

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU

FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

**LABORATOIRE DE RECHERCHE GÉOMATERIAUX, ENVIRONNEMENT ET AMÉNAGEMENT
(L.G.E.A)**

MEMOIRE DE MAGISTER EN GENIE CIVIL

OPTION : GEOTECHNIQUE ET ENVIRONNEMENT

PRESENTE PAR :

Mr : BELMIHOUB HACENE

SUJET :

INFLUENCE DE LA DIMENSION FRACTALE SUR LA PERMEABILITE

DEVANT LE JURY COMPOSE DE :

M^r : AIT TAHAR. Kamal	Professeur	UMMTO	Président
M^r : MELBOUCI. Bachir	Professeur	UMMTO	Rapporteur
M^r : HAMZA. Ali	Maitre de conférences A	UMMTO	Examineur
M^r : DJEMAI. Mohamed	Maitre de conférences A	UMMTO	Examineur

SOUTENU LE: - - / - - / - - -

Remerciements

Au premier lieu, je remercie Dieu le tous puissant.

En second, mes chers parents de m'avoir aidé pour arriver au terme de ce travail qui est le fruit de plusieurs

Années d'études.

Mes remerciements les plus sincères pour mon promoteur

Mr: MELBOUCI BACHIR

qui représente pour moi le guide et l'exemple du sérieux dans le travail et du savoir dans ce domaine.

je remercie aussi monsieur BAHAR RARAMDANE, directeur du laboratoire L.G.E.A pour les moyens qu'il à mis à notre disposition pour pouvoir réaliser ce travail. Touts mes remerciement aux membres du laboratoire et à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation ainsi tous ceux qui mon aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.

Mes remerciements également au Personnel de la bibliothèque.

Mes chaleureux remerciements sont adressé à Mr:

BOUKHERROUB Med Ameziene, BOUDLAL Omar et Kamel.

Je remercie aussi les membres du jury qui nous ferons l'honneur de juger mon travail.

SOMMAIRE

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I: GENERALITE SUR LA PERMEABILITE

I-1Introduction.....	3
I-2Définition.....	3
I.3 Considérations générales sur la perméabilité des sols grenus.....	3
I-4 Validité de la loi de Darcy.....	5
I-5 Facteurs pouvant affecter la perméabilité.....	6
- Influence de la taille des particules.....	6
- Influence de la distribution granulométrique.....	7
- Influence de la forme.....	8
- Influence de la structure du sable.....	9
- Influence de composition.....	9
- Influence du degré de saturation.....	10
- Influence de l'état de surface.....	11
-Influence de la teneur en eau.....	11
I.6 Formules utilisées pour le calcul de la perméabilité.....	12
-Formule de KOZENY et CARMAN.....	12
-Formule de CAZENOVE.....	13
-Formule de HAZEN.....	13
-Formule de AWAD et AMER.....	13

I-7 Conclusion.....	14
---------------------	----

CHAPITRE II: LA DIMENSION FRACTALE

I-1 Historique.....	15
II-2 Introduction.....	15
II-3 Définition.....	15
II-4 Caractéristiques d'un objet fractale.....	16
-L'état de surface.....	17
- La forme.....	18
II-5 Les différents types des fractales.....	20
II-5-1 Fractale déterministe.....	20
II-5-2 Fractale non déterministe.....	20
II-6 Les propriétés d'auto-affinité et d'auto-similarité des fractales.....	21
II-7 Méthodes de détermination de la dimension fractale.....	22
II-7-1Méthode de la règle.....	22
II-7-2 Analogie avec la courbe triadique de koch.....	23
II-7-3 Méthode de compactage des boîtes.....	24
II-7-4 Area-perimeter.....	25
II-7-5 Méthode des lignes parallèles.....	27
II-8 Modélisation fractale de la structure du sol.....	28
II-9 Lien entre la porosité (perméabilité) et la dimension fractale.....	28
II-10 Conclusion.....	30

CHAPITRE III: MATERIAUX DE L'ETUDE ET LEUR IDENTIFICATION

III-1 Introduction.....	31
III-2 Description des sables choisis.....	31
III-3 Origines de prélèvement des échantillons de l'étude.....	33
III-4 Identification des matériaux de l'étude.....	33

- Analyse granulométrique.....	33
- Teneur en eau.....	35
- Masses volumiques.....	35
- Détermination de la masse volumique des grains solides (γ_d)	36
- Détermination de la masse volumique humide (γ_h)	36
- Détermination de la masse volumique sèche (γ_s).....	37
- Indice des vides, porosité et degré de saturation.....	38
- Indice des vides (e).....	38
- Porosité (n).....	38
- Degré de saturation (Sr).....	38
-Récapitulation des différentes caractéristiques physiques.....	39
III -5 Etude statistique.....	40
-Objectif des statistiques descriptives.....	40
-But de l'étude statistique.....	40
-Définition des paramètres utilisés dans cette étude.....	41
-La moyenne arithmétique.....	41
- Le mode.....	41
-La variance observée.....	41
-Le coefficient de variation.....	42
-Préparation des échantillons.....	42
III -6 Conclusion.....	50

CHAPITRE IV: LES ESSAIS DE PERMEABILITE AU PERMEAMETRE

IV-1 Introduction.....	51
IV-2 L'essai de perméabilité à charge constante.....	51
IV-3 Les étapes de déroulement des essais.....	51
IV-4 Appareillage.....	53
IV-5 But de l'essai.....	54
IV-6 Matériel utilisé.....	54
IV-7 Mode opératoire.....	54
IV-8 Présentation des résultats.....	54
IV-9 Courbe de perméabilité en fonction de la dimension fractale.....	55
IV-10 Interprétation des résultats.....	56
IV-11 Conclusion.....	57

CHAPITRE V: LES ESSAIS DE COMPRESSIBILITE

V-1 Introduction.....	59
V-2 Appareillage.....	60
V-3 Principe et mode opératoire.....	60
V-4 Caractéristiques obtenues à l'oedomètre.....	61
-Indice des vides.....	61
-Paramètres d'identification.....	62
-Caractéristiques de compressibilité.....	62
-Courbe de compressibilité.....	62
-Indice de compression et de gonflement.....	63
-Pression de préconsolidation.....	64
V-5 Présentation des résultats.....	64
1-Courbe de compressibilité.....	64
2- Courbes granulométriques avant et après les essais de compressibilité	67
3- Calcul du coefficient de perméabilité à l'aide des essais oedométriques.....	72
4- Courbe de perméabilité en fonction de la dimension fractale	73
V-6 Interprétation des résultats.....	73

V-7 Comparaison entre les résultats obtenus à l'oedometre et ceux obtenus au permeametre..	75
V-8 Conclusion.....	76
CHAPITRE VI: PROPOSITION D'UNE NOUVELLE FORMULE	
VI-1 Introduction.....	78
VI-2 Proposition de la formulation de perméabilité.....	78
VI-3 Application de la formule pour les sables choisis.....	78
VI-4 Application de la formule de Hazen pour les sables choisis.....	78
VI-5 Courbes de perméabilité en fonction de la dimension fractale.....	80
VI-5 Validation de la formulation de perméabilité	81
VI-6 Conclusion.....	82
Conclusion générale.....	64

Liste des figures

Figure (1) : principe du permeametre	4
Figure (2) : Influence de la taille des particules du mélange sur les valeurs de la porosité d'après (GUERIN ,2004).....	6
Figure (3) : Evolution de la densité de l'empilement de particules sèches en fonction de la déviation standard géométrique (GUERIN, 2004).....	7
Figure (4) : Evolution de la porosité en fonction de la sphéricité pour différentes formes des Particules (ZOU, 1996).....	9
Figure (5) : La perméabilité en fonction du degré de saturation pour un sable (OLSON et DANIEL, 1979).....	10
Figure (6) : Evolution de la porosité en fonction de la teneur en eau pour un sable (FENG et YU, 1998)	12
Figure (7) : quelques objets fractals constituant un milieu granulaire.....	16
Figure (8) : Caractérisation des irrégularités et de la rugosité des grains.....	17
Figure (9) : Morphologie des particules de sable observées au microscope électronique balayage (MEB)	18
Figure (10) : différentes formes des grains.....	18
Figure (11) : Echelle de sphéricité des grains	19
Figure (12) : fractales déterministes d'un milieu granulaire.....	20
Figure (13) : fractales non déterministes d'un milieu granulaire.....	21
Figure (14) : Utilisation de différentes règles pour parcourir les différents cotés.....	22
Figure (15) : Relation entre la dimension fractale et le nombre générateur.....	23
Figure (16) : Construction de la courbe triadique de Koch.....	23
Figure (17) : Méthode des boîtes ("box counting").....	24
Figure (18) : Application de la méthode de area –perimeter d'un gros grain de sable d'origine d'une pierre calcaire.....	26
Figure (19) : Schéma représentant la méthode des lignes parallèles.....	27
Figure (20) : Courbe de la dimension fractale de la méthode des lignes parallèles.....	27
Figure (21) : Porosité en fonction de DF (ai) Mélanges d/D_i , (bi) Mélanges d_i/D	29
Figure (22) : Porosité en fonction de DF.log (d/D) (ai) Mélanges d/D_i ; (bi) Mélanges d_i/D	29
Figure (23) : Descripteurs de l'arrondi et de la sphéricité d'après (Baize, D et Jabiol, Bp123).32	32
Figure (24) : Indices d'arrondi et de sphéricité d'après (Delcroix, G et Havel, M.1988,1995, p 123)	32
Figure (25) : Courbes granulométriques des trois types de sables étudiés.....	34
Figure (26) : Forme arrondie (0/8).....	42
Figure (27) : Forme arrondie (3/5).....	43
Figure (28) : Forme carrée (0/8).....	43

Figure (29) : Forme carrée (3/5).....	43
Figure (30) : Forme triangulaire (0/8).....	44
Figure (31) : Forme triangulaire (3/5).....	44
Figure (32) : représentation graphique de la dimension fractale obtenue pour les différents échantillons.....	49
Figure (33) : Perméamètre de laboratoire.....	53
Figure (34) : courbe de perméabilité en fonction de la dimension fractale.....	56
Figure (35) : Coupe schématique d'une cellule oedométrique.....	60
Figure (36) : Détermination graphique de σ_p'	65
Figure (37) : courbe de compressibilité pour les trois échantillons de forme arrondie 0/8	66
Figure (38) : courbe de compressibilité pour les trois échantillons de forme carrée 0/8.....	66
Figure(39) : courbe de compressibilité pour les trois échantillons de forme triangulaire 0/8...	66
Figure (40) : courbe granulométrique après essais de compressibilité des échantillons de forme arrondie.....	67
Figure (41) : courbe granulométrique après essais de compressibilité des échantillons de forme carrée.....	67
Figure (42) : courbe granulométrique après essais de compressibilité des échantillons de forme triangulaire.....	68
Figure (43) : courbe de compressibilité pour les trois échantillons de forme arrondie 3/5.....	69
Figure (44) : courbe de compressibilité pour les trois échantillons de forme carrée 3/5.....	69
Figure (45) : courbe de compressibilité pour les trois échantillons de forme triangulaire 3/5....	70
Figure (46) : courbe granulométrique après essais de compressibilité des échantillons de forme arrondie.....	70
Figure (47) : courbe granulométrique après essais de compressibilité des échantillons de forme carrée.....	71
Figure (48) : courbe granulométrique après essais de compressibilité des échantillons de forme triangulaire.....	71
Figure (49) : courbe de perméabilité en fonction de la dimension fractale	73
Figure (50) : courbe de perméabilité en fonction de la dimension fractale.....	80

Liste des tableaux

Tableau(1) : Variation de la perméabilité en fonction de la forme.....	9
Tableau(2) : Détermination de la teneur en eau.....	35
Tableau(3) : Détermination de la masse volumique sèche	36
Tableau(4) : Détermination de la masse volumique humide.....	36
Tableau(5) : Détermination de la masse volumique des grains solides.....	37
Tableau(6) : Détermination de la masse volumique grains solides.....	37
Tableau(7) : Indices des vides, porosité et degré de saturation des échantillons étudiés.....	39
Tableau(8) : Indices des vides, porosité et degré de saturation des échantillons étudiés.....	39
Tableau(9) : Calcul de la dimension fractale pour les trois formes de classe 0/8.....	45
Tableau(10) : Calcul de la dimension fractale pour les trois formes de classe 3/5.....	46
Tableau(11) : Calcul des paramètres statistiques des matériaux utilisés	50
Tableau(12) : Résultats des essais de perméabilité pour les trois formes.....	55
Tableau(13) : Variation de l'indice des vides (Δe) en fonction de Δh	65
Tableau(14) : Tableau d'essais pour les courbes de compressibilité.....	65
Tableau(15) : Variation de l'indice des vides (Δe) en fonction de Δh	68
Tableau(16) : Tableau d'essais pour les courbes de compressibilité.....	68
Tableau(17) : Calcul des coefficients de perméabilité pour la classe 0/8.....	72
Tableau(18) : Calcul des coefficients de perméabilité pour la classe 3/5.....	73
Tableau (19) : Tableau des coefficients de perméabilité pour la classe 3/5et 0/8.....	75
Tableau (20) résultat des coefficients de perméabilité obtenus par la formule proposé.....	79
Tableau(21) Calcul d'erreur entre les résultats trouvés par la formule et ceux trouvés par l'expérimentale	81

Résumé

La perméabilité est un critère de sélection important dans le choix des sables utilisés comme matériaux d'étanchéité, de drainage ou de filtration. On se sert également de la valeur de la perméabilité pour évaluer les débits d'infiltration sous les digues et les barrages en terre et pour choisir un système de pompage chargé de maintenir à sec certaines zones des travaux. La perméabilité agit aussi sur le tassement des sables. En effet, la vitesse de tassement est fonction de la vitesse d'expulsion de l'eau des vides du sol, laquelle dépend de la perméabilité.

Pour mieux comprendre comment varie la perméabilité dans les matériaux sableux vis-à-vis des différentes sollicitations, il faut tenir compte de plusieurs facteurs à savoir la dimension, la forme, l'étalement granulométrique, la composition, la minéralogie des grains des sables utilisés.

La présente étude a pour objectif, de donner un aperçu général et le rôle que joue la forme des grains exprimée par la dimension fractale dans la perméabilité des sables.

Trois formes différentes de sable (arrondie, carrée, triangulaire) sont caractérisées par leurs dimensions fractales. Les échantillons sont ensuite, soumis à des essais de perméabilité au permeamètre à charge constante et à des essais de compressibilité à l'oedomètre.

La première partie de ce travail est consacrée à la caractérisation de la forme des grains constituant nos sables utilisés. Dans cette étude, nous avons investigué expérimentalement l'applicabilité de quelques paramètres, a priori favorable à la caractérisation de la géométrie des grains.

La deuxième partie de ce travail est une étude expérimentale sur la perméabilité au permeamètre à charge constante et à l'oedomètre. L'influence de la dimension fractale (la forme des grains) sur la perméabilité fait l'objet de cette partie, tout en mettant l'accent sur la dimension fractale des grains. Enfin, les résultats trouvés au permeamètre ont été comparés à ceux trouvés à l'oedomètre.

Les résultats obtenus sur les différentes formes de sable, ont permis de mettre en évidence que la dimension fractale à un rôle important dans l'évolution de la perméabilité.

MOTS CLES : Forme des grains, Dimension fractale, perméabilité dans les sables, compressibilité des grains.

Abstract

The permeability is an important selection criteria in the choice of soils used like materials of tightness, drainage or filtration. One also uses the value of the permeability to value the debits of infiltration under the sea wall and the dams in earths and to choose a system of pumping loaded to maintain to dry some zones of works. The permeability also acts on the jamming of the sands. Indeed, the speed of jamming is function of the speed of expulsion of the water of the soil emptiness, which depends on the permeability.

To understand better how the permeability varies in the sandy materials opposite the different solicitations, it is necessary to take into account several factors to know the dimension, the shape, the display granulométrique, the composition, the mineralogy of the grains of the materials used.

The present survey has the objective, to give a general preview and the role that play the shape of the grains expressed by the dimension fractal in the permeability of the sands.

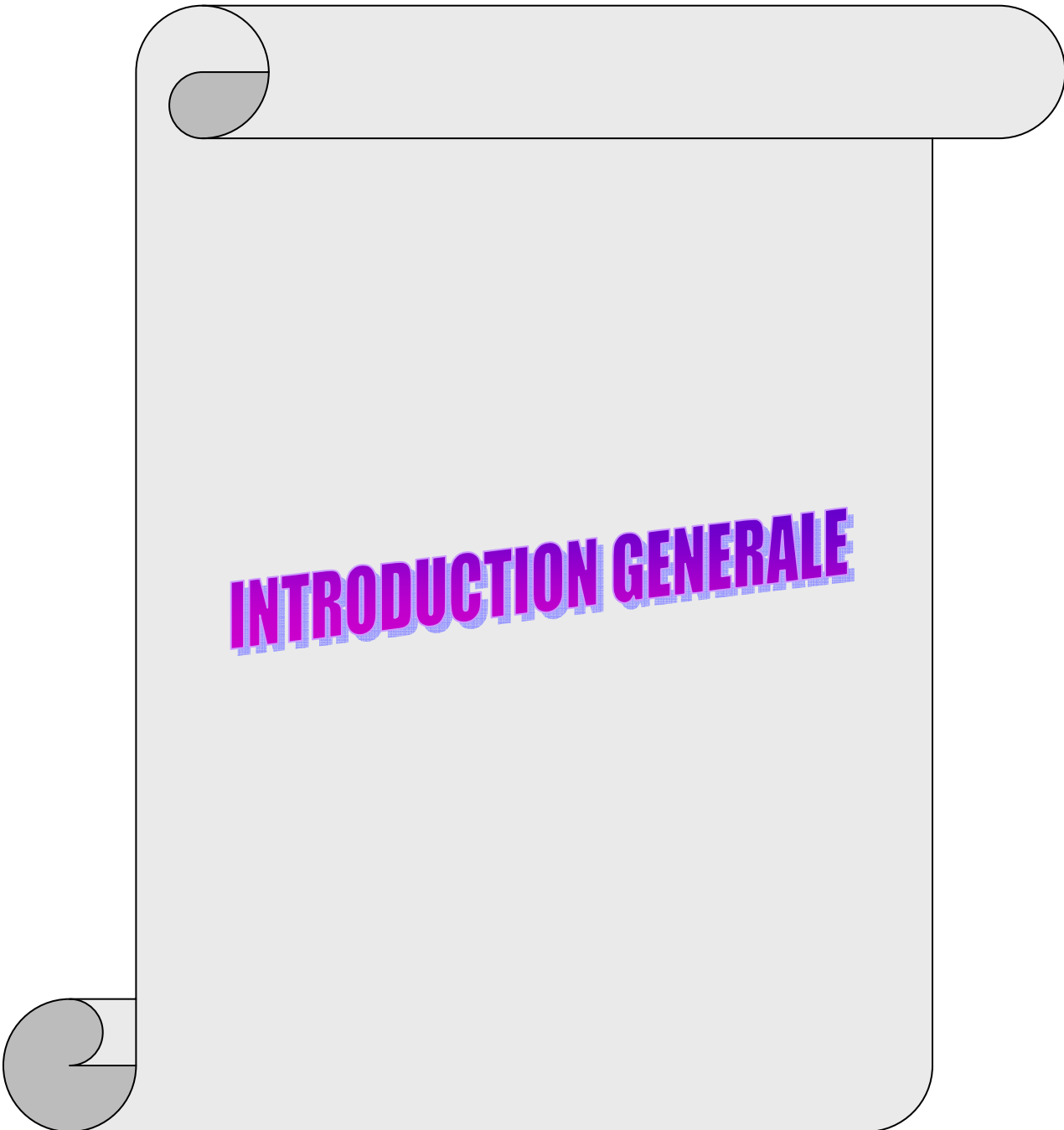
Three different shapes from sand (rounded, square, triangular) are characterised by their dimension fractal. The samples are then, submitted to tests of permeability by the permeamètre to constant load and by tests of compressibility have the oedometre.

The first part of this work is dedicated to the characterisation in the shape of the grains constituting our used sands. In this survey, we have investigated experimentally the applicability of some parameters, a priority favorable to the characterisation of the geometry of the grains.

The second part of this work is an experimental survey on the permeability on the permeamètre to constant load and by the oedometre. The influence of the dimension fractale (the shape of the grains) on the permeability is the objective of this part, highlighting the dimension fractal of the grains. Finally, the results found to the permeamètre have been compared on those found on the odometer.

The results obtained from the different shapes of sand, permitted to put in evidence that the dimension fractal plays an important role in the evolution of the permeability.

KEY WORDS: Shape of the grains, Dimension fractal, permeability in the sands, compressibility of the grains.



INTRODUCTION GENERALE

Les matériaux granulaires (sables) sont très utilisés dans les ouvrages de Génie Civil tel que : ouvrages linéaires autoroutiers et ferroviaires, ouvrages maritimes, barrages et digues, etc..., demandent une meilleure maîtrise de ces matériaux, afin de développer des méthodes de conception et de réalisation plus performantes, pour avoir un meilleur contrôle des risques.

La durée de vie des ouvrages de génie civil dépend essentiellement du comportement des matériaux utilisés comme couche d'assise ou matériaux de construction, vis-à-vis des sollicitations extérieures engendrées par l'ouvrage lui-même ou les phénomènes naturels tels que le séisme et les intempéries. Pour cela, il faut tenir compte de plusieurs facteurs à savoir : la forme, la granulométrie, le degré de saturation, la teneur en eau, la perméabilité, l'indice des vides de ces sables.

La perméabilité est un critère de sélection important dans le choix des sables utilisés comme matériaux d'étanchéité, de drainage ou de filtration. La forme des grains de ces sables joue un rôle très important sur leur perméabilité.

L'objectif de cette étude est d'analyser la forme des grains en les caractérisant par la dimension fractale qui est une notion généralisée de la dimension euclidienne qui permet d'évaluer la perméabilité des sables de forme arrondie, carrée et triangulaire à l'aide des essais de perméabilité au permeametre et à l'oedometre.

Le mémoire est subdivisé en cinq chapitres:

Le chapitre I englobe toutes les généralités indispensables à connaître sur la perméabilité des sables. Dans ce chapitre, les facteurs internes pouvant influencer la perméabilité des sables sont recensés.

Le chapitre II est consacré à définir la dimension fractale. Celle-ci est une notion qui englobe la géométrie euclidienne au sens large. Les différentes caractéristiques d'un objet fractal, les différentes méthodes utilisées pour calculer la dimension fractale et le lien qui existe entre la perméabilité et la dimension fractale ont été décrits.

Le chapitre III regroupe toutes les caractéristiques physiques des sables choisis pour cette étude. Trois formes ont été choisies (arrondie, carrée, triangulaire). Pour chaque forme de sable, les caractéristiques physiques à savoir l'analyse granulométrique, les différents poids volumiques, le degré de saturation et la teneur en eau, ont été déterminés. Nous avons prélevé trois échantillons de quinze grains pour chaque forme et pour classe granulaire (0/8, 3/5) pour déterminer leur dimension fractale. Une étude statistique a été ensuite menée.

Dans le chapitre IV, nous présentons le matériel utilisé (l'appareillage) et le principe suivi lors des essais de perméabilité aux perméamètres à charge constante. Les résultats d'essais sur les trois formes de sable choisis de classe (0/8, 3/5) ont été présentés. Les résultats obtenus sont exprimés sous forme de courbe de perméabilité en fonction de la dimension fractale.

Dans le chapitre V, nous présentons le matériel utilisé (l'appareillage) et le principe suivi lors des essais de compressibilité (perméabilité) à l'oedomètre. Les résultats d'essais sur les trois formes de sable choisis de classe (0/8, 3/5) ont été présentés. Les résultats obtenus sont exprimés sous forme de courbe de perméabilité en fonction de la dimension fractale.

Le chapitre VI est consacré à la proposition d'une nouvelle formulation de perméabilité en tenant compte de la forme des grains qui est exprimée par la dimension fractale.

Enfin, on termine cette étude par une conclusion générale, où on a synthétisé l'ensemble des résultats obtenus.

CHAPITRE I

GENERALITE SUR LA PERMEABILITE

I-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 éléments 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.

I.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.

I.3 CONSIDERATIONS GENERALES SUR LA PERMEABILITE DES SOLS GRENUS

En 1856, DARCY, ingénieur du 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 et en bas de l'échantillon durant le test (figure1). A partir des résultats de ces tests, il a établi empiriquement la

relation suivante :

$$Q = k \frac{H_A - H_B}{L} A = k i A \dots \dots \dots (1)$$

Ou :

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 $\frac{H_A - H_B}{L}$

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

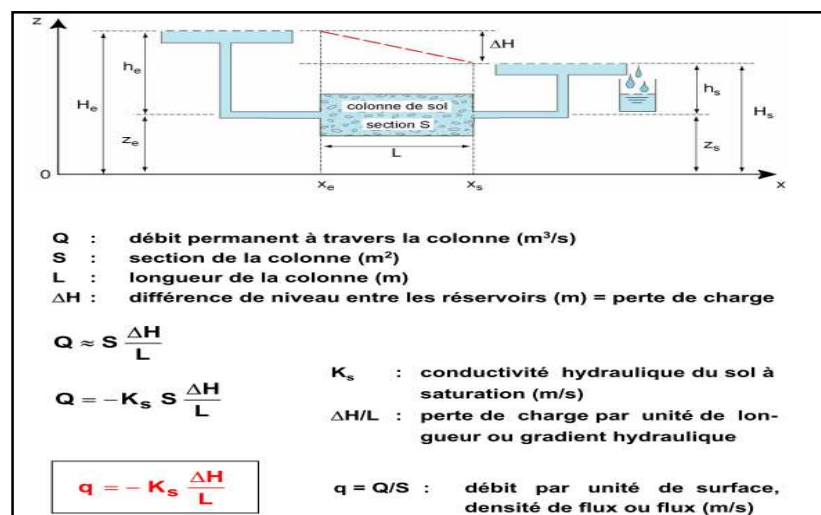


Figure1 : Principe du perméamètre

I.4 VALIDITE DE LA LOI DE DARCY

Depuis que DARCY a présenté ses travaux en 1856, l'équation (1) a été sujette à examen par un 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 plupart des types d'écoulements dans les sols ayant des dimensions allant du sable moyen au limon. Cependant, des 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 tous 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.

➤ sables grossiers

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 le cas où l'interaction sol-eau n'introduit pas de changements dans la fluidité. Dans les sables grossiers et les graviers, 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.

I.5 FACTEURS POUVANT AFFECTER LA PERMEABILITE

Dans les nombreuses études menées sur les matériaux étudiés que ce soit leur minéralogie ou leurs caractéristiques physiques, il a été constaté que leurs paramètres physiques ou chimiques ont permis de conclure que ces derniers ainsi que leurs variations affectent leurs perméabilités. Parmi ces paramètres dont il s'agit.

- **Influence de la taille des particules**

Les résultats de (GUERIN, 2004) reportés sur la figure 2, montrent 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).

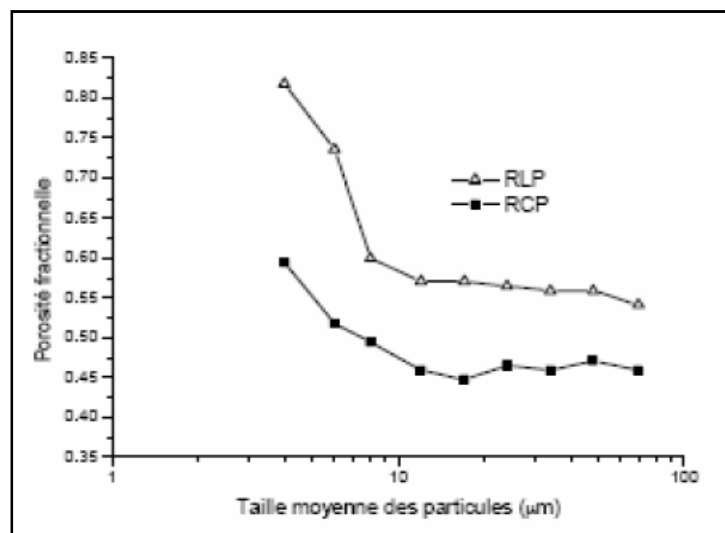


Figure 2 : Influence de la taille des particules du mélange sur les valeurs de la porosité d'après GUERIN (2004)

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 $1000\mu\text{m}$.

- **Influence de la distribution granulométrique**

La distribution de tailles des particules est un paramètre pouvant influencer la compacité d'un empilement de particules sèches (GUERIN, 2004). La figure 3 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.

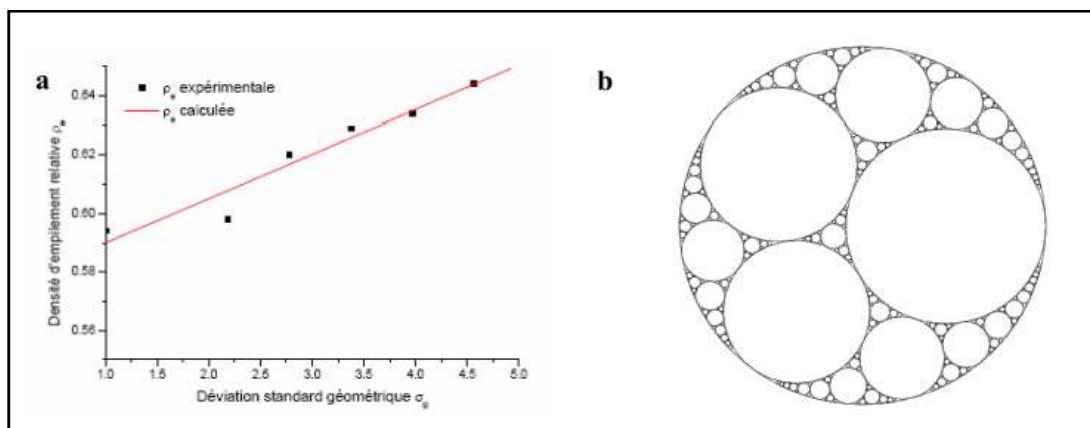


Figure 3 : Evolution de la densité de l'empilement de particules sèches en fonction de la déviation standard géométrique (GUERIN, 2004)

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 3).

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) a 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.

- **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 (GURIN, 2004). Celle-ci est liée à une forte probabilité de formation de pontages et à l'augmentation des frictions interarticulaires pour des particules présentant des angularités.

La figure 4 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 diminution de 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.

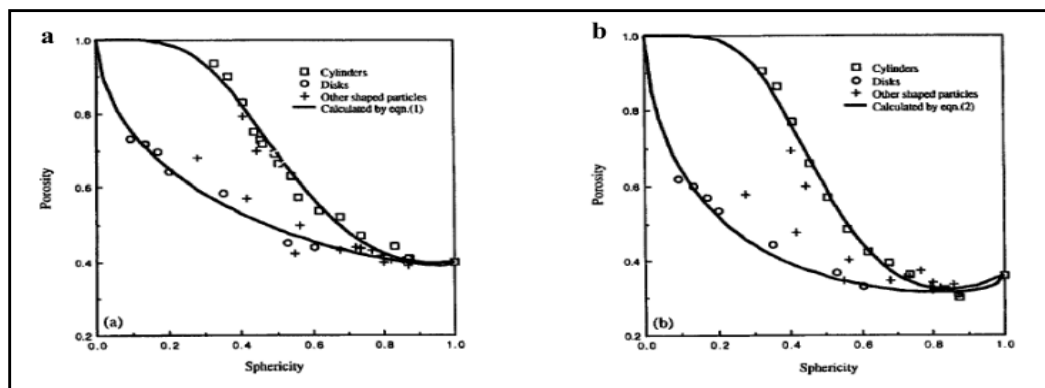


Figure 4 : Evolution de la porosité en fonction de la sphéricité pour différentes formes des Particules (GUERIN, 2004).

- **Influence de la structure du sable**

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

Tableau 1 : Variation de la perméabilité en fonction de la forme

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

- **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.

- **Influence du degré de saturation**

Dans les sables partiellement saturés, les pores de sol contenant de l'air piégé ne participent pas parfaitement à l'écoulement du 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 5 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 ».

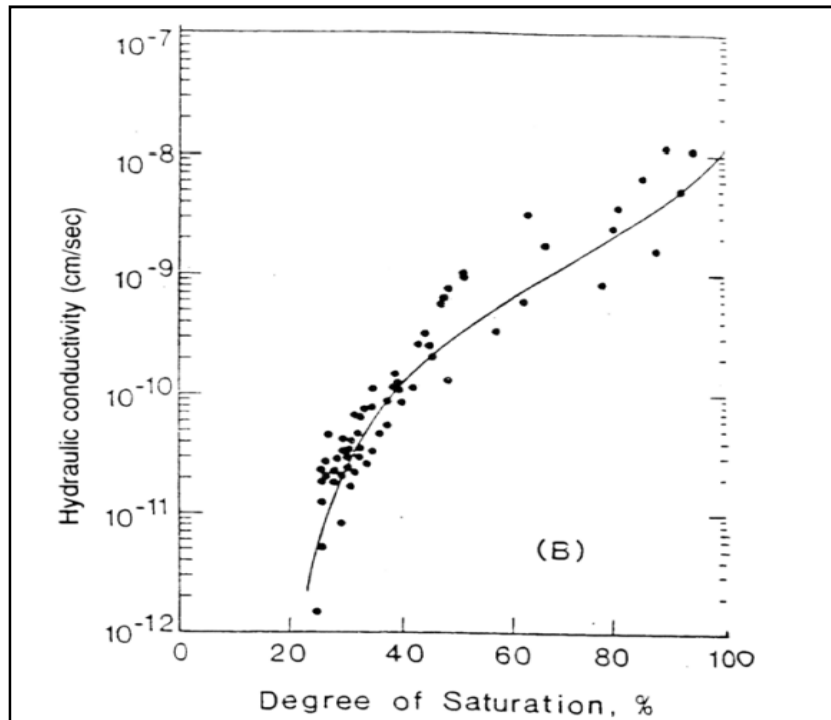


Figure 5 : La perméabilité en fonction de degré de saturation pour un sable (OLSON et DANIEL, 1979).

- **Influence de l'état 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 (COULOMB, 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 (CLAUDIN, 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 influencée par l'état de surface des particules dont on étudie la densification.

- **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 6 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 en eau 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.

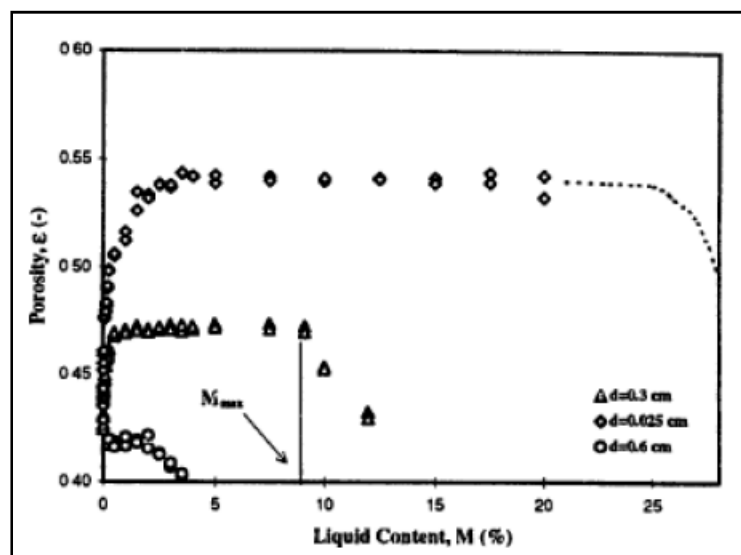


Figure 6 : Evolution de la porosité en fonction de la teneur en eau pour un sable
(FENG et YU, 1998)

1.6 FORMULES UTILISEES POUR LE CALCUL DE LA PERMEABILITE

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 (CARMAN, 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 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;
- α coefficient de viscosité de l'eau ;

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 ;

3-formule de HAZEN

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

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

Avec :

d_{10} : diamètre efficace des grains ;

4-formule de AWAD et AMER

Les auteurs AWAD 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.

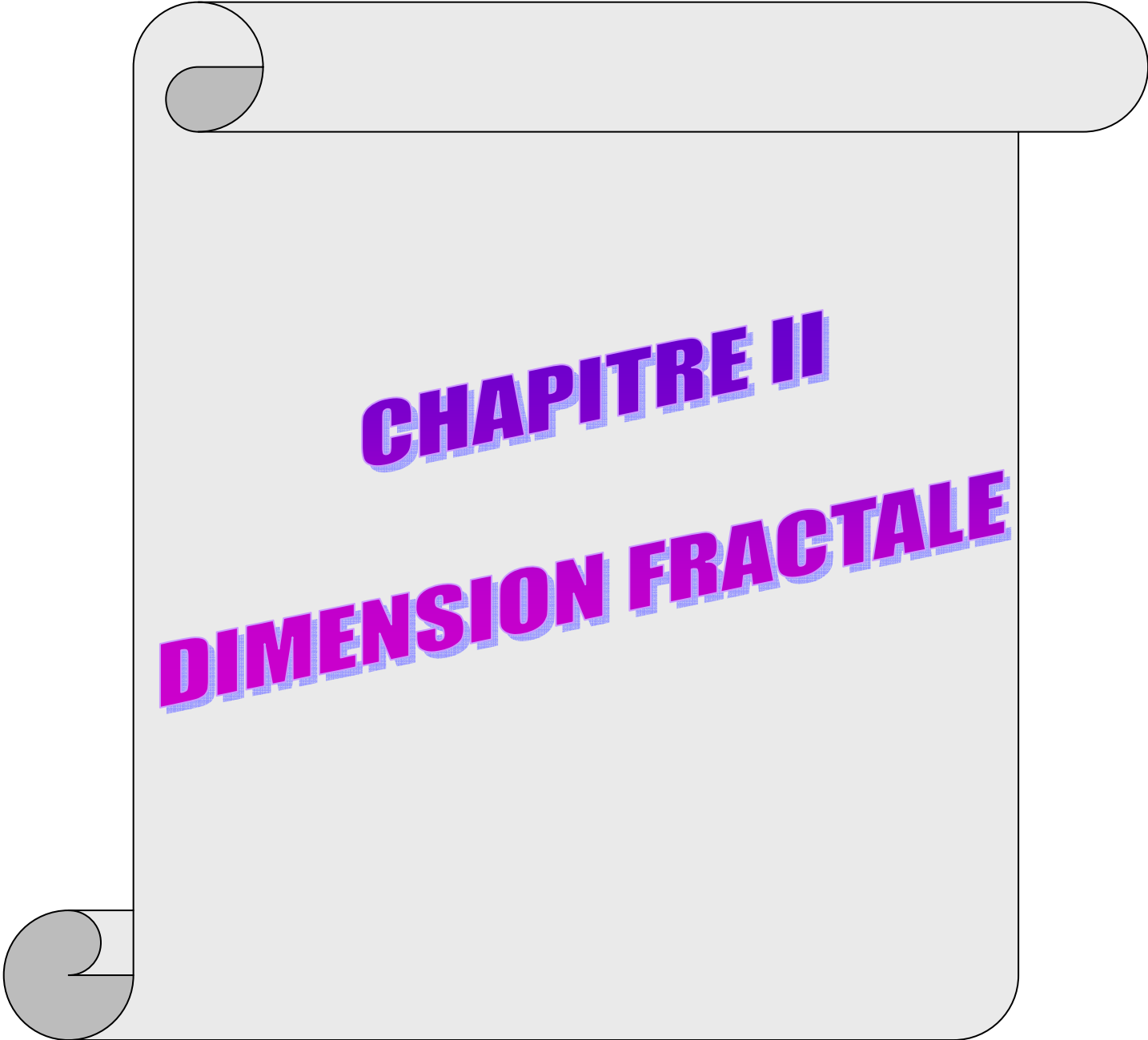
D_{10} : diamètre efficace des grains.

e : indice des vides.

I.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 II

DIMENSION FRACTALE

II-1 HISTORIQUE

Une droite a la dimension 1, une surface la dimension 2 et un volume la dimension 3.

Existe-t-il des objets de dimension intermédiaire? Cette question n'est pas que mathématique!

Le concept de dimension fractale a été élaboré il y a longtemps déjà. En 1919, HAUSSDORF affirme dans un article que certaines figures idéalisées peuvent avoir une dimension non entière. Le formalisme essentiel en ce qui concerne la dimension fractale est donc publié depuis de nombreuses années. Mais, à ce jour, il n'a pas encore trouvé place dans l'enseignement.

II-2 INTRODUCTION

La structure d'un milieu granulaire est faite des particules et d'éléments structuraux de dimension et de géométrie différente, formé par l'agrégation des particules plus petites. L'objectif essentiel était de déterminer l'état d'agrégation et la forme des grains résultant de ce processus du milieu granulaire de façon à rendre compte de la variation de la structure ou de l'agrégation des sols.

Ce problème classique de la physique des milieux granulaires a pris récemment une nouvelle dimension avec la prise de conscience que ces derniers sont à la fois des milieux fragmentaires et des milieux poreux, une représentation de sa structure pourrait lui être particulièrement appropriée (MANDEBROT, 1983 ; TURCOTE, 1986).

II-3 DEFINITION

Plusieurs auteurs ont une idée de la signification du mot « fractale » mais peu savent vraiment de quoi il s'agit. Inventé en 1975 par MANDELBROT, ce mot signifie à la fois « brisé » et « irrégulier » et sert à représenter géométriquement des objets dont la forme est extrêmement irrégulière. Ces objets présentent des éléments discernables sur une large gamme d'échelles.



Figure 7 : Quelques objets fractales constituant un milieu granulaire

La description du monde réel est soumise aux lois de la géométrie. Mais la géométrie traditionnelle qui ne dispose que de figures simples comme les droites, les cercles et les sphères devient parfois insuffisante. Comment pourrait-on, sans perdre trop de temps dans les calculs et d'espace mémoire pour décrire des objets complexes, irréguliers et animés de fluctuations aléatoires comme les grains constituant un milieu granulaire. Avec la géométrie fractale dont la clé est la dimension non entière, caractère essentiel des objets irréguliers, leur description et leur compréhension de ces objets deviennent plus aisées.

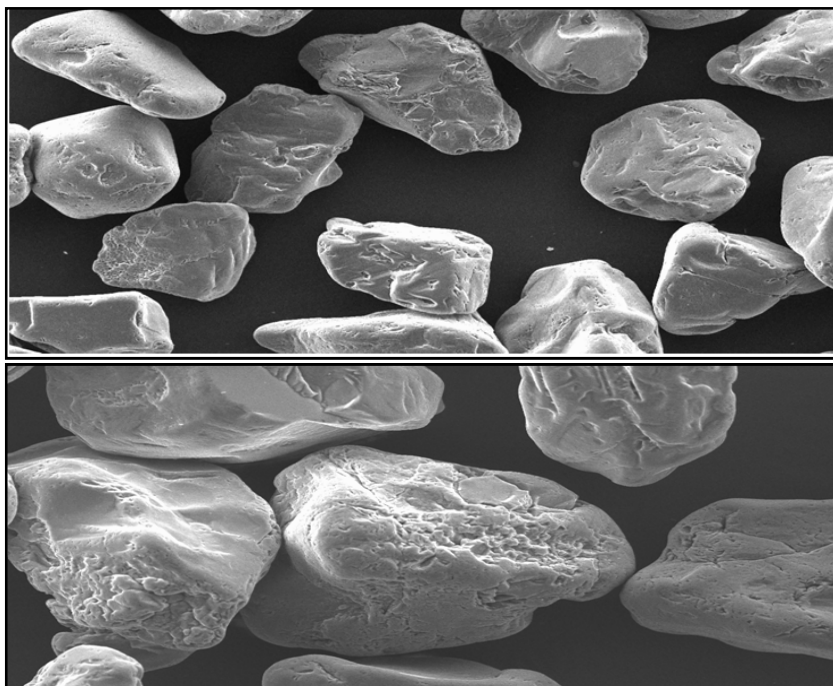
II-4 CARACTERISTIQUES D'UN OBJET FRACTALE

Les objets fractales sont caractérisés par leur irrégularité, leur rugosité et la complexité de leur forme qui leur a valu leur nom fractale (du latin fractus irrégulier, fragmenté), plus un objet est irrégulier et plus sa dimension fractale est élevée.



Figure 8 : Caractérisation des irrégularités et la rugosité des grains

➤ **L'état de surface**



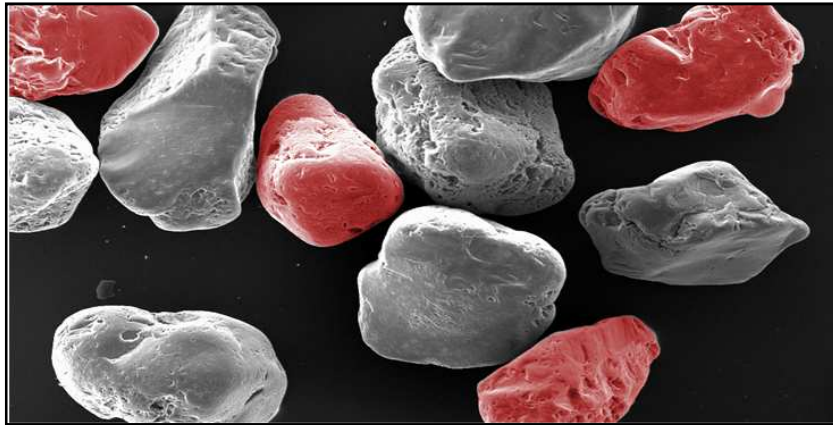


Figure 9 : Morphologie des particules de sable observée au microscope électronique balayage (MEB)

L'augmentation de la friction entre particules, causés 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. Les forces de friction, historiquement mises en évidence donnent une stabilité à l'arrangement granulaire à travers l'angle de friction.

Celui-ci est d'autant plus grand que la rugosité de contact est forte (CLAUDIN, 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 influencée par l'état de surface des particules.

➤ La forme

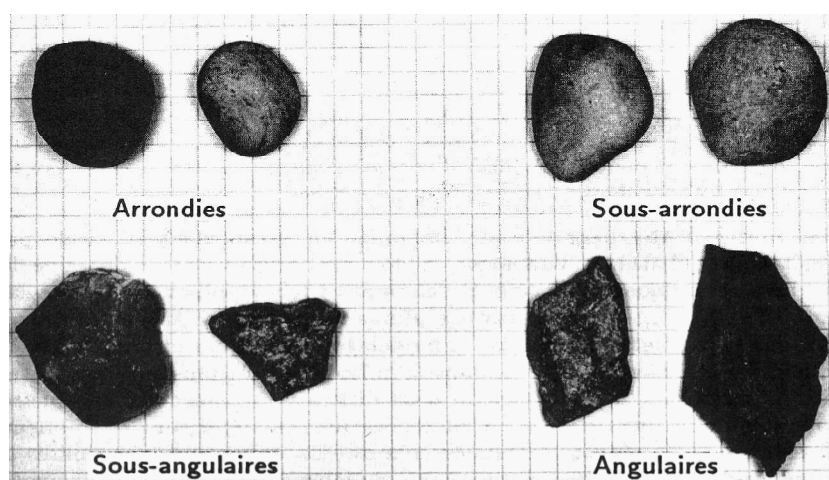


Figure 10 : Différentes formes des grains

Il s'agit ici de regarder la forme générale des grains de sable placés dans une capsule, et visionnés à l'aide d'une loupe binoculaire.

L'étude de la forme des grains, qui peut sembler superflue au premier abord, donne néanmoins sept catégories de formes différentes

- ❖ **Rond** : les grains sont lisses et ressemblent à des billes. Ils roulent dans la capsule.
- ❖ **Rond à semi-angulaire** : la forme de la plupart des grains, encore très arrondis, commence à devenir semi-angulaire.
- ❖ **Semi-angulaire à rond** : Il y a davantage de grains à tendance semi-angulaire que de grains à tendance sphérique.
- ❖ **Semi-angulaire** : grains dont la surface présente des angles bien visibles mais dont l'aspect général revêt une forme arrondie.
- ❖ **Semi-angulaire à angulaire** : l'ensemble des grains tend à devenir angulaire.
- ❖ **Angulaire à semi-angulaire** : les plus petits grains sont angulaires alors que les plus gros sont semi-angulaires (arrondis au lavage).
- ❖ **Angulaire** : les grains montrent des arêtes vives. Ils sont peu mobiles dans la capsule.

La forme des grains de sable a non seulement une influence sur le foisonnement, car les grains de forme arrondie empêchent le sable de se tasser, mais encore sur la perméabilité, car les espaces lacunaires sont plus étroits que les sables de forme angulaire à semi-angulaire.

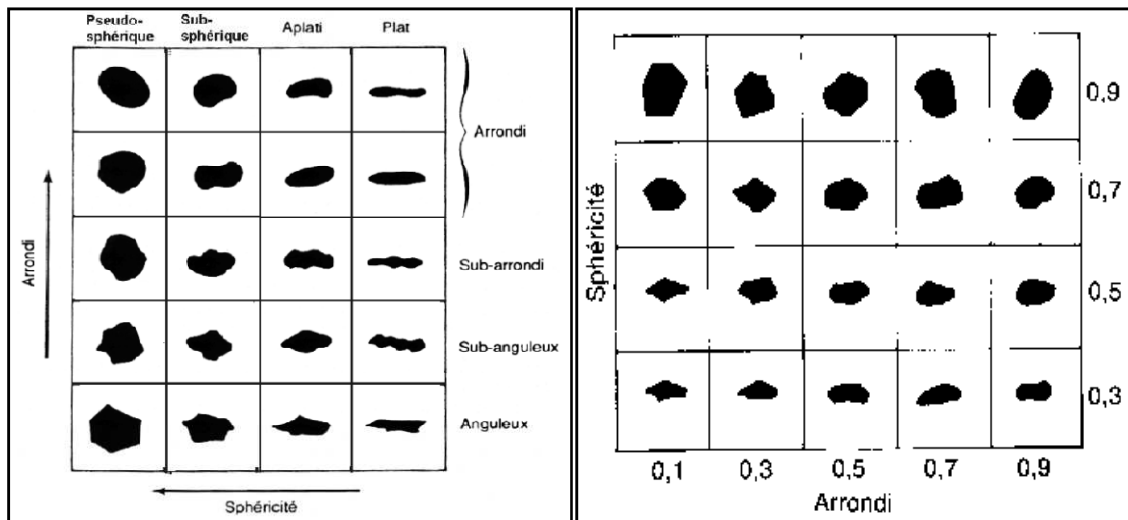


Figure 11 : Echelle de sphéricité des grains

II-5 LES DIFFERENTS TYPES DE FRACTALES

On peut distinguer plusieurs types de fractale:

5-1 Les fractales déterministes

On parle des fractales déterministes lorsque les grains résultant d'une agrégation ou de la fragmentation d'un milieu granulaire ayant presque la même forme (c'est un cas rare).



Figure 12 : Fractales déterministes d'un milieu granulaire

5-2 Les fractales non déterministes

Par opposition aux fractales déterministes, on appelle fractales non déterministes les grains résultant d'une agrégation ou de la fragmentation d'un milieu granulaire aboutissant à des formes extrêmement irrégulières et des grains très anguleux (c'est le cas le plus fréquent).

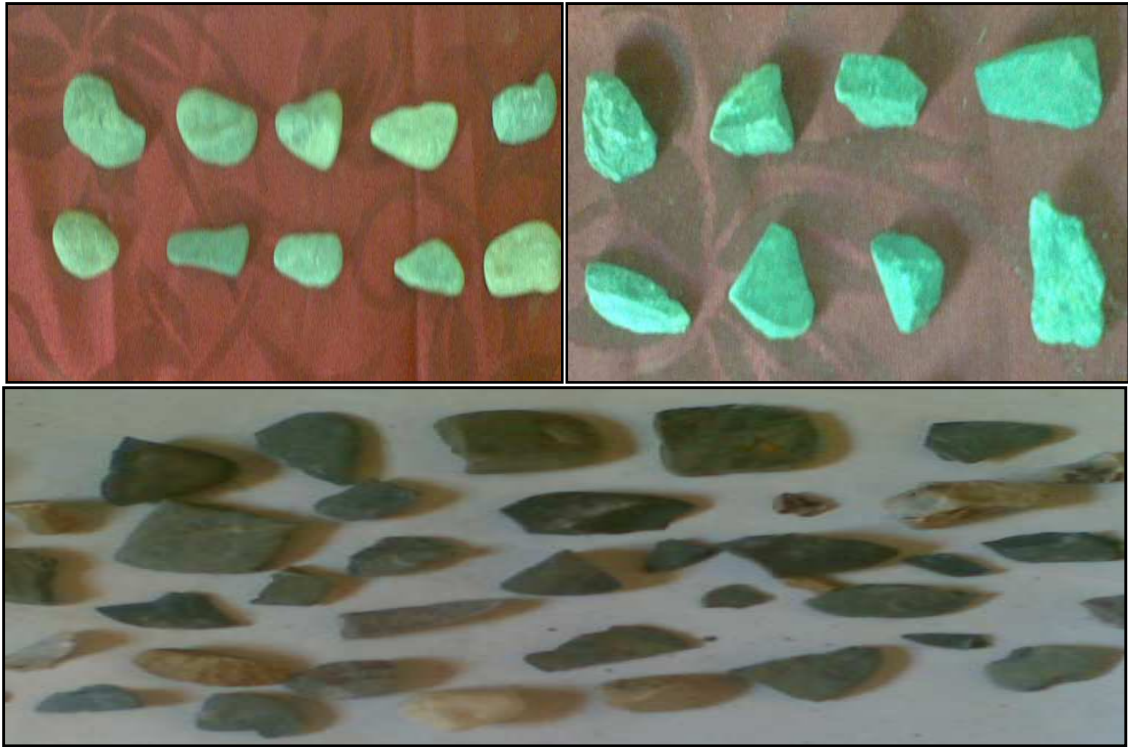


Figure 13 : Fractales non déterministes d'un milieu granulaire

II-6 LES PROPRIETES D'AUTO-AFFINITE ET D'AUTO-SIMILARITE DES FRACTALES

Une forme est une fractale s'elle présente les propriétés suivantes :

- a) elle est caractérisée par une structure fine (c'est-à-dire à chaque fois qu'on diminue l'échelle d'observation on remarque plus d'angularité et de rugosité).
- b) elle présente une structure très irrégulière et elle se fragmente en petits éléments.
- c) les objets constituant le milieu possèdent souvent des formes d'autosimilarité, peut-être de manière approximative ou statistique.
- d) elle est infiniment imbriquée dans elle-même dont certaines parties sont semblables.
- e) Habituellement, la dimension fractale d'une forme est plus grande que sa dimension topologique

II-7 METHODES DE DETERMINATION DE LA DIMENSION FRACTALE

7-1 Méthode de la règle (ou ruler- ou yardstick- ou divider-method)

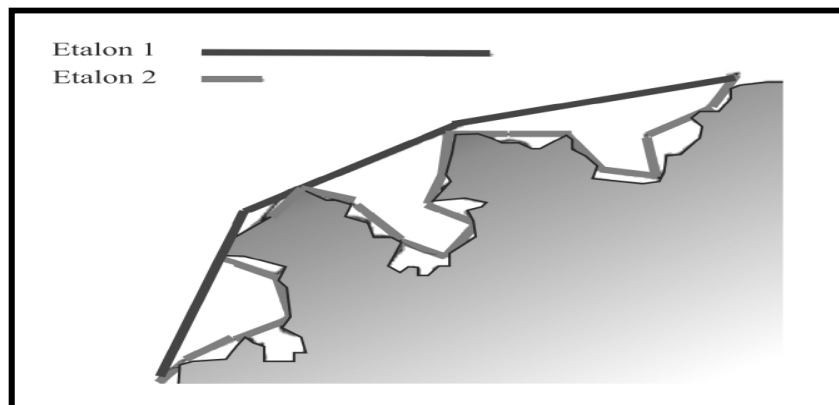


Figure 14 : Utilisation de différentes règles pour parcourir les différents cotés

La méthode de la règle est une application directe de la définition de la dimension fractale. La dimension fractale D est obtenue lorsque y , la longueur de la règle, tend vers 0. Cela veut dire que la dimension fractale ne peut être obtenue que lorsque Y est suffisamment petit.

$$L = (N \times Y)^D \quad \longrightarrow \quad D = \frac{\log L}{\log N}$$

L : la longueur parcouru.

Y : la longueur de l'étalon utilisée.

N : nombre d'étalon utilisé.

D : dimension fractale.

Comme on peut le voir, il est clair qu'il Y a une valeur critique de Y (ou du nombre générateur). C'est seulement en-dessous de cette valeur de y (ou au-dessus de la valeur critique du nombre générateur) que la valeur calculée de la dimension fractale est la valeur vraie.

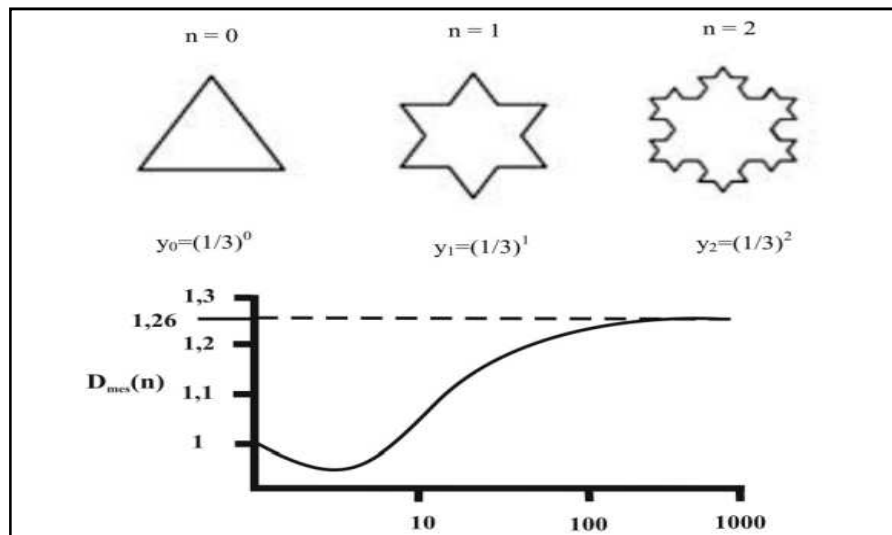


Figure 15 : Relation entre la dimension fractale et le nombre générateur

7-2 Analogie avec la courbe triadique de koch

La courbe triadique de KOCH est une figure fractale qui peut se définir en (figure 16) :

on commence par tracer une ligne de longueur unitaire. Cette forme de départ est appelée « initiateur », ou 0 ème générateur. La construction de la courbe triadique de Koch consiste à remplacer chaque segment de l'initiateur par le générateur montré à la figure 16 et désigné par $n=1$. On obtient ainsi la première génération. La deuxième génération est obtenue en remplaçant chaque segment ainsi obtenu par le générateur. En répétant indéfiniment cette opération on obtient alors la courbe triadique de KOCH dont la dimension fractale vaut $D = \log 4 / \log 3 = 1.26$.

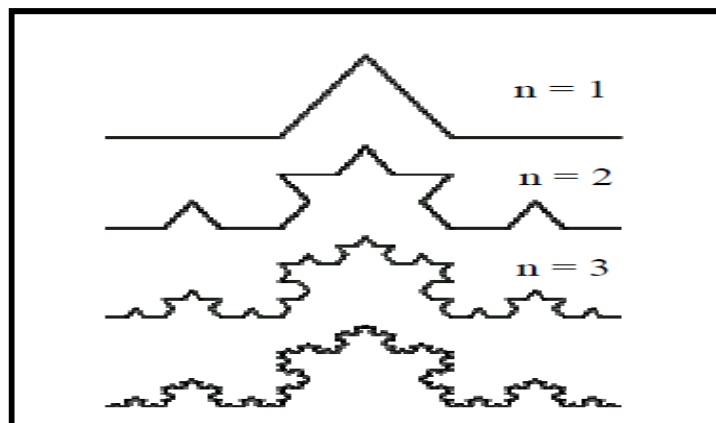


Figure 16 : Construction de la courbe triadique de KOCH

Plusieurs auteurs utilisent la similarité statistique du profil moyen d'un joint avec la courbe triadique de KOCH. La différence résulte dans le fait que le profil moyen d'un joint est obtenu avec un nombre fini de générations, alors que la courbe triadique de Koch est obtenue au bout d'une infinité de générations.

En se basant sur cette idée, on peut faire l'hypothèse que le profil des joints dans la nature a une construction identique à la courbe de KOCH. Afin de simuler les joints réels, on généralise la règle de génération de la courbe de KOCH.

7-3 Méthode du comptage des boîtes

Dans cette méthode, une ligne irrégulière est recouverte par une grille constituée de boîtes (ou cellules) carrées de même dimension. On compte alors le nombre de cellules qui incluent une partie de la ligne irrégulière. Lorsque l'on diminue la taille des boîtes r , le nombre de cellules contenant des fragments de la ligne irrégulière augmente considérablement. Le nombre de cellules $N(r)$ nécessaire pour couvrir entièrement la ligne irrégulière est fonction de la taille des cellules et suit la relation :

$$N(r) = \frac{1}{r^D}$$

En pratique, cette méthode est fort proche de la méthode de la règle, même si la dimension des boîtes peut être ici identiques (boîtes rectangulaires) et s'appliquer ainsi aux figures auto affines.

Elle est la méthode la plus couramment utilisée par les logiciels de traitement d'images.

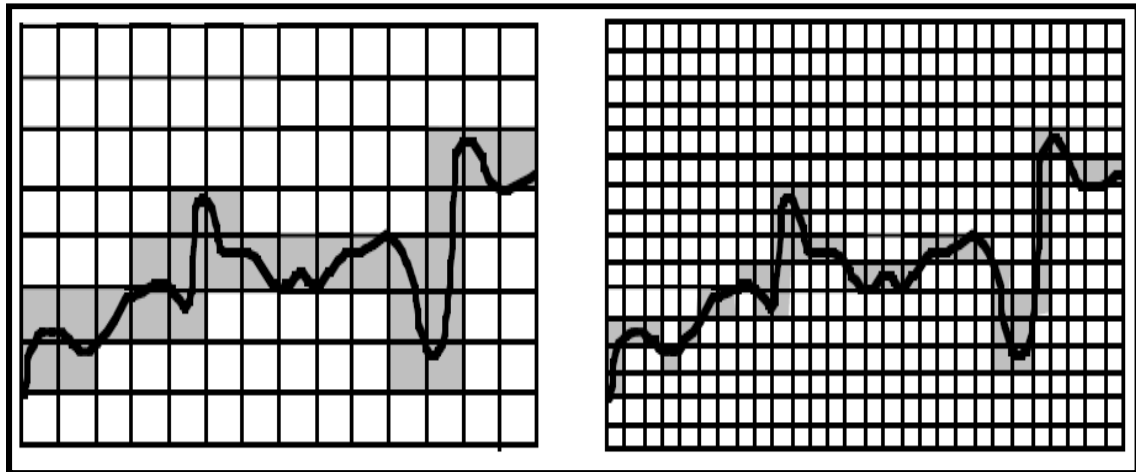


Figure 17: Méthode des boîtes ("box counting")

7-4 Area- perimeter

La méthode d'area-perimeter est connue comme une méthode la plus facile pour appliquer la géométrie fractale. Après formation des images d'un certain nombre des grains de sol, des techniques de traitement d'images sont utilisées pour obtenir le périmètre et la surface des grains. Dans ce processus, la proposition de MANDELBROT de "linear ratio of extents" (rapport linéaire d'estimation) peut être employée (MANDELBROT, 1983).

$$C = \frac{P^{1/D_R}}{A^{0,5}}$$

Dans cette équation

C : est une valeur constante qui décrit la similitude de la forme fractale.

P : est le périmètre du grain.

A : est la surface du grain.

D : est la dimension fractale moyenne de la rugosité des grains. Elle caractérise l'irrégularité du contour de grain. Théoriquement, elle vaut 1 pour des contours lisses et réguliers tels que le cercle.

En prenant le logarithme des deux cotes dans l'équation, on peut obtenir l'expression suivante

$$\frac{1}{D_R} \log P = \log (c \sqrt{A})$$

D'où l'on tire $\log P$ par l'expression

$$\log P = \frac{D_R}{2} (\log c^2 + \log A)$$

En posant $K = D_R \log c$, l'équation suivante est obtenue

$$\log P = k + \frac{D_R}{2} (\log A)$$

Dans l'équation, la pente de la ligne d'ajustement normal de A-P est égale à $2/D_R$. Cependant, ce modèle ne peut pas déterminer la dimension fractale pour les grains de sol séparément.

Essentiellement, la dimension fractale déterminée par la méthode de area-perimeter est une valeur "commune" pour les grains. Par conséquent, la méthode de line divider semble être une approche plus raisonnable concernant la détermination de dimension fractale.

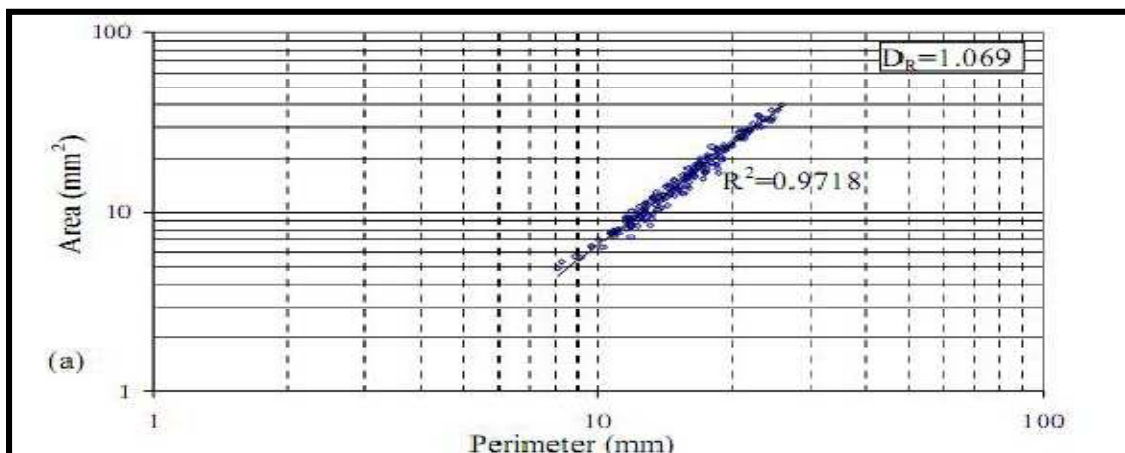
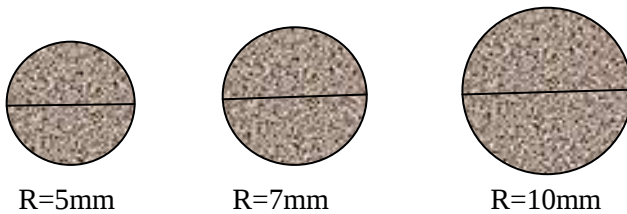


Figure 18 : Application de la méthode de area –perimeter d'un gros grain de sable d'origine d'une pierre calcaire

Pour la détermination de la constante « C » en utilise trois cercle de rayon 5,7, 10 mm et on applique la formule suivante dans le cas des contours lisses et réguliers ou $D = 1$.

$$C = \frac{P^{1/D_R}}{A^{0,5}}$$

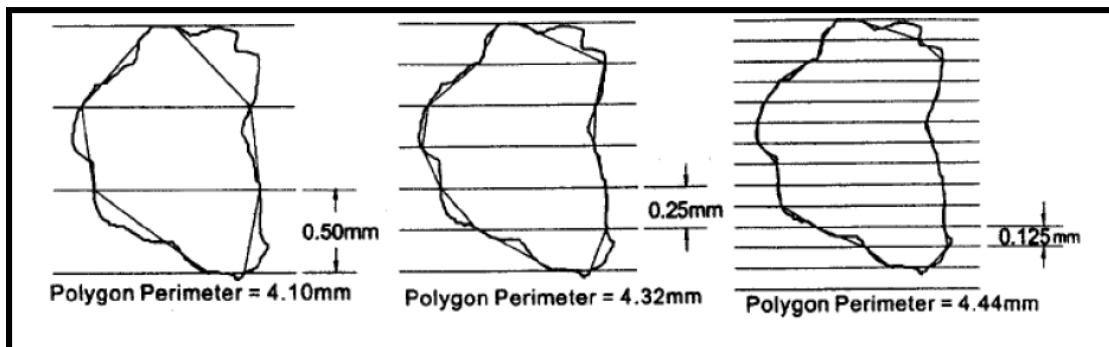


Après calcul ,on retrouve

C=1.77

7-5 Méthode des lignes parallèles (KEVIN, HAMMER, 2005)

La mesure de la rugosité par la méthode des lignes parallèles, ressemble à la méthode précédente .Traçant tout d'abord des lignes parallèles, puis en employant une unité de longueur de la mesure en fonction de toute la longueur du périmètre des particules (figure 19).



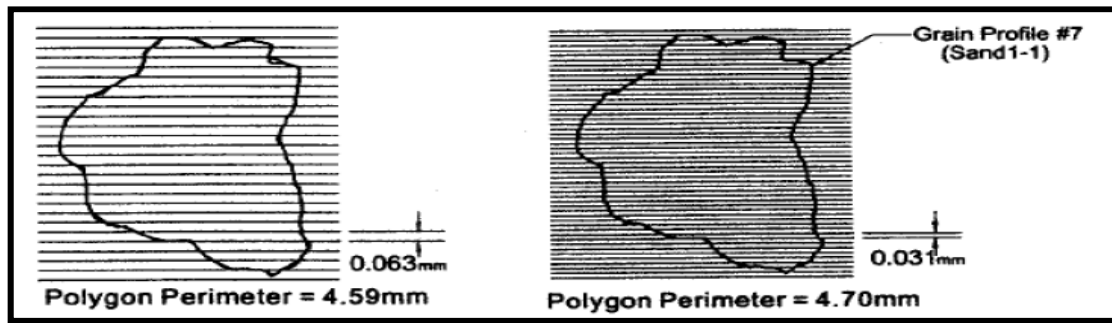


Figure 19 : Schéma représentant la méthode des lignes parallèles

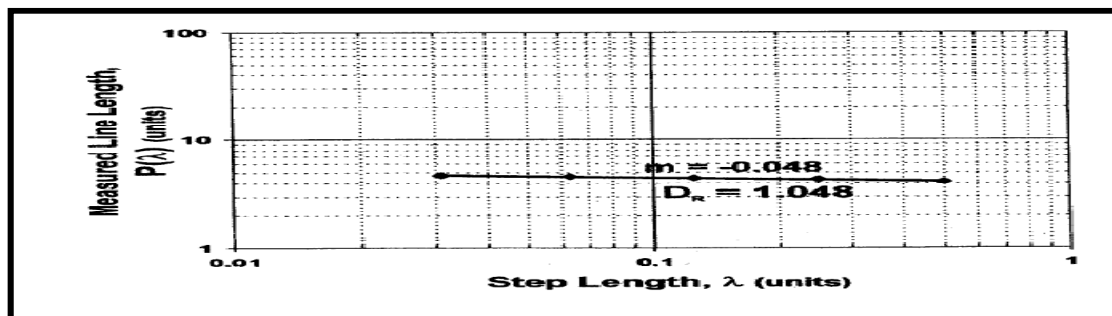


Figure 20 : Courbe de la dimension fractale de la méthode des lignes parallèles
II-8 MODELISATION FRACTALE DE LA STRUCTURE DU SOL

C'est ainsi que l'on peut assez bien imaginer un sol formé de motte de terre se décomposant en agrégats, qui eux mêmes se décomposent en sous-agrégats similaires.

L'observation de sections de ces mottes, à un plus grand niveau de résolution révèle de nouveaux détails de la structure, et le réseau des pores plus fins développé au sein des mottes présentes une forte analogie avec le réseau de macro-fissures.

Une première question se pose comment passer du stade qualitatif (cet objet fait penser à une fractale) au stade quantitatif, le quantifier par des paramètres caractéristiques d'une fractale ? Le paramètre essentiel, souvent le seul, déterminant un objet fractale est sa dimension fractale.

Un premier problème se pose en parcourant la littérature, abondante sur le sujet de la définition d'une dimension fractale, semble changer d'un article à l'autre et l'on se demande au premier abord si l'on mesure bien la même chose. Il ne s'agit pas ici de refaire un traité sur la géométrie fractale. Depuis l'ouvrage de référence de (MANDELBROT, 1982).

II-9 LIEN ENTRE LA POROSITE (PERMEABILITE) ET LA DIMENSION FRACTALE

L'étude de la porosité (compacité) d'un mélange granulaire (sable) en fonction de la dimension fractale a fait déjà l'objet d'étude (CHOUICHA, 2005). Des mélanges granulaires dont la distribution des grains est parfaitement fractale ont été composés, chaque mélange granulaire étant identifié par la dimension fractale D_f et par son étendue granulaire (d/D).

Des essais de détermination expérimentale de la porosité ont été menés. Les valeurs obtenues sont exprimées en fonction du produit de la dimension fractale par le logarithme de (d/D), c'est à dire $DF.\log (d/D)$.

Les résultats montrent la pertinence de l'utilisation de ce couple puisqu'il nous permet d'identifier les mélanges granulaires et de décrire l'évolution de la valeur de la porosité (compacité) selon une mise en œuvre donnée. Comme il nous permet de mettre en relief la même valeur optimale de la dimension fractale, celle pour laquelle la porosité est minimale, qui est en fait celle de la dimension topologique d'un volume c'est à dire la valeur 3.

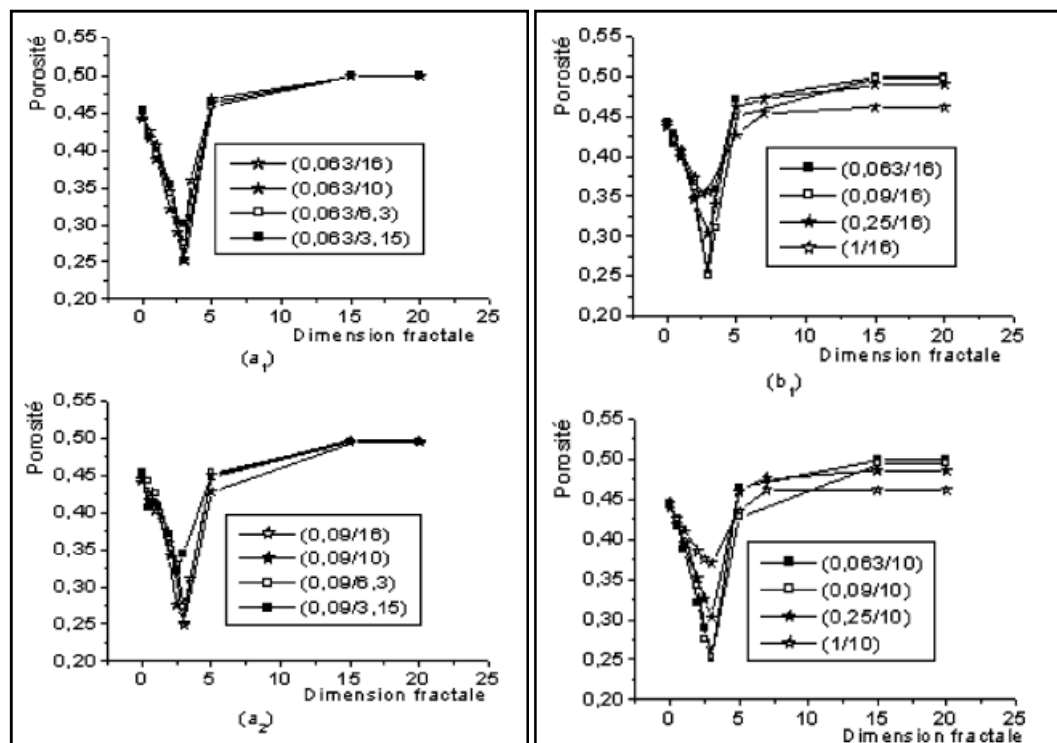


Figure 21 : Porosité en fonction de DF (ai) Mélanges d/D_i , (bi) Mélanges d_i /D

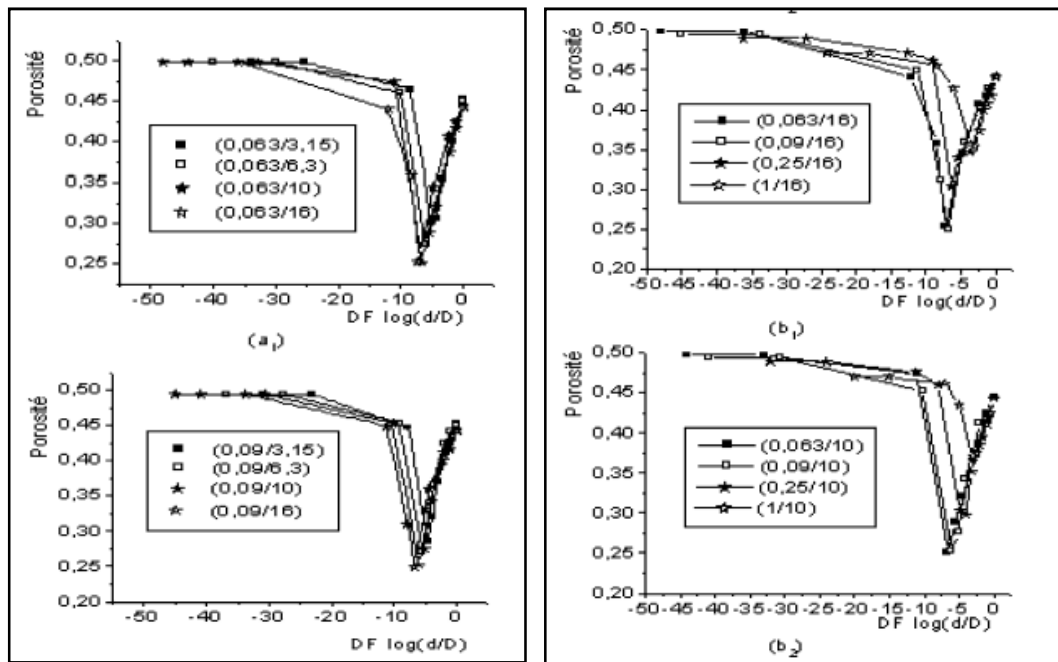


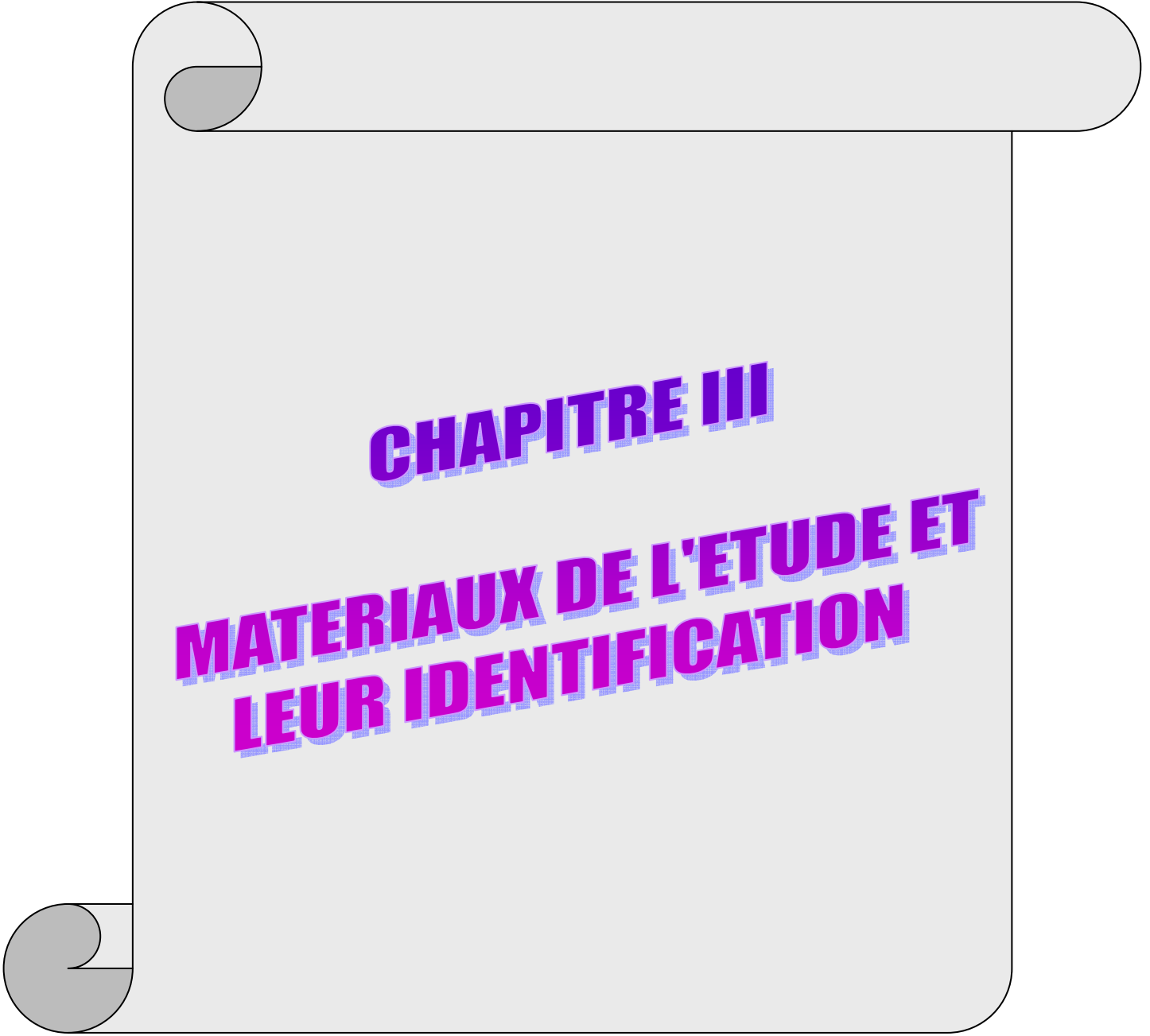
Figure 22 : Porosité en fonction de $DF \cdot \log(d/D)$ (a₁) Mélanges d_i/D_i ; (b₁) Mélanges d_i/D

II-10 CONCLUSION

C'est seulement depuis la parution des travaux de MANDELBROT que nous commençons à bien percevoir ce qu'est, et quel est l'intérêt de la conformation fractal. En effet ses travaux ont permis entre autres, de rationaliser des formes qui nous semblaient avant cela irrationnelles.

Nous avons cherché à donner un aperçu sur des principes de la géométrie fractale en cherchant avant tout à faire un inventaire des principales définitions couramment utilisées. Si ces différentes "définitions" conduisent souvent au même résultat, elles ne sont pas équivalentes, et leur usage devient en particulier plus délicat dès que l'on dépasse le cadre de la stricte auto-similarité, que ce soit pour l'étude des structures naturelles ou celle des milieux fractales complexes.

Des développements théoriques sont toujours en cours pour formaliser de mieux en mieux la géométrie fractale, dans un domaine où l'erreur de raisonnement est plus encore qu'ailleurs, un risque encouru par chacun.



CHAPITRE III

MATERIAUX DE L'ETUDE ET LEUR IDENTIFICATION

III -1 INTRODUCTION

Pour effectuer cette étude, des échantillons de sables ont été prélevés dans deux types de sable : sable d'oued et sable de mer.

Nous avons commencé par décrire le lieu de prélèvement des échantillons. Nous avons ensuite procédé aux essais de détermination des caractéristiques physiques des sables prélevés.

Une description générale et une classification des sables choisis ont été présentées, puis des essais de perméabilité et de compressibilité à l'oedomètre seront effectués.

III -2 DESCRIPTION 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
- l'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 forme des grains et la granulométrie. Pour la forme des grains constituant les sables on compare entre les figures 23 et 24 de référence et les photos réalisées pour les grains choisis. A partir de cette comparaison on peut conclure que les échantillons considérés présentent des grains bien arrondis pour le sable de mer et anguleux pour le sable d'oued.

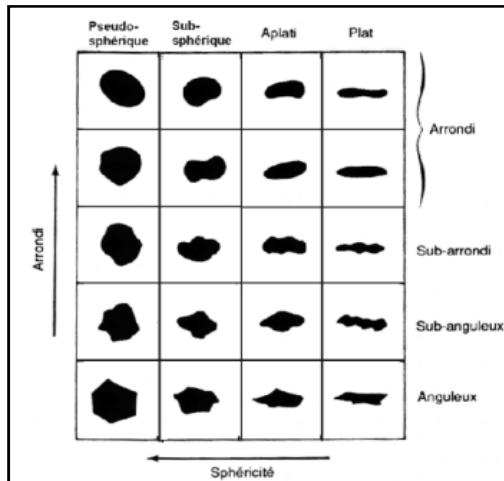


Figure 23 : Descripteurs de l'arrondi et de la sphéricité d'après (B, D et Jabiol, B. 1995, p 123)

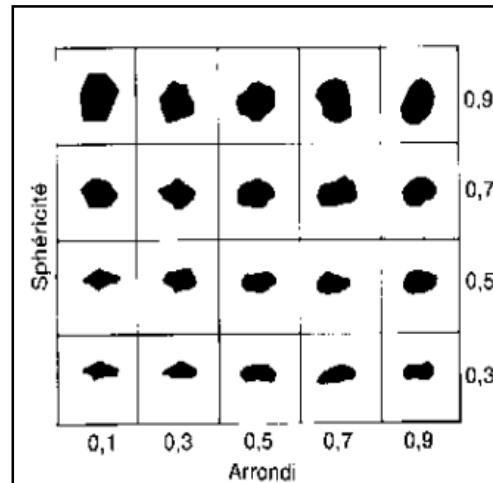
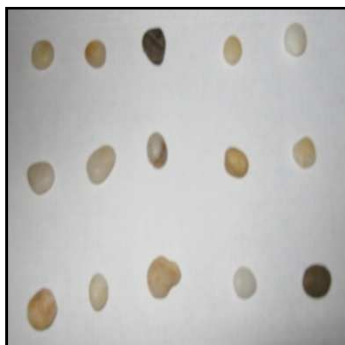
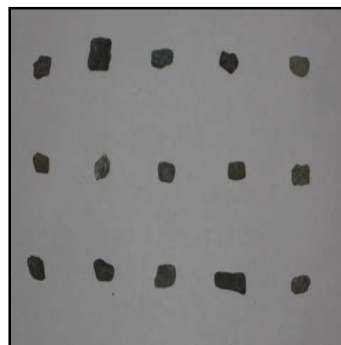


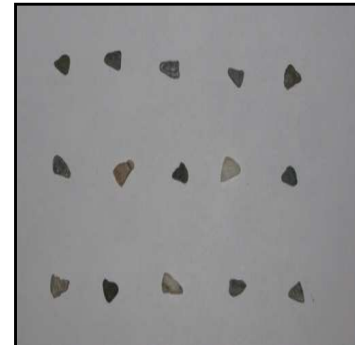
Figure 24: Indices d'arrondi et de sphéricité D'après (Delcroix, G et Havel, M.1988, p123).



Forme arrondie



Forme carrée



Forme triangulaire

PHOTOS : grains des sables étudiés classés par forme

Trois formes les plus répétées dans les sables étudiés ont été sélectionnées. En comparant les formes choisies par rapport aux formes citées ci-dessus (voir figures 23 et 24) nous remarquons qu'il y a une ressemblance sur le plan sphéricité pour ce qui concerne la forme arrondie. Cette ressemblance nous permet d'attribuer un indice de sphéricité et d'arrondissement de 0.9 pour la forme arrondie.

En ce qui concerne, la forme carrée comparée aux figures 23 et 24, nous remarquons qu'elle ressemble à la forme sub-angulaire ayant comme indice de sphéricité et d'arrondissement 0.5.

Pour la forme triangulaire comparée aux mêmes figures de référence 23 et 24, nous pouvons la classer dans la forme anguleuse et ayant un indice de sphéricité et d'arrondissement de 0.3.

III -3 ORIGINES DE PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS DE L'ETUDE

Les sables utilisés pour cette étude proviennent de deux origines différentes à savoir : sable de forme arrondie : le prélèvement est situé à la plage située à proximité de la gare routière de KHAROUBA (ALGER).

Pour le sable anguleux d'oued : le prélèvement est situé à l'oued de sidi khlifa qui se situe à quinze kilomètres au Nord Est d'Azeffoun.

III -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
- teneur en eau
- masses volumiques
- indice des vides, porosités et degré de saturation

1. Analyse granulométrique

Cette analyse est faite sur des échantillons globaux (0/8 mm) à sec à l'aide d'un vibro-tamis selon la norme NF P 94-09 (octobre 1993). Le but est de déterminer la répartition en poids des grains suivant leurs grosseurs.

Les résultats obtenus sont présentés sous forme de courbes granulométriques sur la figure 25.

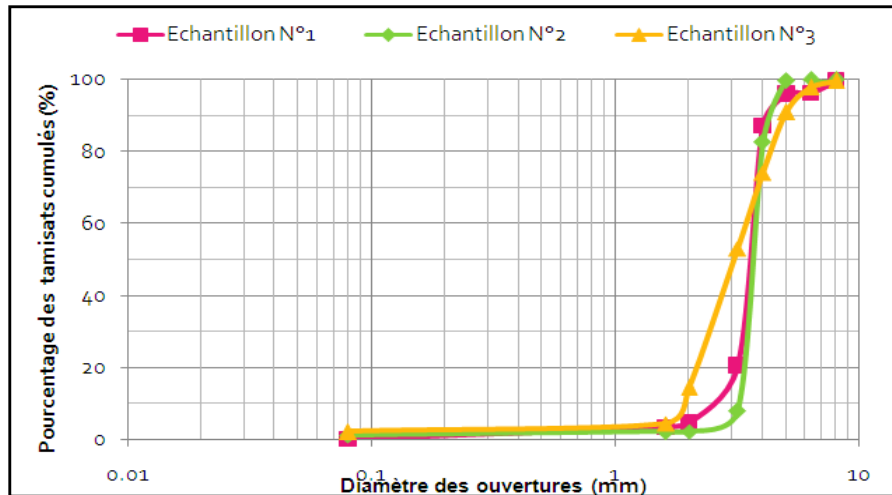


Figure 25 : courbes granulométriques des trois types de sables étudiés

Le coefficient d'uniformité, $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$: caractérise la pente de la courbe granulométrique.

Le coefficient de courbure, $C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10} \times D_{60})}$: traduit la forme la plus ou moins régulière de la courbe.

Avec :

D_{10} : Diamètre correspondant à 10% des tamisats cumulés

D_{30} : Diamètre correspondant à 30% des tamisats cumulés

D_{60} : Diamètre correspondant à 60% des tamisats cumulés

Calcul de C_u et C_c pour les trois échantillons :

Echantillon N°1 : $C_u = 1.42$, $C_c = 1.06$

Echantillon N°2 : $C_u = 1.12$, $C_c = 1.05$

Echantillon N°3 : $C_u = 1.78$, $C_c = 0.34$

Classification des trois échantillons sableux :

Pour l'échantillon N°1 : $C_u = 1.42 < 2$ et $1 < C_c = 1.06 < 3$, selon le système unifié de classification des sols granulaires, le sable est bien gradué de symbole (SW)

Pour l'échantillon N°2 : $C_u = 1.12 < 2$ et $1 < C_c = 1.05 < 3$, selon le système unifié de classification des sols granulaires, le sable est bien gradué de symbole (SW)

Pour l'échantillon N°1 : $C_u = 1.78 < 2$ et $C_c = 0.34 < 1$, selon le système unifié de classification des sols granulaires, le sable est mal gradué de symbole (SMW)

D'après les courbes d'analyse granulométrique des trois types de sable, on peut conclure que l'échantillon N°3 est plus uniforme et mal gradué que l'échantillon N°1 et N°2. L'étalement de la courbe entre le diamètre 0 /8 mm de l'échantillon N°3 permet de juger que celui-ci est moins résistant que l'échantillon N°1 et N°2.

2. Teneur en eau

La norme NF P94-050 (octobre 1991) a pour objet la détermination de la teneur en eau pondérale. La teneur en eau pondérale (W) est le quotient de la masse de l'eau interstitielle (m_w) par la masse des grains solides (m_s) .

$$W \% = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100 \%$$

Avec :

m_w : $m_2 - m_3$

m_s : $m_3 - m_1$

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 2

Tableau 2 : Détermination de la teneur en eau

Echantillon N°	1	2	3
Masse totale de sable humide : m_2 (g)	2000	2000	2000
Masse totale du sol sec : m_3 (g)	1920	1910	1907
Masse de la tare: m_1 (g)	450	450	450
Masse de l'eau m_w (g)	80	90	93
Masse du sol sec m_s (g)	1470	1460	1457
Teneur en eau : w (%)	5.44	6.16	6.38

On remarque que les échantillons de sable considérés sont caractérisés par des teneurs en eau très faibles. Cela peut s'expliquer par le fait que les sables ont un pouvoir d'absorption faible.

3. Masses volumiques

La masse volumique sèche (γ_d) et la masse volumique des grains solides sont déterminées au pycnomètre. Connaissant le (γ_d) et w on déduira la masse volumique humide d'un échantillon (γ_h).

a-Détermination de la masse volumique sèche (γ_d)

La masse volumique sèche (γ_d) d'un échantillon de sable est déterminée selon la norme NF P94-054 (octobre 1991). Elle représente le rapport de sa masse sèche (m_s) par le volume (V) qu'il occupe (y compris l'air qu'il contient) :

$$\gamma_d \text{ (g/cm}^3\text{)} = \frac{m_s}{V}$$

Le tableau suivant nous donne les valeurs des masses volumiques sèches des différents échantillons (tableau 3)

Tableau 3 : Détermination de la masse volumique sèche

Echantillon N°	1			2			3		
Essai N°	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Masse de l'échantillon m_s (g)	1036	68.99	65.69	490	242.1	148.5	63.46	98.55	80.54
Volume de l'échantillon V(cm ³)	600	40	40	300	150	90	40	60	50
Masse volumique sèche γ_{di} (g/cm ³)	1.72	1.72	1.64	1.63	1.61	1.65	1.58	1.64	1.61
Masse volumique sèche moyenne (g/cm ³)	1.69			1.63			1.61		

b-Détermination de la masse volumique humide (γ_h)

Les résultats des masses volumiques des trois échantillons sont présentés dans le tableau 4 ci dessous

Tableau 4 : Détermination de la masse volumique humide

Echantillon N°	1			2			3		
Essai N°	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Volume de l'échantillon V(cm ³)	600	40	40	300	150	90	40	60	50
Teneur en eau : w (%)	5.44			6.16			6.38		

Masse de l'échantillon sec $m_s(g)$	1036	68.99	65.69	490	242.1	148.5	63.46	98.55	80.54
Masse de l'échantillon humide : $m_h(g) = m_s \times (w + 1)$	1092.3	72.74	69.26	520.1	257	157.6	67.50	104.8	85.67
Masse volumique humide: $\gamma_{hi} (g/cm^3) = \frac{m_h}{V}$	1.82	1.81	1.73	1.73	1.71	1.75	1.68	1.74	1.71
Masse volumique humide moyenne: $\gamma_h (g/cm^3)$	1.78			1.73			1.71		

c-Détermination de la masse volumique sèche (γ_s)

La norme NF P94-054 (octobre) a pour objet la détermination, au pycnomètre à l'eau, de la masse volumique des grains solides de sable. Elle s'applique sur des échantillons de dimension inférieure à 2 mm.

La masse volumique (γ_s) des particules solides est le rapport de la masse des particules solides (m_s) par leur volume V_s :

$$\gamma_s (g/cm^3) = \frac{m_s}{V_s}$$

Ou : m_s est obtenue par pesage

V_s est mesuré au pycnomètre

Tableau 5 : Détermination de la masse volumique grains solides

Echantillon N°	1			2			3		
Essai N°	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Masse de l'échantillon $m_s(g)$	1036	68.99	65.69	490	242.1	148.5	63.46	98.55	80.54
Volume de l'échantillon $V_s(cm^3)$	400	27	26	200	100	60	24	37	30
Masse volumique des grains solides $\gamma_{si}(g/cm^3)$	2.59	2.55	2.52	2.45	2.42	2.47	2.64	2.66	2.68
Masse volumique des grains solides moyenne $\gamma_s (g/cm^3)$	2.55			2.44			2.66		

Les masses volumiques obtenues pour les différents échantillons sont regroupés dans le tableau N °6.

Tableau 6 : Détermination de la masse volumique grains solides

Echantillon N°	γ_h (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³)	γ_s (g/cm ³)
1	1.78	1.69	2.55
2	1.73	1.63	2.44
3	1.71	1.61	2.66

Nous remarquons que les masses volumiques de l'échantillon N°1 sont supérieures à celles de l'échantillon N°2 et N°3. Cela est dû à la forme des grains qui constitue le

sable et à la texture massive de l'échantillon N°1 provenant de la dégradation des roches volcaniques.

4-Indice des vides, porosité et degré de saturation

a- Indice des vides (e)

L'indice des vides permet de savoir si les vides sont importants ou non, c'est-à-dire, si les matériaux est dans un état serré ou lâche.

Il est défini comme étant le quotient du volume des vides (V_v) au volume des grains solides (V_s).

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

Il existe une relation entre l'indice des vides et les paramètres déjà déterminés (γ_d , γ_s), définie par la formule :

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

b- Porosité (n)

La porosité a une signification analogue à celle de l'indice des vides. Elle est le rapport du volume des vides (V_v) au volume total (V_t).

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (\text{la porosité est toujours inférieure 1})$$

L'indice des vides et la porosité sont liés par la formule :

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

Les différentes valeurs de porosité des échantillons utilisés sont présentées dans le tableau 7 ci dessous.

b-Degré de saturation (Sr)

Le degré de saturation indique dans quelle proportion les vides sont remplis par l'eau. Il est défini par le rapport du volume de l'eau (Ve) au volume des vides (Vv) et s'exprime en pourcentage comme suit:

$$Sr = \left(\frac{V_e}{V_v} \right) . 100 \quad (\text{lorsque le sol est saturé, } Sr = 100 \%)$$

La dépendance du degré de saturation des paramètres connus (γ_w , γ_s , W et e) est illustrée par la formule :

$$Sr = (\gamma_s / \gamma_w) . (W/e)$$

Les différents degrés de saturation des échantillons utilisés sont présentés dans le tableau 7 ci dessous.

Tableau 7 : Indices des vides, porosités et degré de saturation des échantillons étudiés

Echantillon N°	1	2	3
$\gamma_d \text{ (g/cm}^3 \text{)}$	1.69	1.63	1.61
$\gamma_s \text{ (g/cm}^3 \text{)}$	2.55	2.44	2.66
$e = \gamma_s / \gamma_d - 1$	0.5	0.49	0.58
W (%)	5.44	6.16	6.38
$Sr = (\gamma_s / \gamma_w) . (w/e)$	27.74	30.67	29.26
$n = e / (e + 1)$	0.33	0.32	0.36

Sachant que $\gamma_w = 1 \text{ (g/cm}^3 \text{)}$

Les résultats de degré de saturation, porosité et indices des vides indiquent que :

L'échantillon N°2 est le plus compacte des trois et cela est dû à la forme carrée des grains constituant ce sable qui permet d'avoir un matériau plus compact.

L'échantillon N°3 est le moins compact des trois, cela permet de dire que le sable à grains de forme triangulaire présente un réarrangement avec plus de vide.

5-Récapitulation des différentes caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques des utilisés sont résumées dans le tableau N°8

Tableau 8 : Indices des vides, porosités et degré de saturation des échantillons étudiés

Echantillon N°	W (%)	$\gamma_d(g/cm^3)$	$\gamma_s(g/cm^3)$	$\gamma_h(g/cm^3)$	e (%)	Sr (%)	n (%)
1	5.44	1.69	2.55	1.78	0.5	27.74	0.33
2	6.16	1.63	2.44	1.73	0.49	30.67	0.32
3	6.38	1.61	2.66	1.71	0.58	29.26	0.36

III -5 ETUDE STATISTIQUE

Dans cette étude, un calcul statistique est effectué pour évaluer la dispersion des valeurs de la dimension fractale des grains. Pour cela, nous avons prélevé quinze grains sur chacun des échantillons (1, 2 et 3). La forme des grains est identifiée par la valeur de la dimension fractale.

1- Objectif des statistiques descriptives

La statistique descriptive est une méthode de description d'un ensemble homogène appelé population comportant un grand nombre d'éléments afin de mettre en lumière certains de ses aspects.

Son principe consiste à observer sur les individus composant cette population une ou plusieurs caractéristiques constituant ainsi l'ensemble des données ou observations.

La statistique descriptive s'intéresse à l'analyse de ces dernières en tant que phénomène collectif ou l'individu est le support de l'information statistique qui se rapporte à l'ensemble tout entier. En ce sens, il ne nous intéresse pas individuellement mais comme élément du groupe auquel il appartient.

➤ La statistique permet de rendre lisible un flux important de données.

- La statistique permet de résumer un ensemble de données.
- La statistique permet de tirer des conclusions sur des actions à entreprendre.
- La statistique permet de tirer des conclusions sur le lien existant entre plusieurs variables.

2- But de l'étude statistique

Pour le calcul de la dimension fractale des grains, on a utilisé une formule empirique d'où la dispersion des résultats. Dans le même sens, on sait bien qu'un milieu granulaire présente plusieurs formes des grains d'où la nécessité d'une étude statistique sur ces derniers.

3- Définition des paramètres utilisés dans cette étude

a- La moyenne arithmétique

Soit un échantillon de n valeurs observées $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ d'un caractère quantitatif X , on définit sa moyenne observée $\bar{x}$ comme la moyenne arithmétique des n valeurs :

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

b- Le mode

Le mode, M_0 d'une série statistique est la valeur du caractère la plus fréquente ou dominante dans l'échantillon. Le mode correspond à la classe de fréquence maximale dans la distribution des fréquences.

On peut identifier le mode comme la valeur médiane de la classe de fréquence maximale ou bien effectuer une interpolation linéaire pour obtenir la valeur exacte du mode comme suit :

$$M_0 = x_m + \frac{i\Delta i}{\Delta i + \Delta s}$$

Avec :

X_m : limite inférieure de la classe d'effectif maximal.

I : intervalle de classe ($X_{m+1} - X_m$).

Δ_i : Ecart d'effectif entre la classe modale et la classe inférieure la plus proche.

Δ_s : Ecart d'effectif entre la classe modale et la classe supérieure la plus proche.

c- La variance observée

Soit un échantillon de n valeurs observées $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ d'un caractère quantitatif X et soit $\bar{x}$ sa moyenne observée. On définit la variance observée notée s^2 comme la moyenne arithmétique des carrés des écarts à la moyenne.

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

L'écart-type observé correspond à la racine carrée de la variance observée :

$$S = \sqrt{s^2}$$

d- Le coefficient de variation

La variance et l'écart-type observée sont des paramètres de dispersion absolue qui mesurent la variation absolue des données indépendamment de l'ordre de grandeur des données.

Le coefficient de variation noté C.V. est un indice de dispersion relatif prenant en compte ce biais et est égal à :

$$C.V = \frac{100S}{\bar{x}}$$

Exprimé en pourcentage, il est indépendant du choix des unités de mesure permettant la comparaison des distributions de fréquence d'unité différente.

4-Préparation des échantillons

Dans chaque échantillon préparé, quinze grains ont été choisis pour évaluer leur dimension fractale et ceci pour chacune des trois formes considérées, voir figure (26, 27, 28,29,30,31).

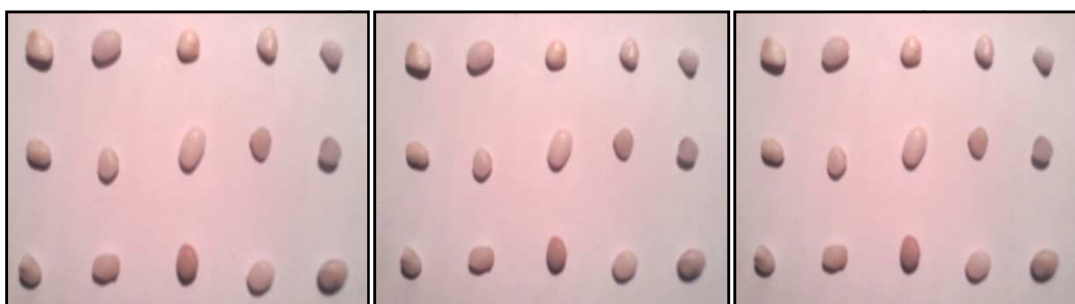


échantillon 1

échantillon 2

échantillon 3

Figure 26 : Forme arrondie (0/8)

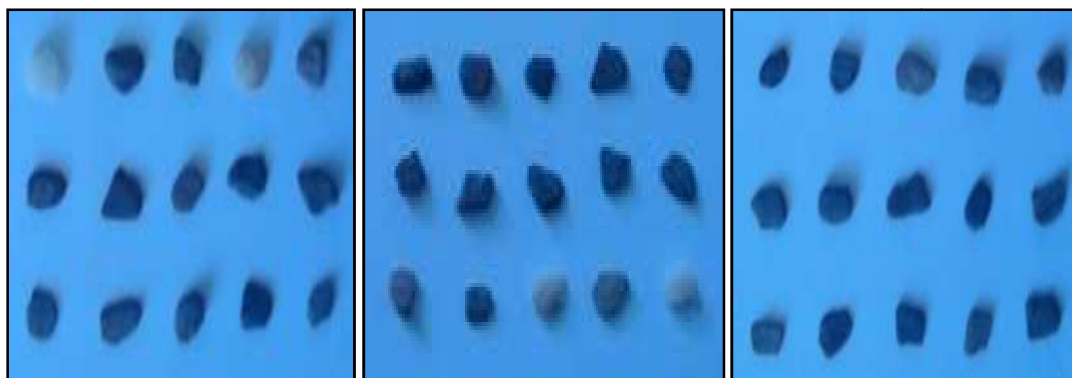


échantillon 1

échantillon 2

échantillon 3

Figure 27 : Forme arrondie (3/5)

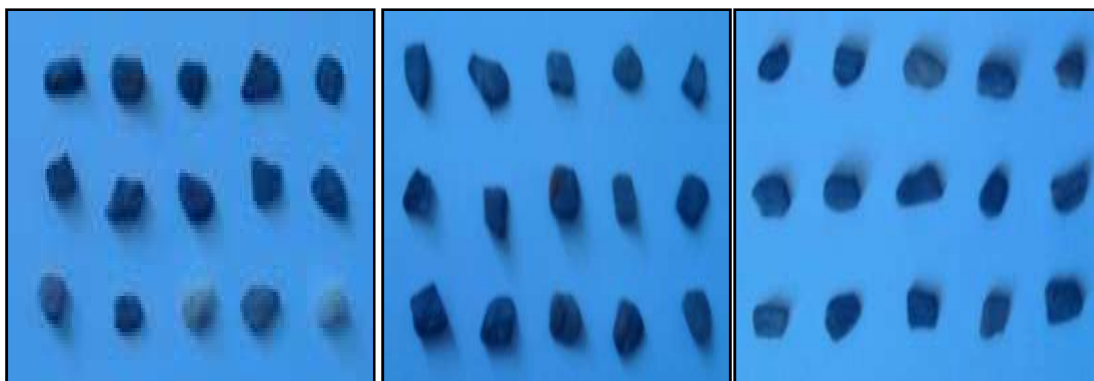


échantillon 1

échantillon 2

échantillon 3

Figure 28 : Forme carrée (0/8)

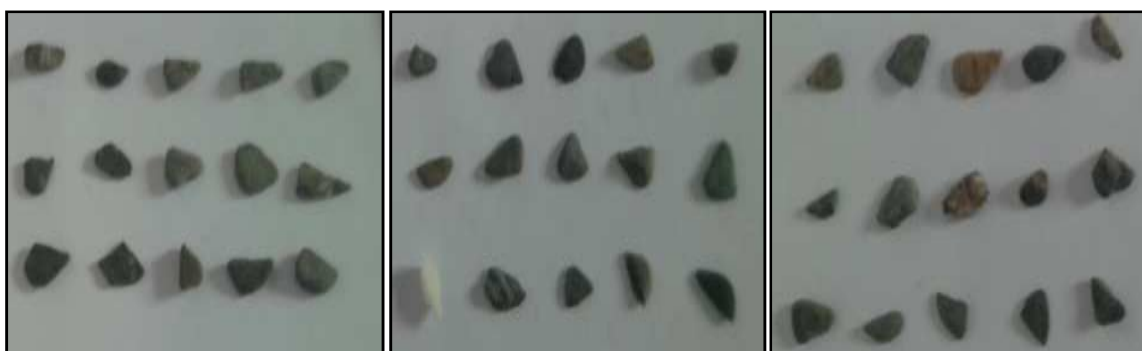


échantillon 1

échantillon 2

échantillon 3

Figure 29 : Forme carrée (3/5)



échantillon 1

échantillon 2

échantillon 3

Figure 30 : Forme triangulaire (0/8)



échantillon 1

échantillon 2

échantillon 3

Figure 31 : Forme triangulaire (3/5)

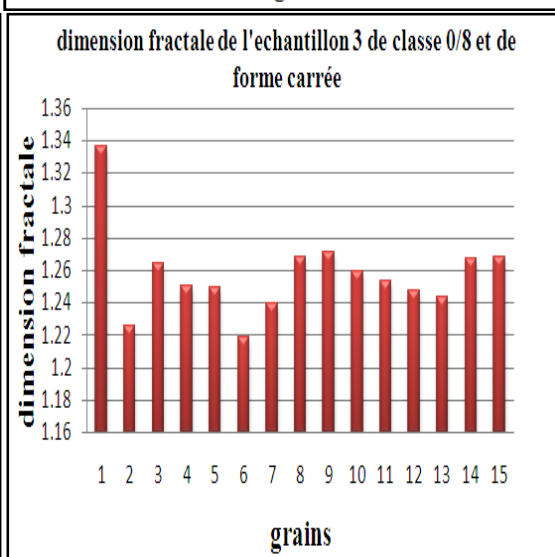
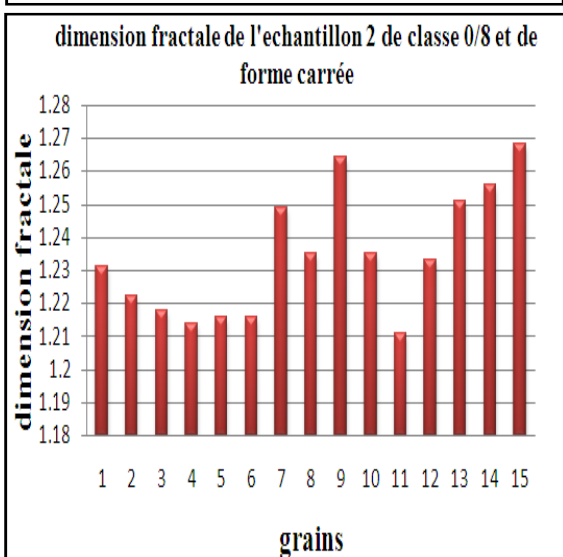
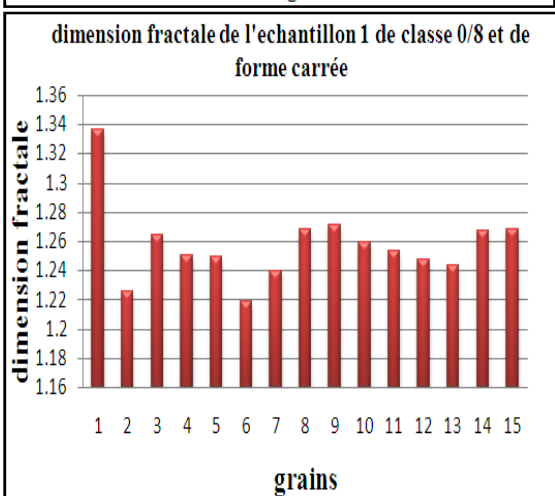
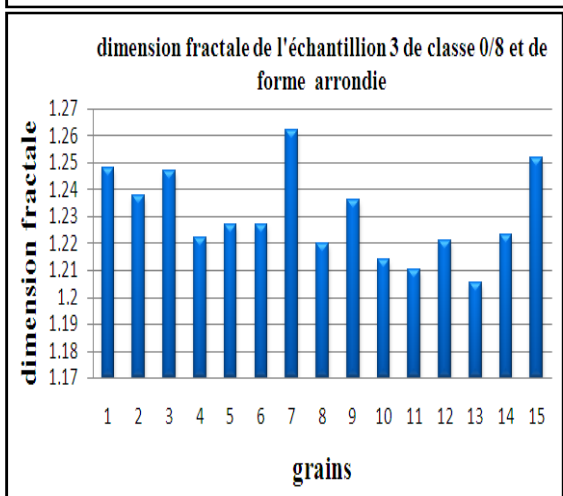
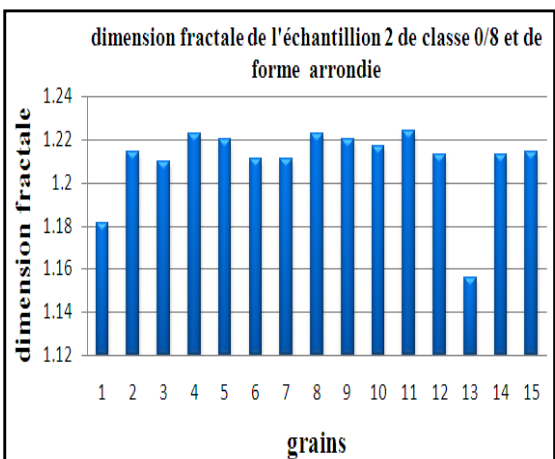
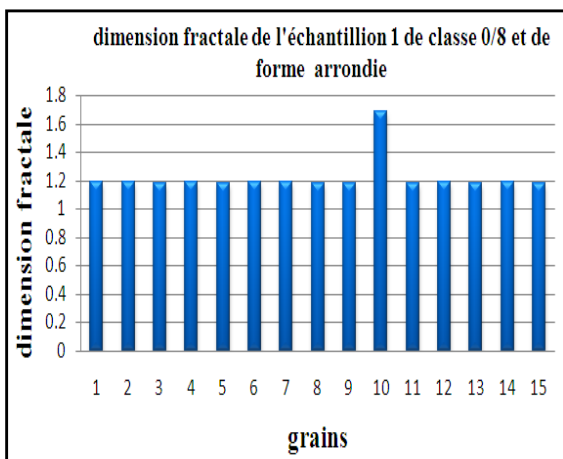
Pour calculer la dimension fractale des grains, on utilise la formule suivante :

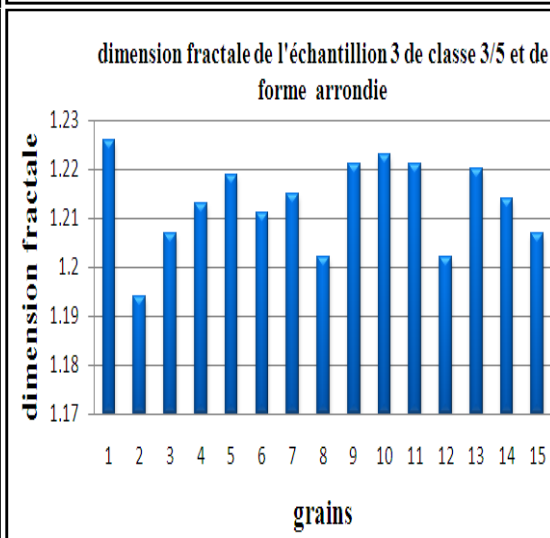
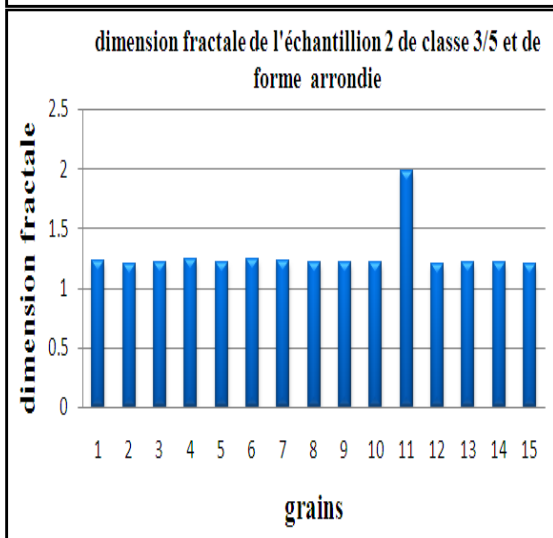
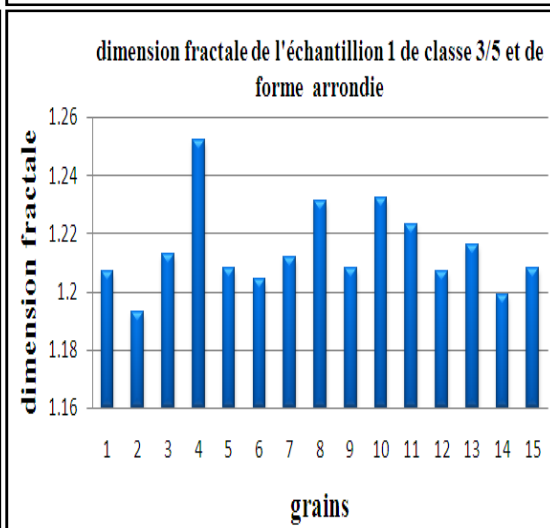
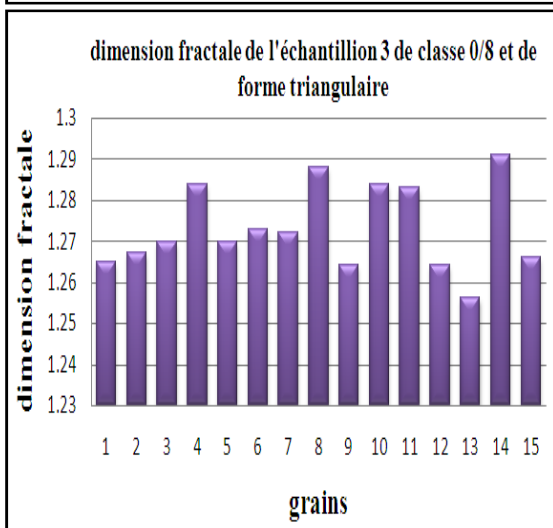
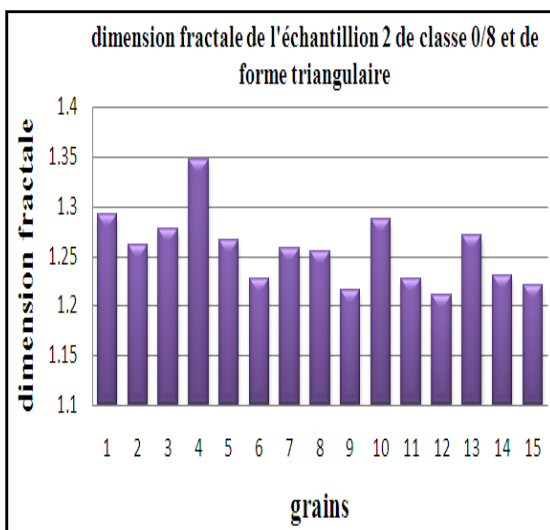
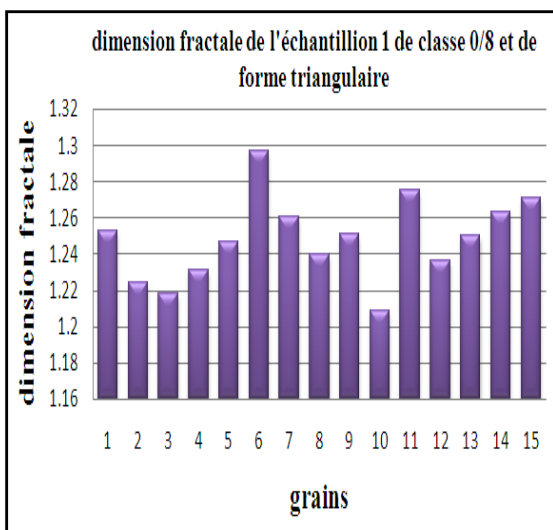
$$C = \frac{P^{1/D_R}}{A^{0,5}}$$

Avec $c = 1.77$ on obtient $D_r = \frac{\log P}{0.5 \log A + \log C}$

Les résultats obtenus sont donnés dans les tableaux suivants :

Les résultats de la dimension obtenus pour les différentes formes sont représentés dans les histogrammes ci-dessous.





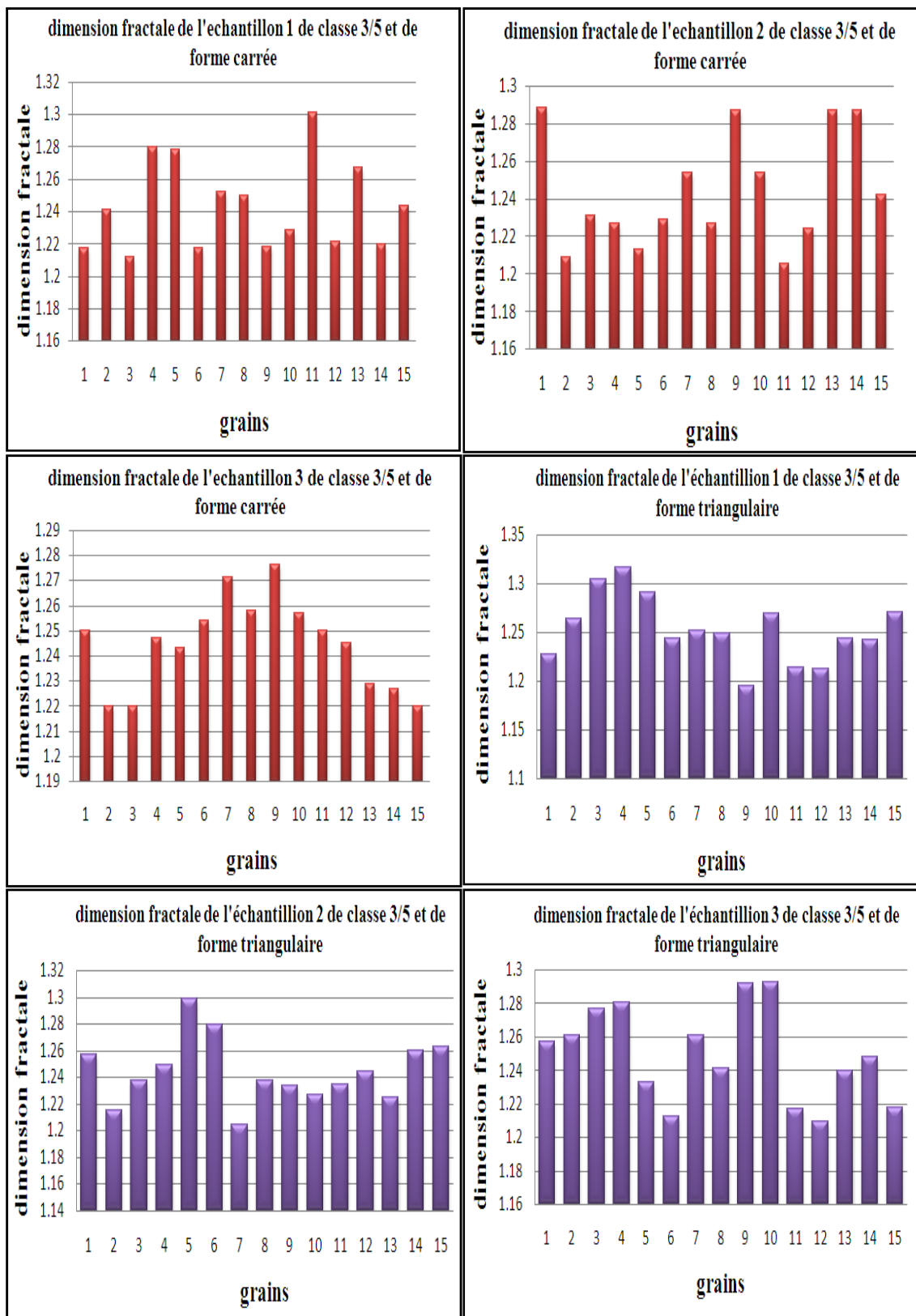


Figure 32 : représentation graphique de la dimension fractale obtenue pour les différents échantillons

III -6 CONCLUSION

Les matériaux sont caractérisés par des teneurs en eau très faibles.

Les sables choisis pour cette étude sont caractérisés par la forme arrondie pour le sable de mer et par la forme anguleuse pour le sable d'oued.

L'analyse granulométrique des trois échantillons (N°1, N°2, N°3) montre que les matériaux utilisés sont de granulométrie serrée et bien graduée pour l'échantillon (N°1, N°2) et de granulométrie serrée mais graduée pour l'échantillon (N°3).

L'échantillon N°1 est le plus dense des trois échantillons (N°1, N°2, N°3) par contre l'échantillon N°3 est le moins dense des trois.

L'échantillon N°2 est le plus compacte des trois échantillons (N°1, N°2, N°3) par contre l'échantillon N°3 est le moins compacte des trois.

L'étude statistique a permis de calculer la dimension fractale moyenne des différents échantillons de sable.

.

CHAPITRE IV

LES ESSAIS DE PERMEABILITE AU PERMEAMETRE

IV-1 INTRODUCTION

Les essais de perméabilité sont effectués sur les différentes formes de grains, sable de forme carrée, arrondie et triangulaire aux états sec et compacte. Ils ont été réalisés au laboratoire de recherche L.E.G.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 sables et de leur forme. Essentiellement pour les classes 0/8 et 3/5, le perméamètre utilisé a un moule de dimension suivante : hauteur de 13 cm et de diamètre de 10 cm.

L'essai de perméabilité au perméamètre à charge constante permet de mesurer le débit d'eau qui s'infiltre à travers un échantillon de sable pendant une durée de temps (Δt).

Il a pour but de déterminer le coefficient de perméabilité k et le gradient hydraulique i des matériaux sableux tout en faisant varier la forme et la granulométrie des grains.

La perméabilité de ces matériaux est considérée dépendante du comportement individuel des grains qui constituent les sables (fragile, cassant, ductile).

IV- 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.

IV- 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 de coefficient de perméabilité.

- la mise en place de l'échantillon de sable dans le moule de permeamètre

On effectue l'essai de perméabilité à charge constante sur des échantillons de sable représentatif (de forme arrondie, carrée, triangulaire), séché à l'air libre. Afin que soient limités les effets de la migration des particules fines, les échantillons ne doivent pas contenir plus de 10% des particules inférieures à 80 μm . Les particules supérieures à 20 mm sont éliminées au départ (classe 0/8, 3/5) pour éviter la formation des vides importants le long de la paroi du perméamètre.

On dépose un papier filtre à la base de moule de perméamètre, afin de limiter l'érosion potentielle causée par le passage de l'eau.

On place notre échantillon de sable dans le moule de perméamètre à charge constante sous forme de couches de 2 cm d'épaisseur avec un léger compactage manuel.

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

On met le tout dans un autre moule de volume supérieur au premier.

- 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, a 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 et la valve de purge pour chasser l'air du tuyau d'entrée d'eau. Dès que l'eau commence à jaillir hors de la valve de purge, on referme celle-ci.

- La détermination de coefficient de perméabilité

Lorsque l'échantillon de sable est saturé, on dégage avec précaution la pince qui bloque la sortie d'eau, puis on règle la valve d'alimentation afin d'obtenir un écoulement stable à travers l'échantillon de sable. 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 d'au moins 250 ml placé directement sous la sortie d'eau.

IV- 4 APPAREILLAGE

Tableau équipé d'un ensemble coulissant monté sur glissière, comprenant un réservoir d'eau avec trop-plein et alidade (règle graduée) de repérage pour la charge constante, d'un tube en verre de section calibrée pouvant être alimenté jusqu'à la hauteur désirée à l'aide du réservoir.

- Lecture des variations du niveau d'eau à l'aide d'un régllet de 1,5 m équipé d'un curseur.
- Circuits correspondants aux 2 types d'essais isolés grâce à 2 robinets à 3 voies.



Figure 33 : Perméamètre de laboratoire

IV- 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.

IV-6 MATERIEL UTILISE

- Perméamètre a tube de verre fermé en bas avec un robinet, il a des tubes piézométriques à différents niveaux.
- Chronomètre pour déterminer le temps d'écoulement.
- l'échantillon de sable.
- deux éponges ou pierre poreuse pour filtrer l'eau.
- un moule pour mesurer le volume d'eau.

IV-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 quelques minutes, arrêter le chronomètre et mesurer le volume de l'eau ayant traversé l'échantillon et lire (h_1 , h_2 , h_3).

IV-8 PRESENTATION DES RESULTATS

Les essais de perméabilité sont effectués sur deux granulométries (0/8, 3/5), les matériaux sont mis en place en 4 couches avec un léger compactage manuel à l'aide d'un outil à base circulaire après déversement de chaque couche permettant un meilleur réarrangement des grains. Trois formes de sable ont été utilisées (arrondie, carrée et triangulaire). Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

	classe		h_1 (cm)	h_2 (cm)	Δh (cm)	Volume (cm ³)	Temps (s)	Q (cm ³ /s)	i	T (°C)	K (cm/s)
Forme arrondie	0/8	Ech1	157.5	155	2.5	0.3105	2.30	0.135	0.19	25	0.0750
		Ech2	123	120	3	3.9377	2.33	1.69	0.23	25	0.0140
		Ech3	128	123	5	0.9549	2.29	0.417	0.38	25	0.0091
Forme Carré	0/8	Ech1	125.5	117	8.5	1.5215	2.37	0.642	0.65	25	0.0680
		Ech2	126.5	119	7.5	1.3479	2.32	0.581	0.57	25	0.0130
		Ech3	126.5	122.5	4.5	0.6894	2.38	1.814	0.34	25	0.0530
Forme triangulaire	0/8	Ech1	126	123	3	0.4712	2.38	0.198	0.23	25	0.0110
		Ech2	125.5	121	4.5	0.4707	2.21	0.213	0.34	25	0.0080
		Ech3	126	118	8	1.4865	2.39	0.622	0.61	25	0.0130
Forme arrondie	3/5	Ech1	126	120	6	2.9552	3.41	1.226	0.46	25	0.0870
		Ech2	122	118	4	3.3313	2.30	1.448	0.30	25	0.0273
		Ech3	126	122	4	3.2776	2.25	1.456	0.30	25	0.0257
Forme Carré	3/5	Ech1	127	124	3	3.2507	3.37	0.964	0.23	25	0.0990
		Ech2	128	123	5	3.3045	4.30	0.768	0.38	25	0.0314
		Ech3	132	129	3	3.1701	2.45	1.293	0.23	25	0.0339
Forme triangulaire	3/5	Ech1	138	132	5	3.0089	2.55	0.179	0.38	25	0.0826
		Ech2	136	131	4	2.9015	2.32	1.250	0.30	25	0.0230
		Ech3	126	121	4	3.4388	2.33	1.475	0.30	25	0.0210

Tableau 12 : Résultats des essais de perméabilité pour les trois formes

IV-9 COURBE DE PERMEABILITE EN FONCTION DE LA DIMENSION FRACTALE

Les résultats de la variation du coefficient de perméabilité en fonction de la dimension fractale pour les différentes formes et les différentes classes sont représentés dans les courbes ci dessous

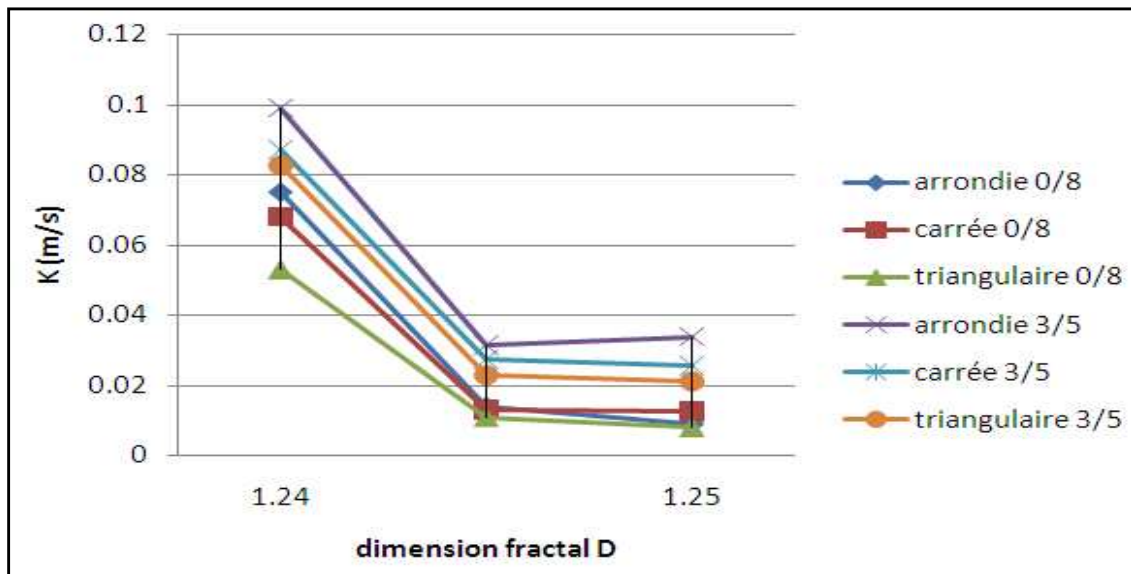


Figure 34 : Courbe de perméabilité en fonction de la dimension fractale

IV-10 INTERPRETATION DES RESULTATS

Les principales observations et conclusions tirées des courbes de perméabilité en fonction de la dimension fractale sont :

La perméabilité décroît avec l'augmentation de la taille des grains la (classe granulaire). En effet, pour la classe 3/5 les pores constitués entre les grains sont très importants (classe serrée) ; alors que pour la classe granulaire étalée (0/8), le pourcentage de fines est important et celles-ci occupent les vides de cette classe.

La perméabilité diminue en fonction de l'augmentation de la dimension fractale pour les deux classes granulaires (0/8, 3/5) et pour les différentes formes de sables (arrondie, carrée, triangulaire). Ce qui montre que la dimension fractale caractérise la rugosité et l'état de surface des grains. La forme arrondie pour les deux classes (0/8, 3/5) est caractérisée par un coefficient de perméabilité élevé, par rapport aux autres formes (carrée, triangulaire). Cela est évident puisque la forme arrondie a moins de rugosité et d'irrégularité ce qui engendre une valeur de la dimension fractale plus faible et l'écoulement des eaux est plus rapide qui se traduit par un coefficient de perméabilité élevé. Donc, la perméabilité dépend fortement de la forme des grains constituant les sables choisis ainsi que de leur état de surface.

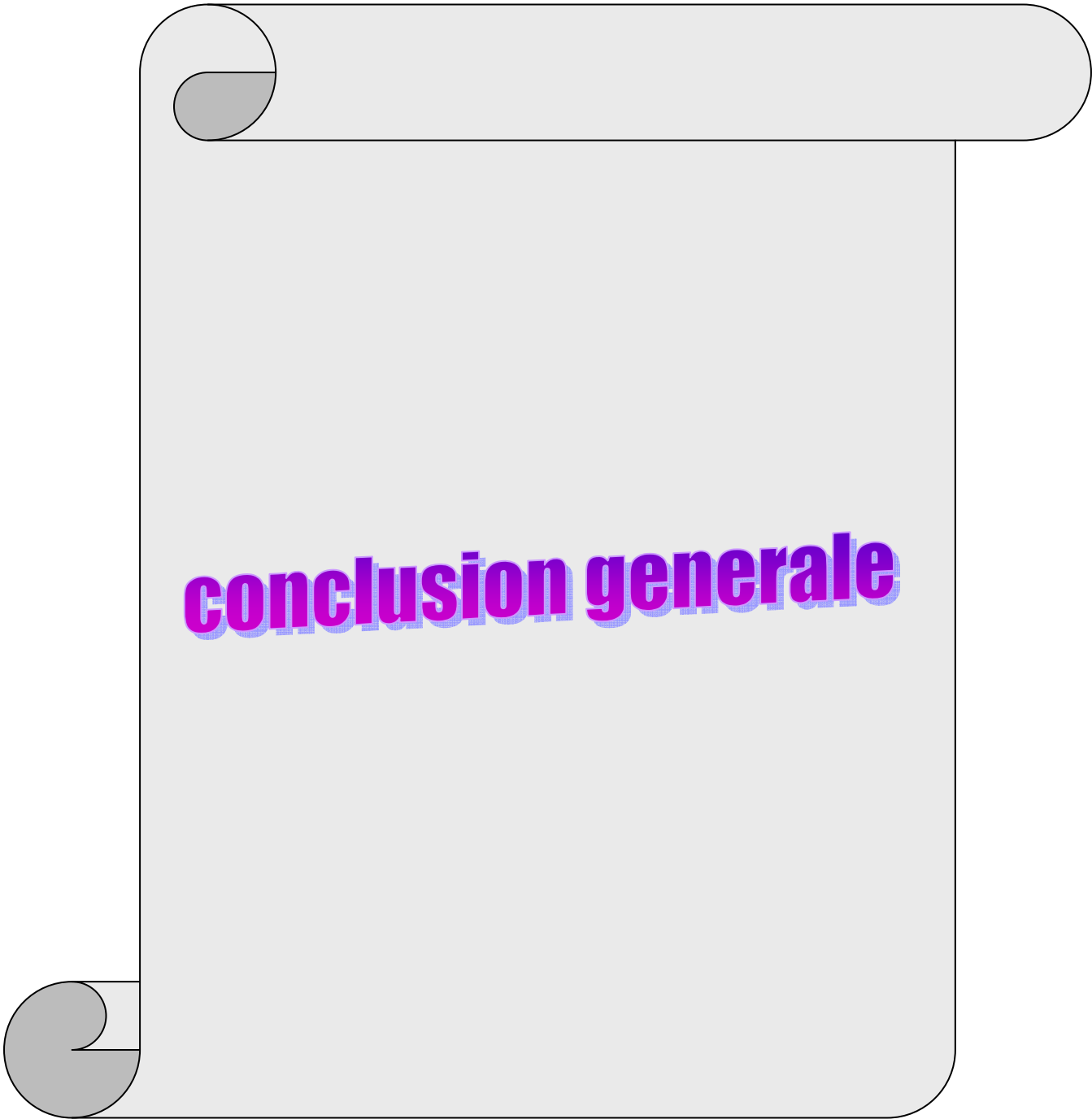
La forme triangulaire pour les deux classes (0/8, 3/5) est moins perméable des trois formes. Cela peut s'expliquer par la rugosité et l'angularité importantes qui caractérisent cette forme. L'enchevêtrement des grains, dans ce cas, réduit les vides existants dans la matrice sableuse.

IV-11 CONCLUSION

La perméabilité des sables dépend essentiellement de la forme des grains qui le constitue. La forme arrondie est la plus perméable par rapport aux deux autres formes (carrée, triangulaire), et cela quelque soit la taille des grains constituant les sables.

La forme triangulaire est la moins perméable des trois et cela quelque soit la classe granulaire.

Cette étude a montré que la perméabilité diminue avec l'augmentation de la dimension fractale des grains de sable choisis.



conclusion generale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de la dimension fractale sur la perméabilité des sables de forme arrondie, carrée et triangulaire. L'étude a permis de conclure les points suivants:

La perméabilité décroît, lorsque la taille des grains (classe granulaire) décroît, cela peut s'expliquer par la présence des vides importants entre les grains pour la classe granulaire serrée (3/5) et le peu de vides existant par la classe granulaire étalée (0/8) dont la majorité des vides sont occupées par les fines..

La courbe de perméabilité en fonction de la dimension fractale a la même allure pour les différentes formes (arrondie, carrée, triangulaire) et pour les deux classes granulaires (0/8, 3/5). La forme arrondie pour les deux classes (0/8, 3/5) est caractérisée par un coefficient de perméabilité élevé par rapport aux autres formes (carrée, triangulaire). Cela est évident puisque la forme arrondie a moins de rugosité et d'irrégularité ce qui engendre une valeur de la dimension fractale plus faible et l'écoulement des eaux plus rapide qui se traduit par un coefficient de perméabilité élevé. La forme triangulaire pour les deux classes (0/8, 3/5) est moins perméable des trois formes. Cela peut s'expliquer par la rugosité et l'angularité importante qui caractérisent cette forme. En effet, l'enchevêtrement des grains réduit les vides existant dans la matrice sableuse.

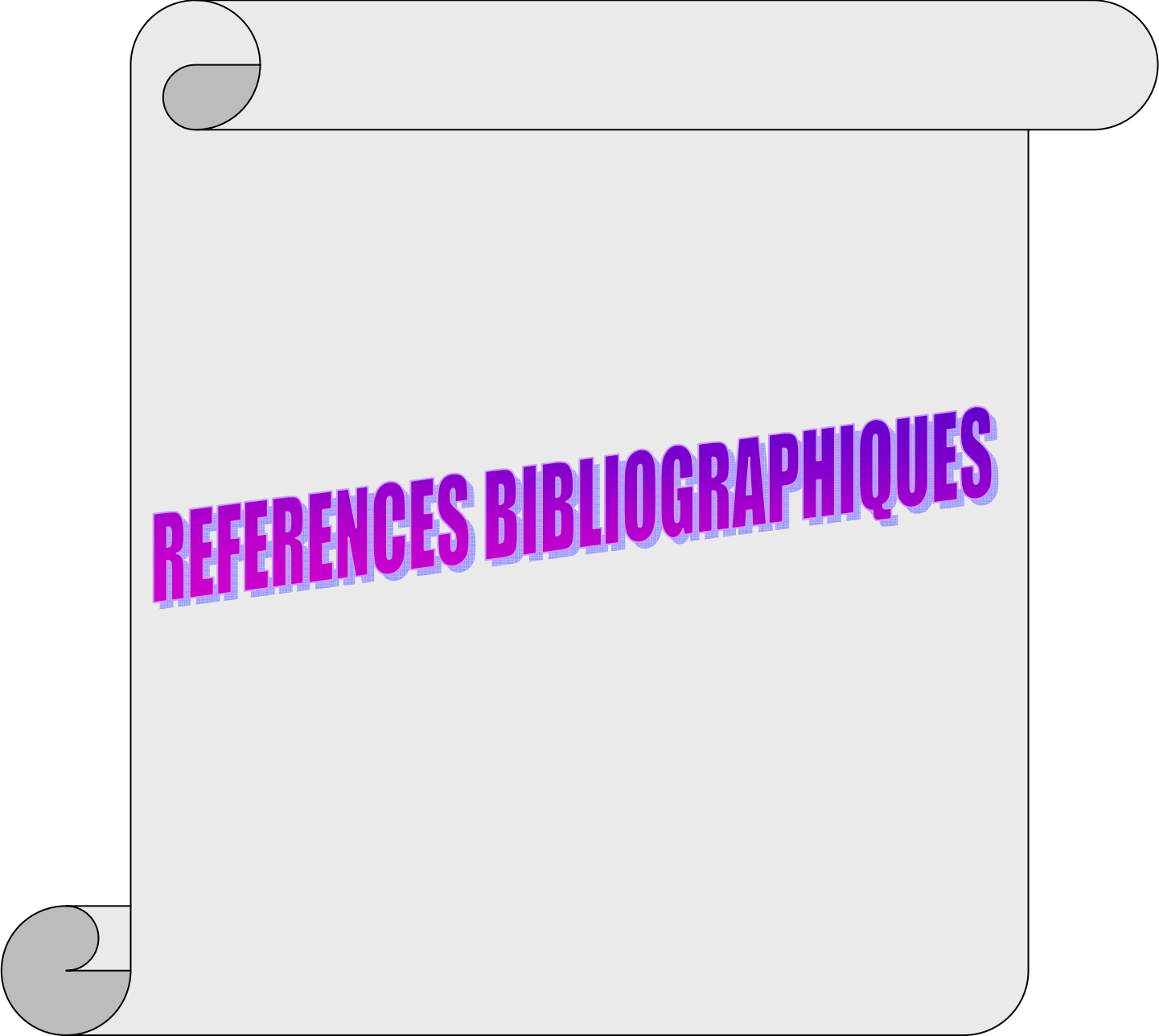
La perméabilité diminue en fonction de l'augmentation de la dimension fractale dans les deux types d'essais (oedométrique et perméamètre), cela signifie que la dimension fractale caractérise la rugosité, les angularités et l'état de surface des grains constituant les sables.

Les courbes obtenues pour les deux types d'essais ont les mêmes allures. La seule différence réside dans les coefficients de perméabilité obtenus pour les essais de compressibilité dont les coefficients (k) sont faibles par rapport à ceux obtenus au perméamètre. En effet, quelque soit la taille des grains (classes granulaires 3/5, 0/8), l'apparition des fines causée par l'écrasement des grains engendrée par l'augmentation

des contraintes de chargement, va remplir les vides entre les gros grains et renforcer la matrice sableuse et entraînera la diminution du coefficient de perméabilité.

Le coefficient de perméabilité décroît avec l'augmentation de la dimension fractale. En effet, (K) baisse avec l'angularité et l'irrégularité de la forme, ce qui explique l'augmentation de la dimension fractale. Cette baisse de coefficient (K) est très remarquable pour des valeurs importantes de la dimension fractale qui atteignent des valeurs de l'ordre de 2 et dans ce cas, la courbe tend à se coïncider avec l'axe des abscisses.

Une formule du coefficient de perméabilité, tenant compte des paramètres caractérisant la dimension fractale, a été proposée. Pour la valider, une comparaison entre les résultats trouvés par la formule proposée et les résultats expérimentaux a été menée et les écarts sont ainsi calculés. Les pourcentages d'erreur sont, dans la majorité, inférieurs à 30%, ce qui permet de valider cette formulation.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BIBLIOGRAPHIE

[AGNOLIN. J, ROUX. J.N, MAASSAD. P, JIA. X et MILLS. P] Sound wave velocities in dry and lubricated granular packing: numerical simulations and experiments, Powders and Grains, edited by R, 2005.

[AIT SAADI. L] Considération générale sur les sols fins, géotechnique, p45-49, 2005.

[ALONSON. E] A constitutive model for partiality saturated soils, Géotechnique, n°40, vol 3, p 405 -430, 1990.

[CHOUICHA. K] Identification de la compacité par la dimension fractale, Proceeding du Séminaire National de Génie Civil, Editions Dar El Gharb, ENSET Oran, p. 28–29, Algérie 2006.

[CLAUDIN. P] Physique des tas de sable. Les Ulis : EDP Science 1999.

[CRUZ. F] Ecoulements de grains secs: frottement et blocage, Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2004.

[FENG. C.L, YU. A.B] Effect of liquid addition on the packing of mono-sized coarse spheres. Powder Technology, 99, 22-28, 1998.

[GUERIN. V] Prédiction et compréhension de la densification des poudres commerciales d'alumine et de fer grâce à une approche par réseaux de neurones artificiels. Ph.D. Thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2004.

[MANDELBROT. B] The Fractal Geometry of Nature W.H.Freeman and Company, New York 1983.

[MANDELBROT. B] Les objets fractals : forme, hasard et dimension, Paris (France), Edition Flammarion, 1975.

[MANDELBROT. B] Self Affine fractal sets. Fractal in Physics. Pietronero & fractal dimension. Science, 1986.

[MENG. B], Determination and interpretation of fractal properties of the sandstone pore system. Materials and Structures, 195–205, May 1996.

[MUSKAT. M] The flow of heterogeneous fluids through porous media. Physics, 346-363, 1936.

[POULIOT. N] Prédiction de la compacité des bétons compactés au rouleau à l'aide d'un modèle d'empilement granulaire. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, p23-36, 2001.

[ROSTAND. J] Les essais in situ en mécanique des sols, Eyrolles, 1978.

[TURCOTTE. DL], Fractals and chaos in geology and geo-physics Second Edition. Cambridge University Press 1997.

[XIE H & PARISEAU W.G] Fractal estimation of joint roughness coefficients. In Fractured and jointed Rock Masses, Myer, L.R, Cook, N.G.W, Goodman R.E. and Tsang C.F, eds, Balkema, Rotterdam, p125-131, 1995.

[YANG. R.Y] Computer simulation of the packing of fine particles, Physical Review E, p41-53 2000.

[YU. A.B, FENG. C.L, ZOU. R.P, YANG. R.Y] the relation ship between porosity and interparticles forces. Powder Technology, p130, 70-76, 2003.

