice

des vides ainsi que la porosité qui conduit à une diminution de la perméabilité et à une augmentation de la perte de charge.

L'emplacement de sable mélangé qui contient des grains à toutes dimensions entre le sable moyen et grossier a diminué la vitesse d'infiltration de l'eau.

Dans la stratification horizontale l'écoulement de l'eau s'effectue avec une vitesse considérable.

Dans le cas de la stratification des sables à grandes dimensions (moyen et grossier), donc à un indice des vides élevé, la disposition des couches horizontalement engendre entre elles une discontinuité et une porosité de drainage qui facilite l'écoulement et la l'infiltration d'eau.

La présence de sable fin dans la stratification horizontale induit à une perte de charge importante avec une vitesse d'écoulement peut considérable et une diminution de la perméabilité.

Le compactage joue toujours un rôle dans la diminution de la perméabilité, car avec le compactage les grains de sable deviennent plus serrés donc un indice des vides peu important.

10- ETUDE ANALYTIQUE DE LA PERMEABILITE DES SOLS STRATIFIES :

Sous forme de couches superposées, sensiblement horizontales et perméabilités différentes, on peut remplacer cette succession de couches par une couche unique de la perméabilité équivalente (donne un même débit sous la même charge).

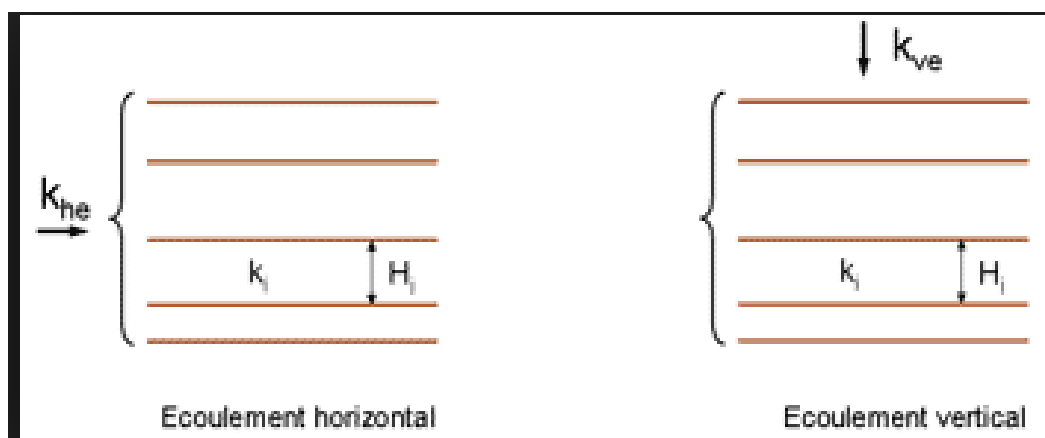


Figure V-5 : écoulement parallèle et perpendiculaire à la stratification

- 1- Pour un écoulement parallèle à la stratification : le coefficient de perméabilité équivalent K_{he}

$$K_{he} = \frac{\sum K_i H_i}{\sum H_i}$$

- 2- Pour un écoulement perpendiculaire à la stratification : le coefficient de perméabilité équivalent K_{ve}

$$K_v = \frac{\sum H_i}{\sum \frac{H_i}{K_i}}$$

Avec :

H_i : épaisseur de i^e couche ($H_i = 7,83$ cm).

K_i : coefficient de perméabilité de i^e couche.

Le coefficient de perméabilité dépend aussi de la température (une chute de température de 30°C à 5°C engendre une réduction de la perméabilité de 50%) cette réduction peut être constatée dans toutes les nappes superficielles.

La valeur du coefficient de perméabilité K_i est égale au coefficient marqué entre les deux points 1 et 3 du perméamètre vu que l'infiltration d'eau traverse toutes les couches de sol entre ces deux derniers ce qui nous conduit à constater que :

➤ **Essais sans compactage :**

$$K_{sf} = K_{moy (1-3)} = 1,47 \times 10^{-5} \text{ (cm/s)}$$

$$K_{sm} = K_{moy (1-3)} = 1,78 \times 10^{-4} \text{ (cm/s)}$$

$$K_{sg} = K_{moy (1-3)} = 9,75 \times 10^{-4} \text{ (cm/s)}$$

$$K_{s \text{ mélangé}} = K_{moy (1-3)} = 3,88 \times 10^{-5} \text{ (cm/s)}$$

Si on prend un écoulement horizontal, on peut considérer que dans cette direction le terrain est équivalent à un terrain homogène de perméabilité K_h avec :

- K_h sable (fin-grossier)

$$K_h = \frac{K_{sf} \times 7,83 + K_{sg} \times 7,83}{15,66} = 4,94 \times 10^{-4} \text{ (cm/s)}$$

- K_h sable (moyen-grossier)

$$K_h = \frac{K_{sm} \times 7,83 + K_{sg} \times 7,83}{15,66} = 5,76 \times 10^{-4} \text{ (cm/s)}$$

- K_h sable (fin-moyen)

$$K_h = \frac{K_{sf} \times 7,83 + K_{sm} \times 7,83}{15,66} = 9,63 \times 10^{-5} \text{ (cm/s)}$$

Si l'on considère maintenant un écoulement vertical sous une différence de charge Δh , dans cette direction verticale le terrain est équivalent à un terrain homogène de perméabilité K_v avec :

$$K_v = \frac{23,49}{\frac{7,83}{K_{sf}} + \frac{7,83}{K_{sm}} + \frac{7,83}{K_{sg}}} = 4,01 \times 10^{-5} \text{ (cm/s)}$$

➤ **Essais avec compactage :**

$$K_{sf} = K_{\text{moy (1-3)}} = 8,11 \times 10^{-6} \text{ (cm/s)}$$

$$K_{sm} = K_{\text{moy (1-3)}} = 1,60 \times 10^{-4} \text{ (cm/s)}$$

$$K_{sg} = K_{\text{moy (1-3)}} = 1,99 \times 10^{-4} \text{ (cm/s)}$$

$$K_{s \text{ mélange}} = K_{\text{moy (1-3)}} = 1,54 \times 10^{-5} \text{ (cm/s)}$$

Si on prend un écoulement horizontal, on peut considérer que dans cette direction le terrain est équivalent à un terrain homogène de perméabilité K_h avec :

- K_h sable (fin-grossier)

$$K_h = \frac{K_{sf} \times 7,83 + K_{sg} \times 7,83}{15,66} = 1,03 \times 10^{-4} \text{ (cm/s)}$$

- K_h sable (moyen-grossier)

$$K_h = \frac{K_{sm} \times 7,83 + K_{sg} \times 7,83}{15,66} = 1,79 \times 10^{-4} \text{ (cm/s)}$$

- K_h sable (fin-moyen)

$$K_h = \frac{K_{sf} \times 7,83 + K_{sm} \times 7,83}{15,66} = 8,40 \times 10^{-5} \text{ (cm/s)}$$

Si l'on considère maintenant un écoulement vertical sous une différence de charge Δh , dans cette direction verticale le terrain est équivalent à un terrain homogène de perméabilité K_v avec :

$$K_v = \frac{23,49}{\frac{7,83}{K_{sf}} + \frac{7,83}{K_{sm}} + \frac{7,83}{K_{sg}}} = 2,22 \times 10^{-5} \text{ (cm/s)}$$

11- COMPARAISON ENTRE L'ETUDE ANALYTIQUE ET LES RESULTATS**EXPERIMENTAUX:**

	Résultats expérimentaux		Résultats analytiques	
Essais	$K_{\text{moy}} (1-3)$ (sans compactage)	$K_{\text{moy}} (1-3)$ (avec compactage)	$K_{\text{moy}} (1-3)$ (sans compactage)	$K_{\text{moy}} (1-3)$ (avec compactage)
sable fin	0,0000147	0,00000811	/	/
sable moyen	0,000178	0,00016	/	/
sable grossier	0,000975	0,000199	/	/
sable mélangé	0,0000388	0,0000154	/	/
stratification verticale				
sables (fin-moyen-grossier)	0,0000669	0,0000649	0,0000222	0,0000401
sables (moyen-fin-grossier)	0,0000175	0,0000136		
sables (grossier-moyen-fin)	0,0000226	0,000019		
stratification horizontale				
sables (fin-grossier)	0,000118	0,000109	0,000494	0,000103
sables (moyen-grossier)	0,000336	0,000139	0,000576	0,000179
sables (moyen-fin)	0,0000843	0,0000625	0,0000963	0,0000840

Tableau V.21 : coefficients de perméabilité moyens entre les points 1 et 3

Nous représentons les résultats du tableau précédent sous forme d'histogramme suivant les notations ci-dessous.

On prend la valeur de coefficient de perméabilité du sable mélangé comme référence dans notre comparaison.

- Strat 1 pour la disposition des sables (fin-moyen-grossier) de bas vers le haut ;
- Strat 2 pour la disposition des sables (moyen-fin-grossier) de bas vers le haut
- Strat 3 pour la disposition des sables (grossier-moyen-fin) de bas vers le haut ;
- Moy strat pour la moyenne de toutes les stratifications ;
- Strat 4 pour la disposition des sables (fin-grossier) horizontalement ;
- Strat 5 pour la disposition des sables (moyen-grossier) horizontalement ;
- Strat 6 pour la disposition des sables (moyen-fin) horizontalement;
- V.A 4 pour la valeur analytique de la stratification des sables (fin-grossier)
- V.A 5 pour la valeur analytique de la stratification des sables (moyen-grossier)
- V.A 6 pour la valeur analytique de la stratification des sables (moyen-fin)

❖ STRATIFICATION VERTICALE :

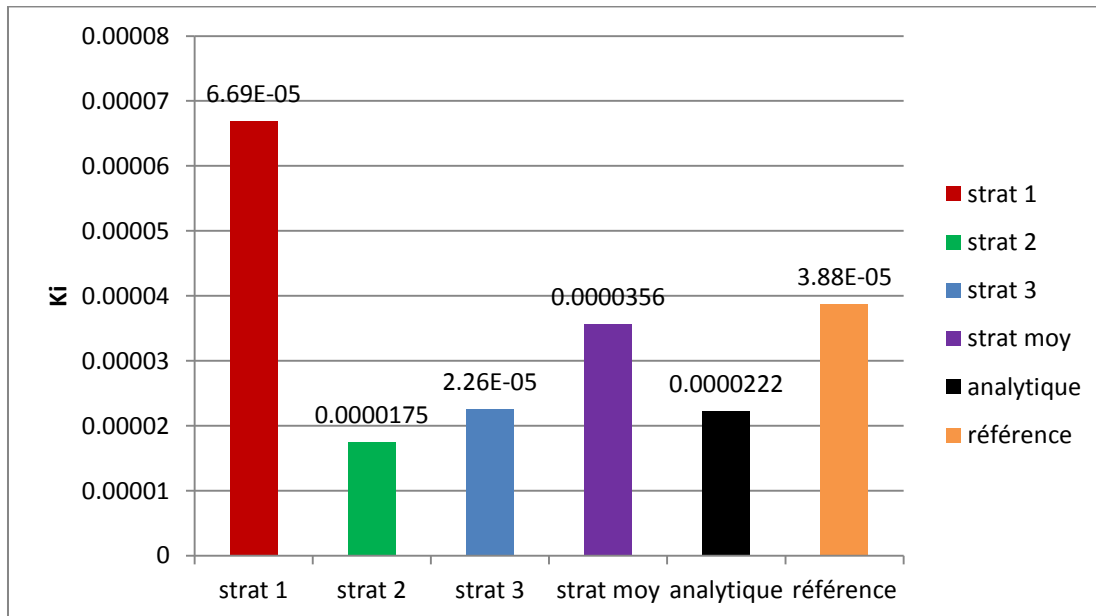


Figure V.6 : coefficients de perméabilité (K_i) en fonction de la stratification verticale des sables non compactés

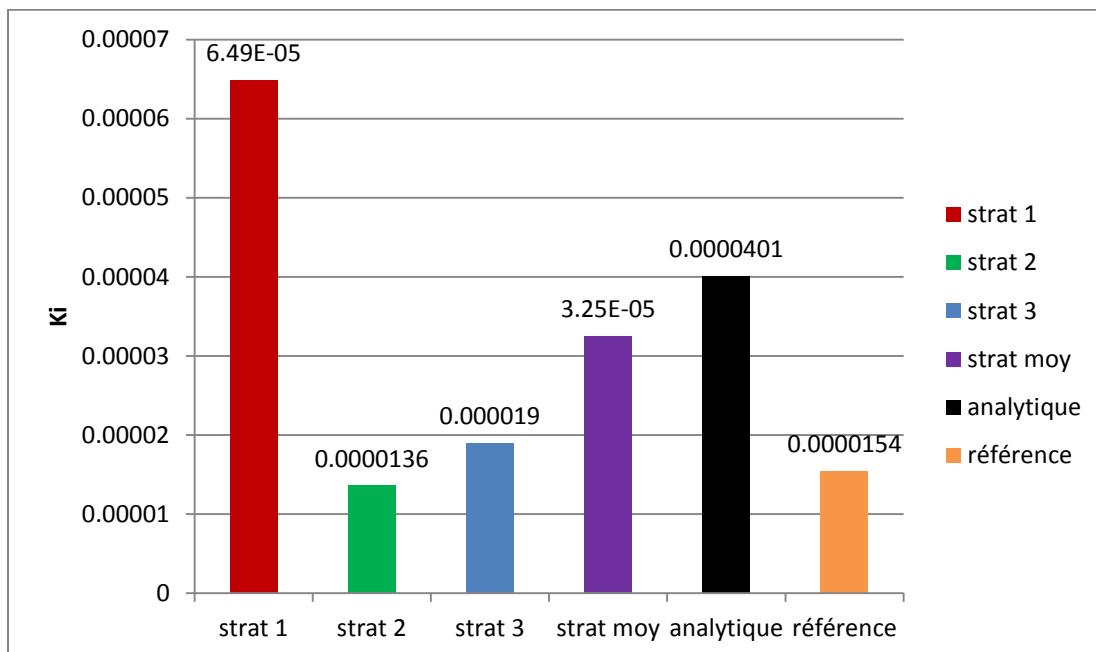


Figure V.7: coefficients de perméabilité (K_i) en fonction de la stratification verticale des sables compactés

❖ STRATIFICATION HORIZONTALE :

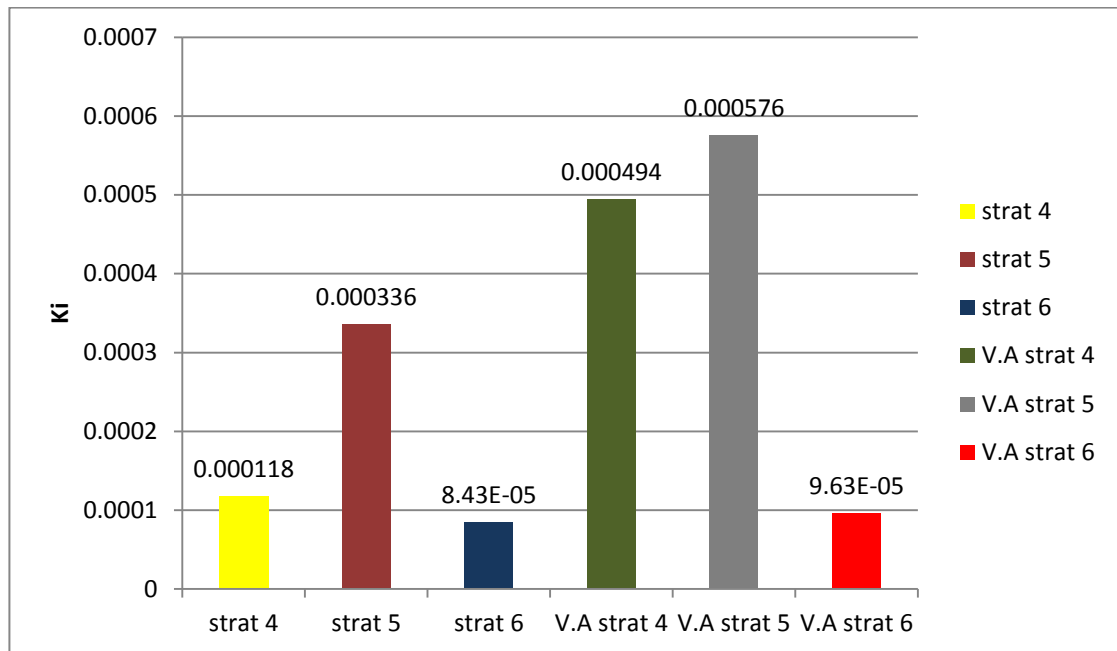


Figure V-8: coefficients de perméabilité (K_i) en fonction de la stratification horizontale des sables non compactés

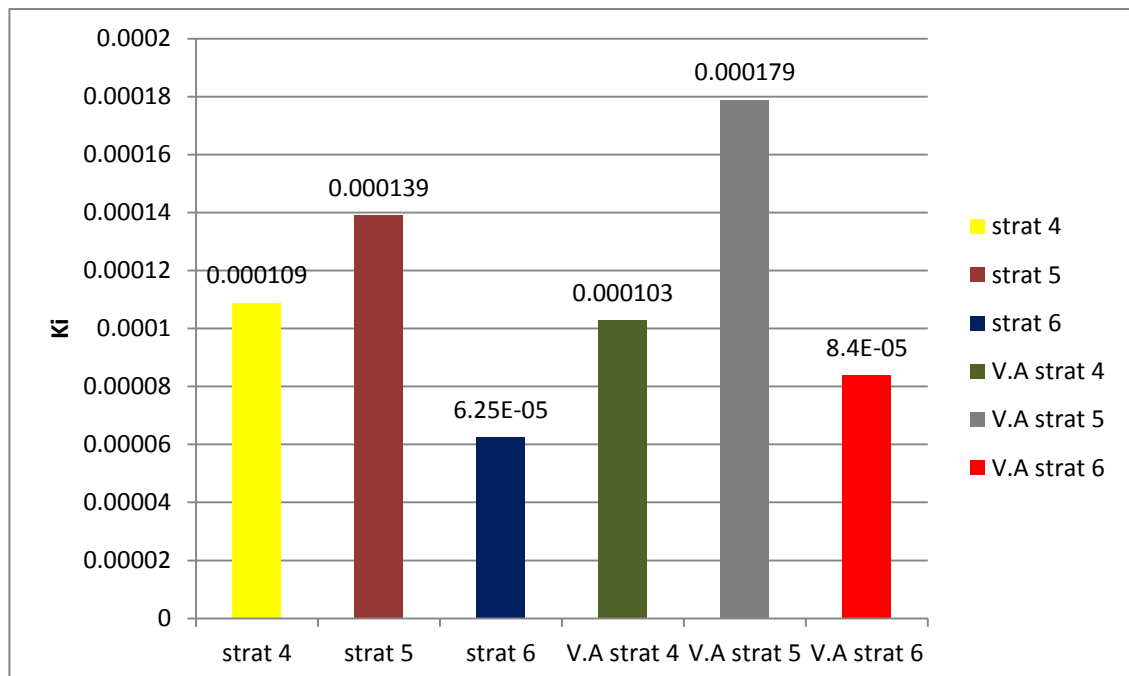


Figure V-9: coefficients de perméabilité (K_i) en fonction de la stratification horizontale des sables compactés

Le calcul analytique nous montre que le coefficient de perméabilité horizontale des sables stratifiés est supérieur au coefficient de perméabilité verticale dans le cas compacté et non compacté des sables.

D'après les résultats des essais réalisés au laboratoire, les coefficients de perméabilité des sables stratifiés verticalement non compactés sont respectivement $6,69 \times 10^{-5}$ (cm/s), $1,75 \times 10^{-5}$ (cm/s) $2,26 \times 10^{-5}$ (cm/s) selon l'emplacement de la couche de sable fin de bas vers le haut. En comparant ces coefficients de perméabilité avec le coefficient résultant de calcul analytique qui est égal à $2,22 \times 10^{-5}$, nous remarquons que dans le cas où le sable fin est situé en bas de la stratification, le coefficient de perméabilité dans cette disposition est supérieur à celui calculé et il diminue en remontant la couche de sable fin au milieu de la stratification.

Dans le cas où la couche de sable fin est située sur la surface, nous remarquons que les valeurs des coefficients de perméabilité analytique, expérimentale et celle de référence ($2,22 \times 10^{-5}$ cm/s, $2,26 \times 10^{-5}$ cm/s et $3,88 \times 10^{-5}$ cm/s respectivement) sont très proches entre elles.

Après compactage, une diminution des coefficients de perméabilité est marquée sur les différentes stratifications qui sont respectivement $6,49 \times 10^{-5}$ (cm/s), $1,36 \times 10^{-5}$ (cm/s) et $1,9 \times 10^{-5}$ (cm/s) selon l'emplacement de la couche de sable fin de bas vers le haut, nous remarquons aussi que dans le cas où le sable fin est situé en bas de la stratification, le coefficient de perméabilité dans cette disposition est supérieur à celui calculé. L'inégalité marquée entre les valeurs des coefficients de perméabilité expérimentale, analytique et celle de référence dans ce cas est engendrée par la différence de degré de compactage des couches de sable, donc une variation de la porosité d'un essai à un autre.

Dans l'infiltration horizontale de l'eau, les essais sur des sables non compactés engendrent des coefficients de perméabilité selon la disposition des couches horizontalement tel que pour les sables (fin-grossier), nous avons une valeur de $1,18 \times 10^{-4}$ cm/s, pour les sables (moyen-grossier) on a $3,36 \times 10^{-4}$ cm/s et une valeur de $8,45 \times 10^{-5}$ cm/s pour les deux couches de sables (moyen-fin). Cette variation est due à la variation de la porosité suivant le type de sable constitué les deux couches.

Les valeurs analytiques sont légèrement grandes dans ce cas que celles résultantes des essais expérimentaux et qui peut s'expliquer par les variations des conditions thermiques

concernant la température de l'eau durant l'essai ainsi que le réarrangement des grains lors de constitution des couches de sables.

Le compactage favorise l'augmentation de la densité apparente des sables donc réduction de la porosité ce qui conduit à une diminution de coefficient de la perméabilité selon le type de couches de sable utilisées :(fin-grossier), (moyen-grossier) et (moyen-fin) et les valeurs $1,09 \times 10^{-4}$ cm/s, $1,39 \times 10^{-4}$ cm/s et $6,25 \times 10^{-5}$ cm/s respectivement.

Le coefficient de perméabilité décroît après avoir effectué un compactage sur les sables utilisés dans ces essais.

12- CONCLUSION :

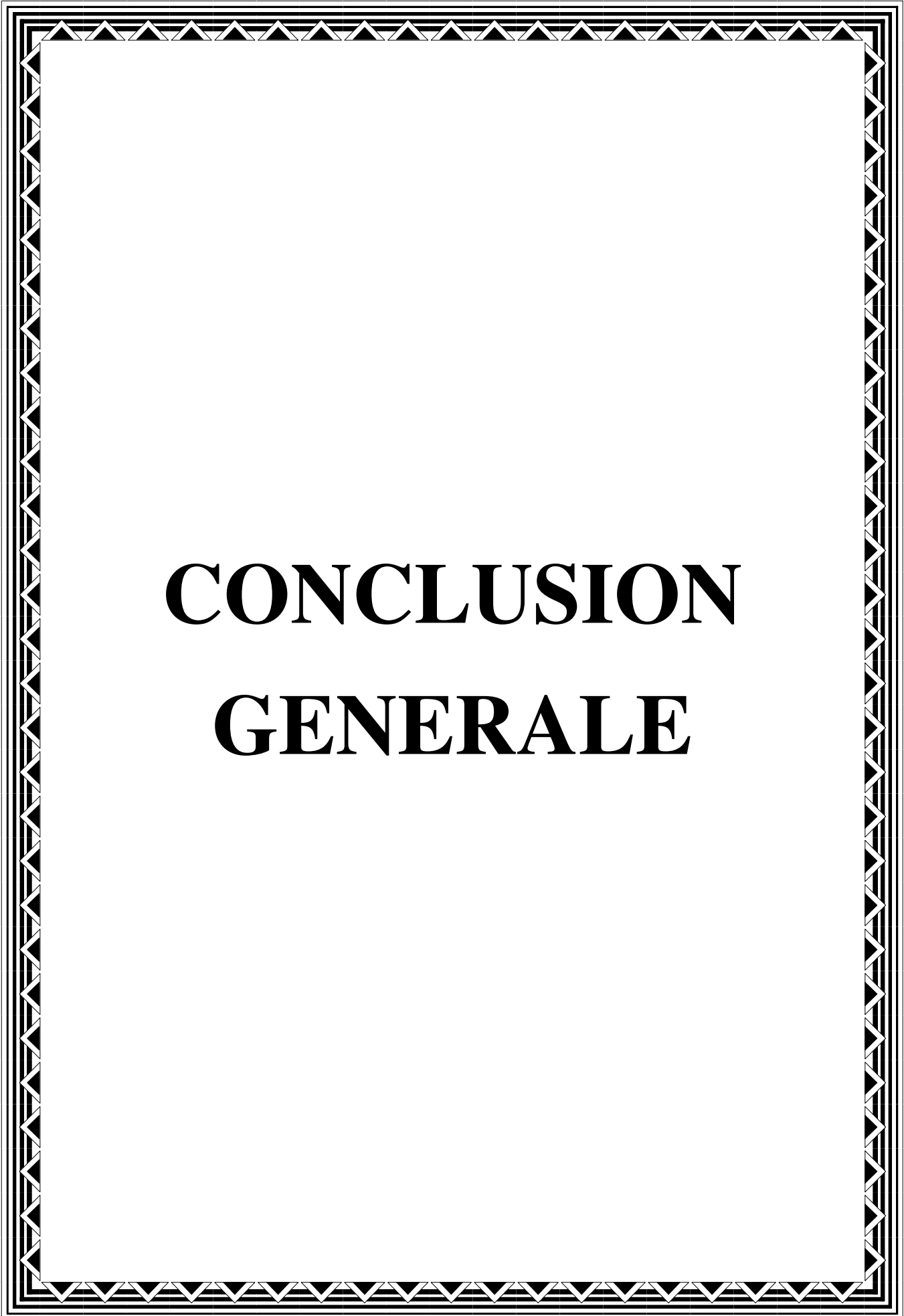
D'après les résultats obtenus dans les différents essais représentés par les tableaux, à savoir l'essai de perméabilité sur différents types de sable, des essais sur des sables stratifiés, des essais avec et sans compactage, nous constatons que la valeur de coefficient de perméabilité d'un sol dépend dans une large mesure de sa granulométrie, de son état vis-à-vis de compactage.

La perméabilité des sols granulaires est affectée par la grosseur des grains, les dimensions des vides entre particules donc la porosité de sol, ainsi que le cheminement des couches de sable.

Le matériau grossier est le plus perméable comparé au sable moyen et sable fin. L'essai de perméabilité de sable non compacté présente les valeurs de perméabilité plus grandes comparativement à celles enregistrées dans les essais avec compactage.

L'emplacement et la disposition des couches de différents types de sable dans un sol stratifié à une grande influence sur la nature de la perméabilité.

Le temps et la vitesse d'infiltration d'eau dans la stratification horizontale sont plus importants par rapport à ceux de la stratification verticale.



CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE :

Cette étude qui a l'objet de présenter deux parties. La première partie est la partie bibliographique qui est subdivisée en quatre chapitres donne des généralités sur les sols, généralités sur la perméabilité, les différents essais de la perméabilité in situ et en laboratoire et le drainage du sol. La deuxième partie est la partie expérimentale qui est subdivisée en deux chapitres en premier; la caractérisation des matériaux utilisés, en suite on a adopté pour l'étude de la perméabilité dans différents types de sable a savoir sable fin, sable moyen et sable grossier et l'interprétation des différents résultats de l'étude.

Dans notre travail, nous avons réalisé une campagne d'essais de perméabilité en laboratoire sur des échantillons de sable fin, moyen et grossier disposés en couches stratifiées verticalement et horizontalement.

Les procédures d'essais ont été soigneusement faites afin de pouvoir mieux reproduire la configuration adoptée sur place. Cependant comme tout essai, celui de la perméabilité présente certaines difficultés :

- Le changement de la structure des échantillons pendant l'essai et cela est due à la migration des grains a faible dimension.
- La variation de la température pendant l'essai.
- La différence de la compacité.
- Et enfin il faut trouver un équilibre entre le gradient hydraulique et les dimensions de l'échantillon afin que le temps d'essai ne soit pas trop long.

D'après les résultats obtenus dans les différents essais de la perméabilité sur les différents types de sable, nous constatons que :

- L'écoulement de l'eau dans un sable fin est très lent ce qui permet son utilisation comme un filtre pour les eaux usées et qui élimine efficacement les bactéries et constitue un procédé de traitement innovateur et rentable.
- La vitesse d'écoulement augmente dans les sables moyen et grossier ce qui encourage leur utilisation dans la conception du drainage du sol.

- La perméabilité dans un échantillon constitué de mélange des trois types de sable varie de haut en bas tel que la vitesse d'écoulement d'eau est plus grande dans la couche supérieure et diminue en descendant à cause de la migration des grains de petites dimensions vers le bas. Donc ce type de mélange peut être utilisé comme drain et filtre à la fois.

BIBLIOGRAPHIE :

- ✚ BELMIHOUB Hacen : influence de la dimension fractale sur la perméabilité. (UMMTO Tizi-Ouzou)

- ✚ BOUDLAL Omar (2013): étude expérimentale du comportement mécanique des fines dans la stabilité des talus et des fondations. (UMMTO Tizi-Ouzou)

- ✚ CHERFOUH.R, MEROUKI.K, A.DERRIDJ : effet des passages de tracteur agricole sur la structure d'un sol limono-sableux et le développement de la pomme de terre (article, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, faculté des sciences biologiques et des sciences agronomiques)

- ✚ FEKHAR Karima (2012) : simulation numérique du phénomène d'infiltration dans un milieu poreux. Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou

- ✚ Gballou YORO ET Gnahoua GODO (1989-1990): les méthodes de mesure de la densité apparente

- ✚ GUERAIRI Yasmina (2008) : contribution à l'étude de l'efficacité de la filtration biologique sur sables de dunes (thèse de magister, université KASDI Merbah Ouargla)

- ✚ HARICHANE Khalifa (2013-2014) : mécanique des sols 1. Université Hassiba Ben Bouali, Chlef.

- ✚ Jean-Pierre MAGNAN : L'eau dans le sol. (Laboratoire central des ponts et chaussées. Paris)

- ✚ Julien HABERT (Juin 2014) : infiltrer les eaux pluviales- les enjeux des essais de perméabilité.

- ✚ Laboratoire régional des ponts et chaussées de BLOIS (1981) : études des renforcements des digues de BLOIS- VIENNE. Aide mémoire.

- ✚ LAMRI Ihcen (2008) : Etude du comportement d'un sol cohérent sous chargement
- ✚ M. GHOMARI F. & Mme BENDI-OUIS A (2008). Science des matériaux de construction (travaux pratiques)
- ✚ MAURICE CASSAN (2005): les essais de la perméabilité sur site dans la reconnaissance des sols (presse de l'école nationale des ponts et chaussées).France
- ✚ MEFTAH Khaled, maitre assistant (septembre 2008) : Cours mécanique des sols.
- ✚ MESSAID Belkacem (2009): Etude de la position efficace des drains dans les barrages en terre.
- ✚ monotonique et cyclique (thèse de magister, université 20 aout 1955 SKIKDA)
- ✚ P.THIEPONT : Les drains verticaux pour la consolidation des sols (centre de recherche routière BRUXELLES).
- ✚ Pierre BEDARD (2014).: Clef d'identification visuelle des grains de sable
- ✚ SEBKI Leila (2011) : les pathologies des drainages et entretien. Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou.
- ✚ TOURE Tidiane (2002). : Étude expérimentale de la perméabilité des sols (UMMTO Tizi-Ouzou)
- ✚ www.wikipédia.org/wiki/sable.

ANNEXE :

Chapitre IV : MATERIAUX DE L'ETUDE ET LEUR IDENTIFICATION

Equivalent de sable : solution pour 1l

- 1) 219 g de chlorure de calcium ($\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ;
- 2) 450 g de glycérine à 99% de glycérol ;
- 3) 12,5 g formaldéhyde en solution, 40% en volume de quantité de réactif pour laboratoire ;
- 4) 350 ml eau distillée déminéralisée ;
- 5) masse de sable sec $m=120\text{g}$.

Préconisations :

Les préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les bétons sont les suivantes

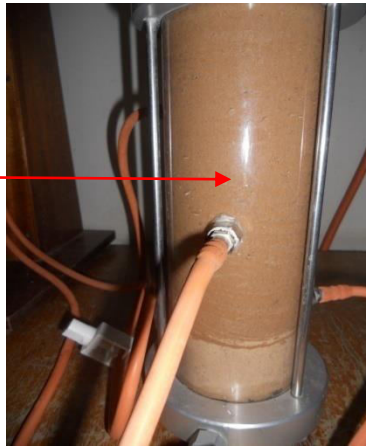
PS	Nature et qualité de sable
< 60	Sable argileux, risque de retrait ou gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité.
$60 \leq \text{PS} < 70$	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait.
$70 \leq \text{PS} < 80$	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
$\text{PS} > 80$	Sable très propre l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Tableau : nature et qualité de sable

Chapitre V : ETUDE EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE DE LA PERMEABILITE

- **Sable fin (sans et avec compactage) :**

Sable fin



- **Sables stratifiés verticalement (sans et avec compactage) :**

grossie

moyen

fin



grossier

fin

moyen



fin

moye

grossier



- **Sable mélangé (sans et avec compactage) :**

Sable mélangé



- **Sables stratifiés horizontalement (sans et avec compactage) :**

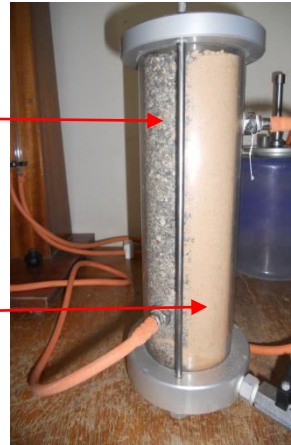
moyen

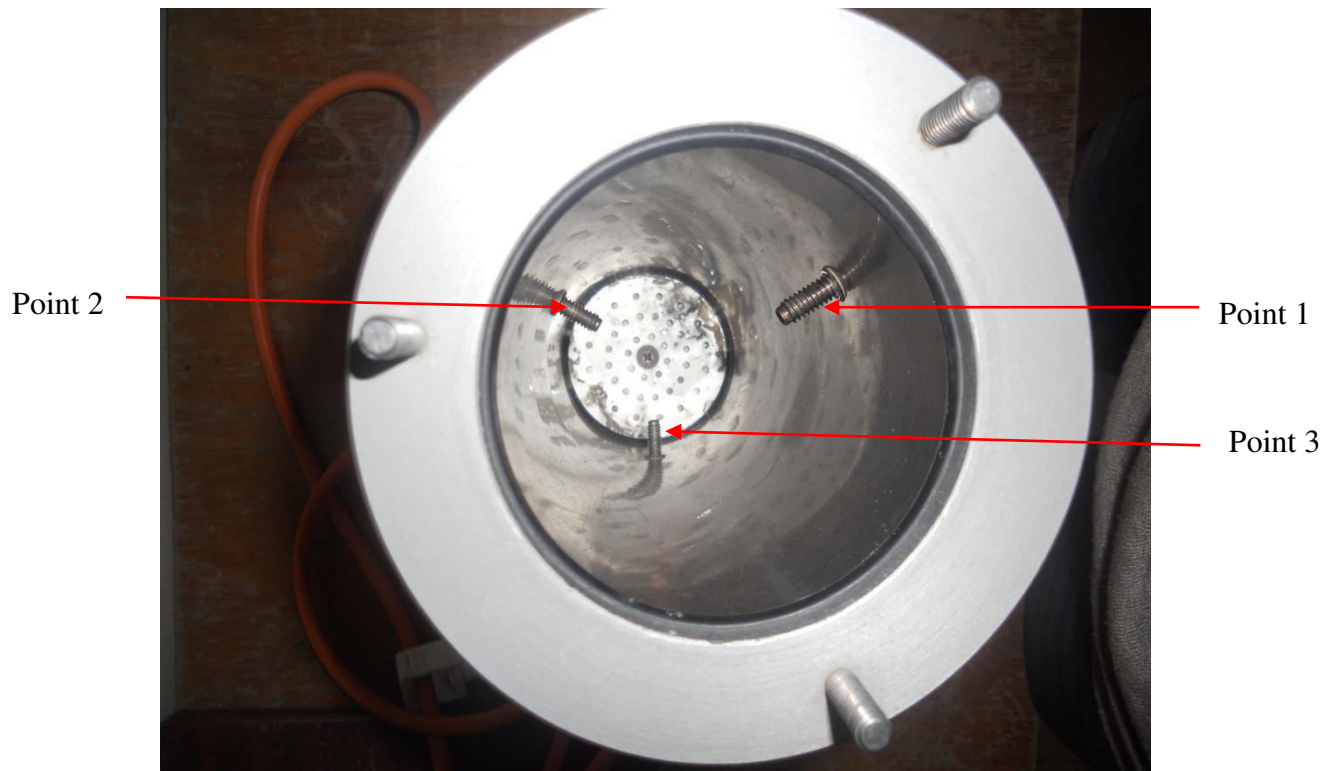
fin



grossier

fin





Perméamètre à charge constante