

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI OUZOU

FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

**LABORATOIRE DE RECHERCHE G OMATERIAUX, ENVIRONNEMENT ET AM NAGEMENT
(L.G.E.A)**

MEMOIRE DE MASTER GENIE CIVIL

OPTION : GEOTECHNIQUE ET ENVIRONNEMENT

PRESENTE PAR :

NAILI Hayat

SUJET :

**INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES DES ESSAIS ROUTIERS SUR LA
DIMENSION FRACTALE DES GRAINS**

DEVANT LE JURY COMPOSE DE :

HAMZA. Ali	Professeur	UMMTO	Président
MELBOUCI. Bachir	Professeur	UMMTO	Rapporteur
BOUDLALE. Omar	Maitre de conférences A	UMMTO	Examineur
BOUBRIT.H	Maitre de conférences A	UMMTO	Examineur

PROMOTION 2012/2013

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-1 Introduction.....	3
I-2 Définition.....	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 boites.....	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	36
- Détermination de la masse volumique humide	36
- Détermination de la masse volumique sèche	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 boites ("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/Di , (bi) Mélanges di /D	29
Figure (22) : Porosité en fonction de DF.log (d/D) (ai) Mélangesd/Di; (bi) Mélanges di/D	29
Figure (23) : Descripteurs de l'arrondi et de la sphéricité d'après (Baize, D et Jabiol, Bp123).....	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 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 (e) en fonction de h	65
Tableau(14) : Tableau d'essais pour les courbes de compressibilité.....	65
Tableau(15) : Variation de l'indice des vides (e) en fonction de h	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.

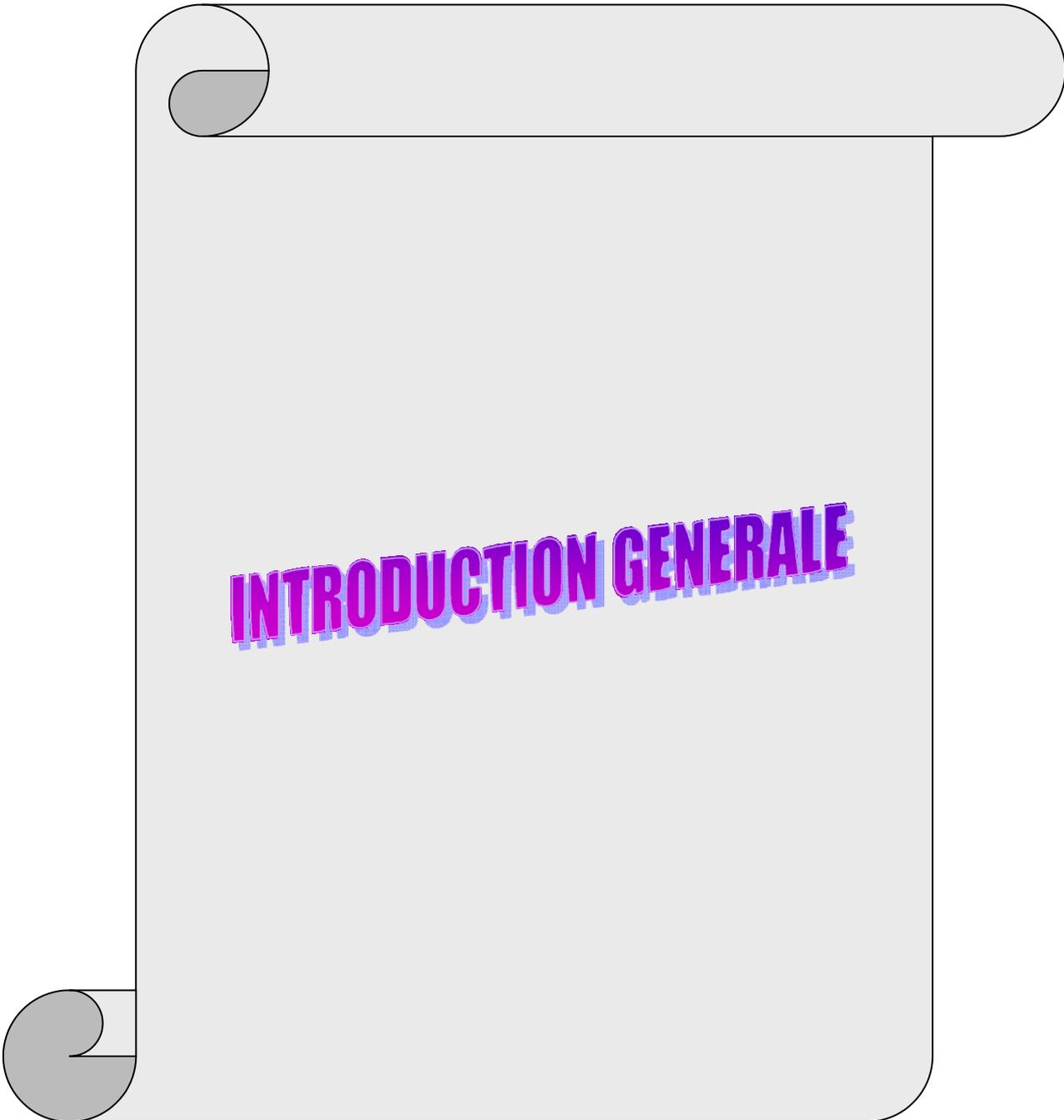
Three different shapes from sand (rounded, square, triangular) are characterised by their dimension fractal. The samples are then, submitted to tests of permeability by the permeamètre to constant load and by tests of compressibility have the oedometre.

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 perméamètre 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 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 :

$$Q = k \frac{\Delta H}{L} A = k i A \dots \dots \dots (1)$$

Ou :

Q : débit d'écoulement mesuré à la sortie (/)

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

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

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

L : longueur de l'échantillon

I : gradient hydraulique

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

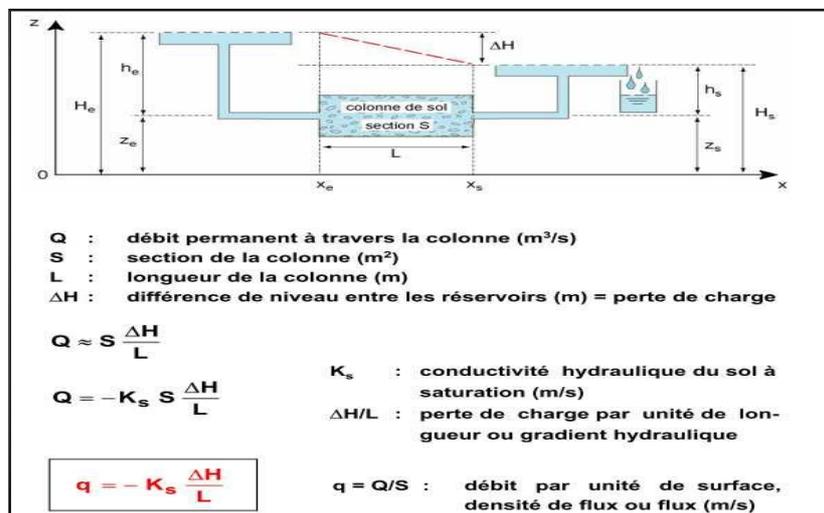


Figure1 : Principe du perméamètre

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).

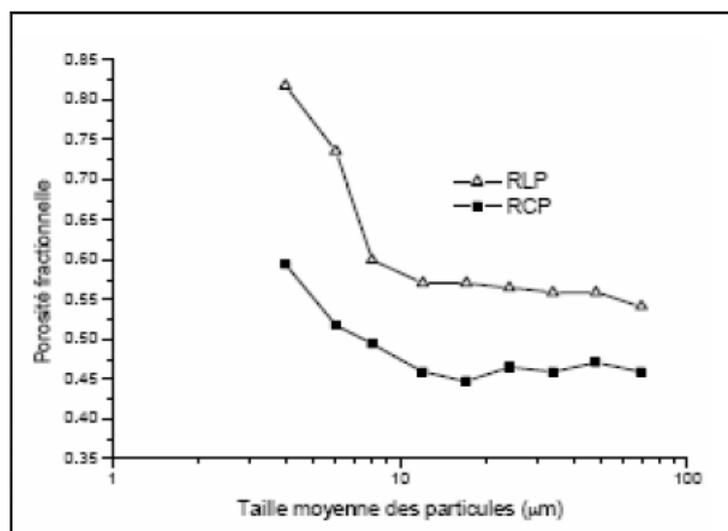


Figure 2 : Influence de la taille des particules du mélange sur les valeurs de la porosité d'après GUERIN (2004)

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.

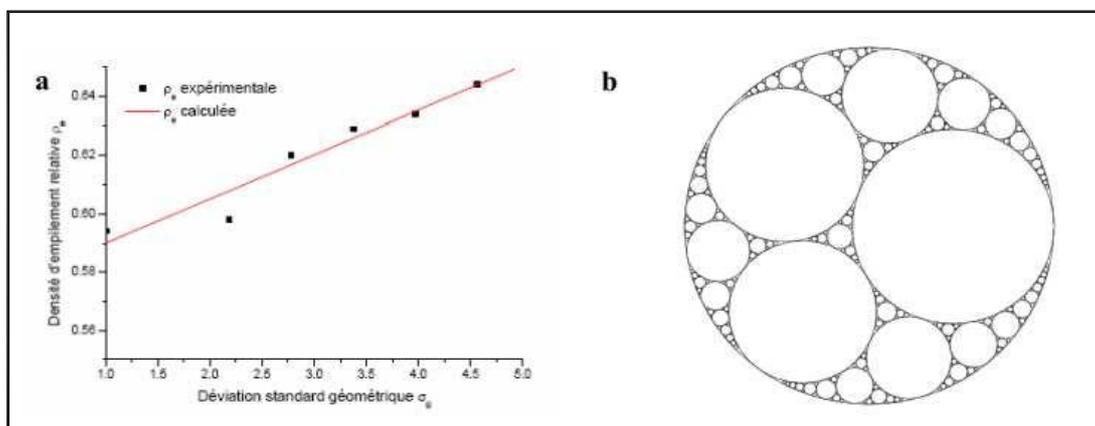


Figure 3 : Evolution de la densité de l'empilement de particules sèches en fonction de la déviation standard géométrique (GUERIN, 2004)

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.

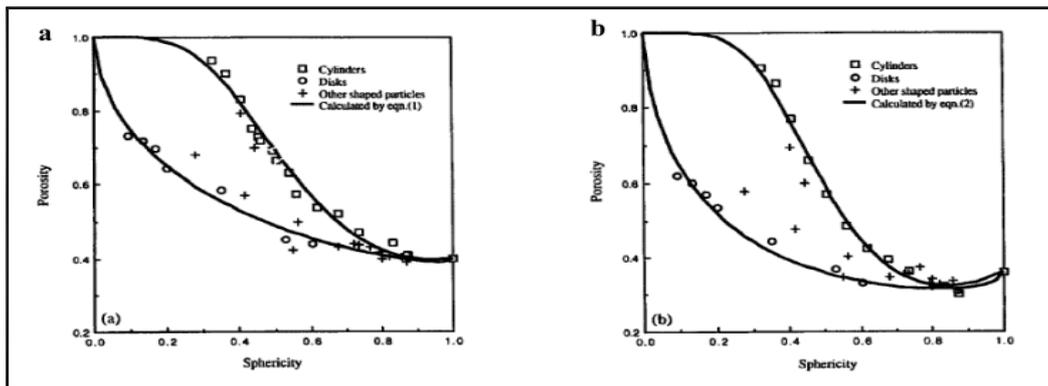


Figure 4 : Evolution de la porosité en fonction de la sphéricité pour différentes formes des Particules (GUERIN, 2004).

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 ».

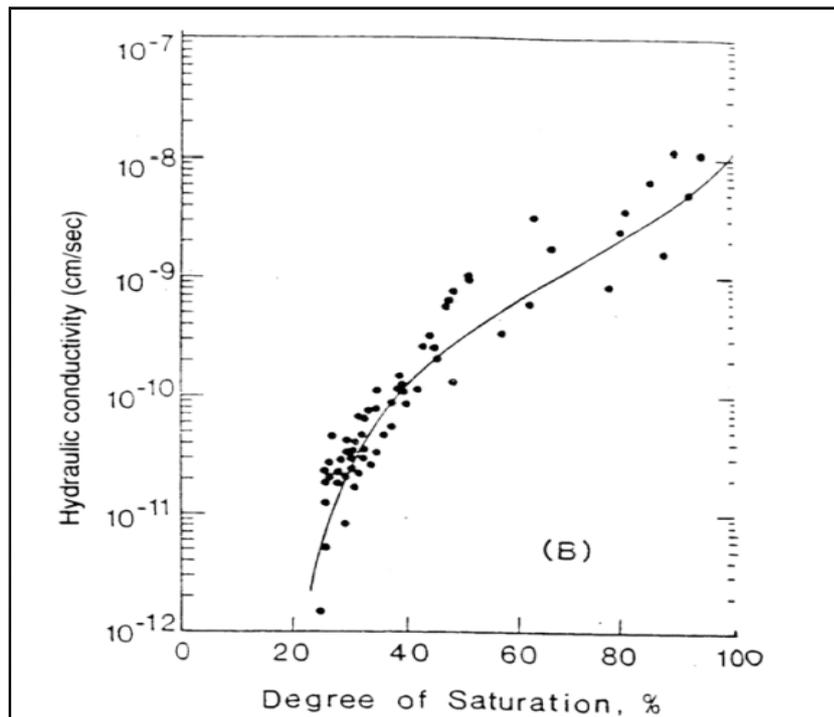


Figure 5 : La perméabilité en fonction de degré de saturation pour un sable (OLSON et DANIEL, 1979).

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.

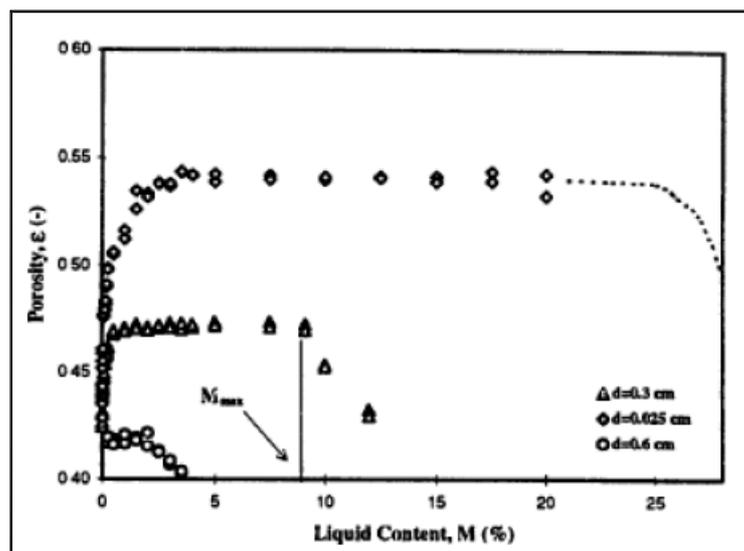


Figure 6 : Evolution de la porosité en fonction de la teneur en eau pour un sable (FENG et YU, 1998)

I.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 :

$$K = 100$$

Avec :

: 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 :

$$K = \frac{C}{\mu_0} \left(\frac{d_{10}}{d_{60}} \right)^{-2} \times \frac{e^3}{1+e}$$

Avec:

C : 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.

μ_0 : coefficient d'uniformité des échantillons.

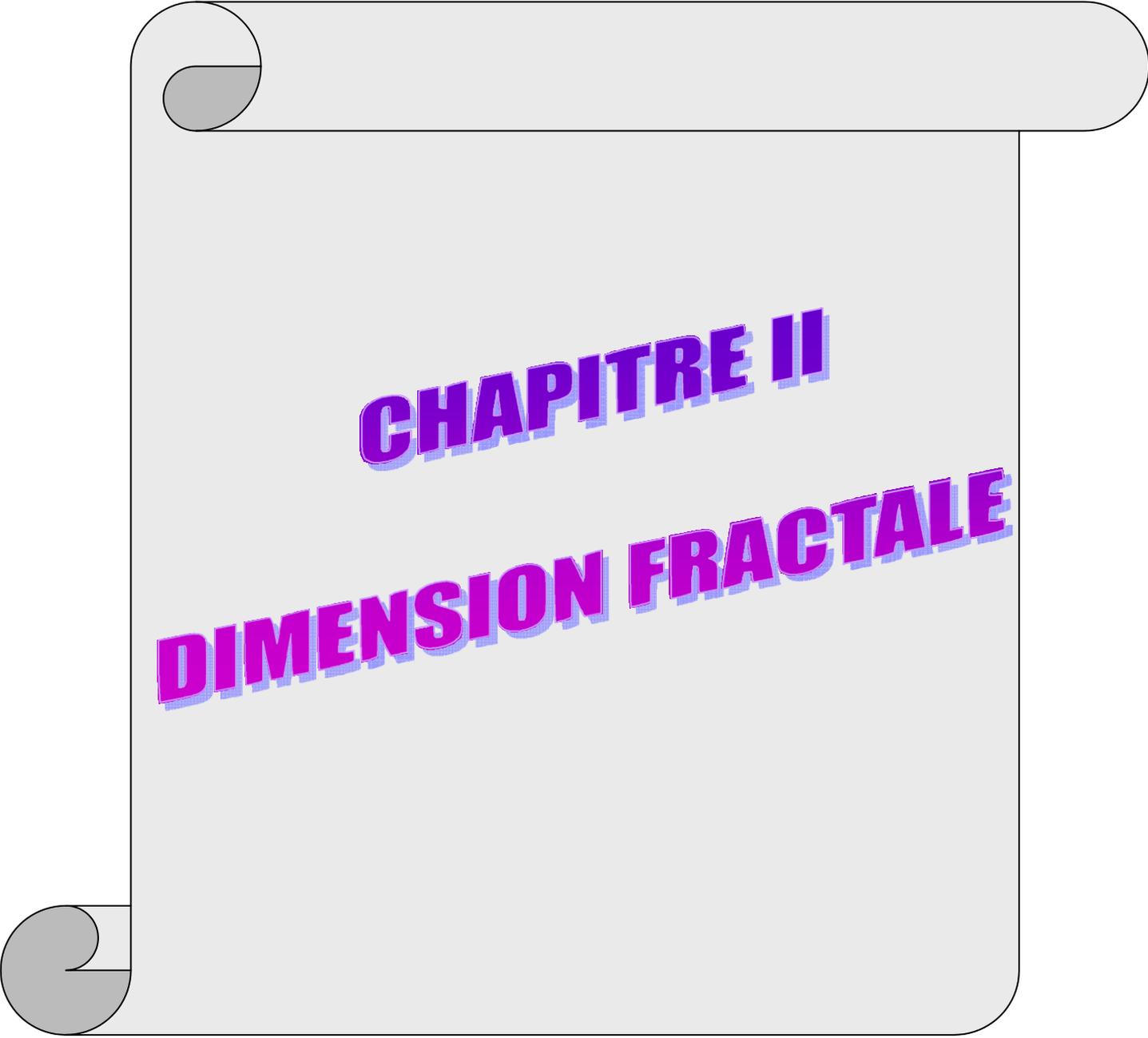
d_{10} : diamètre efficace des grains.

e : indice des vides.

1.7 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 fractals 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.

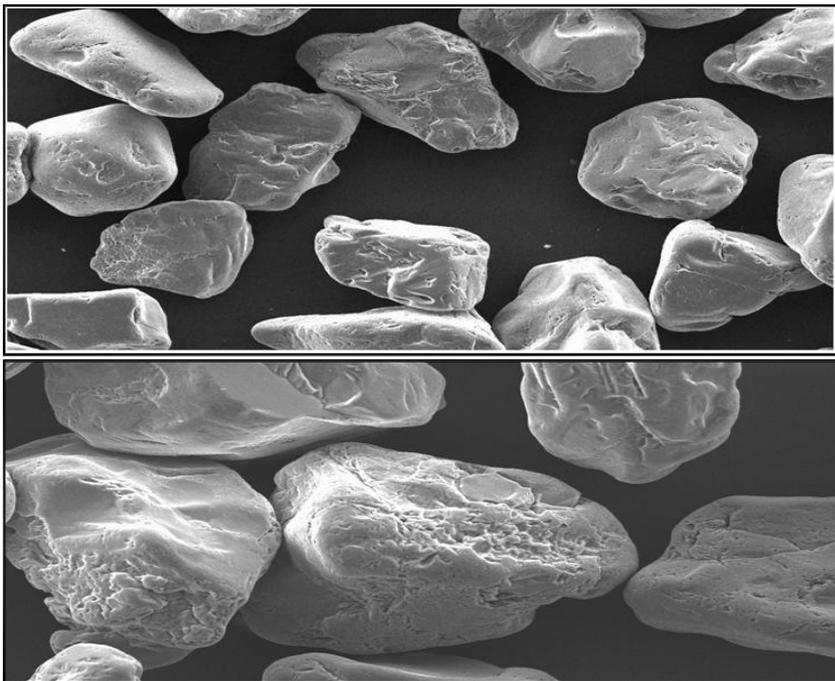
II-4 CARACTERISTIQUES D'UN OBJET FRACTALE

Les objets fractals 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



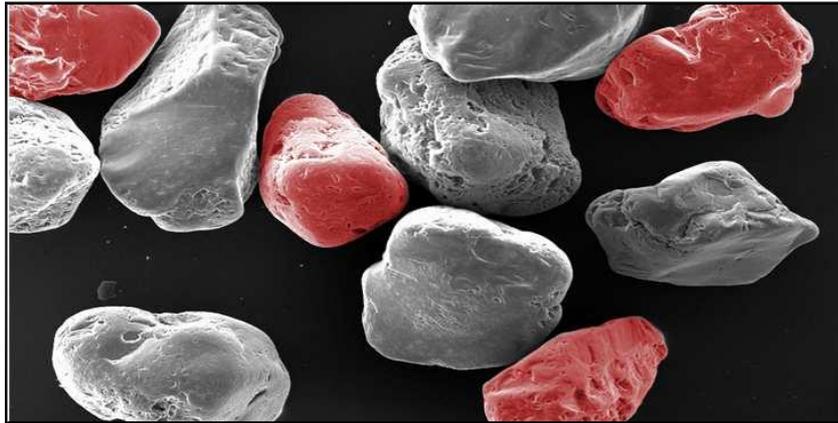


Figure 9 : Morphologie des particules de sable observée au microscope électronique balayage (MEB)

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

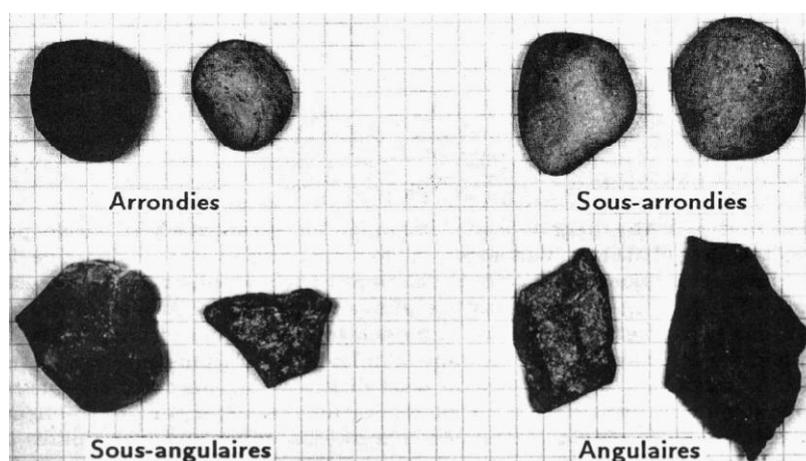


Figure 10 : Différentes formes des grains

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.

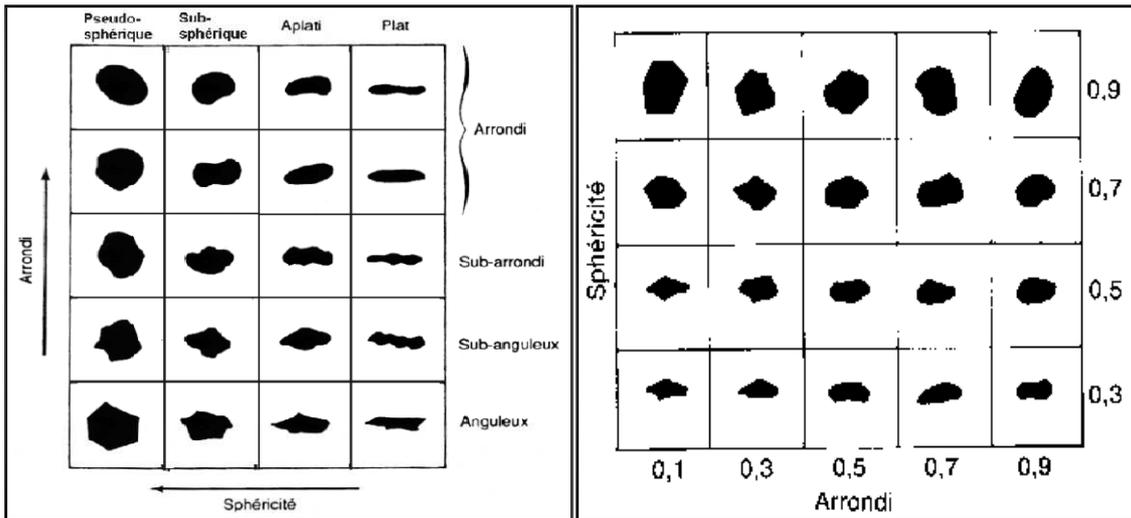


Figure 11 : Echelle de sphéricité des grains

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)

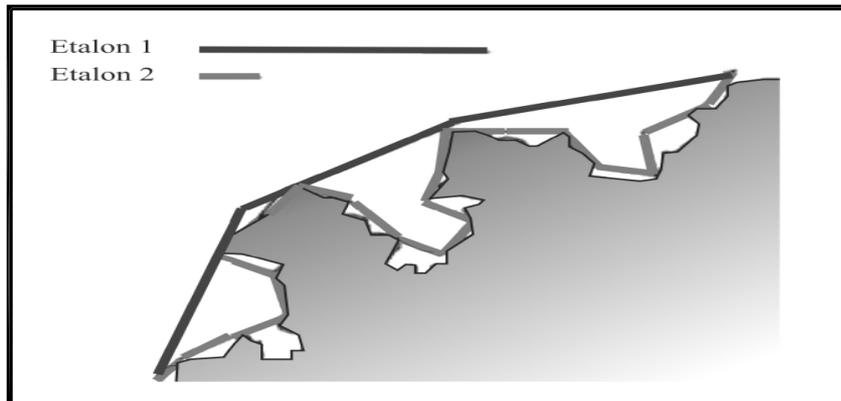


Figure 14 : Utilisation de différentes règles pour parcourir les différents cotés

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.

$$L = 234 \text{ ''} \longrightarrow D = \frac{567}{5672}$$

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.

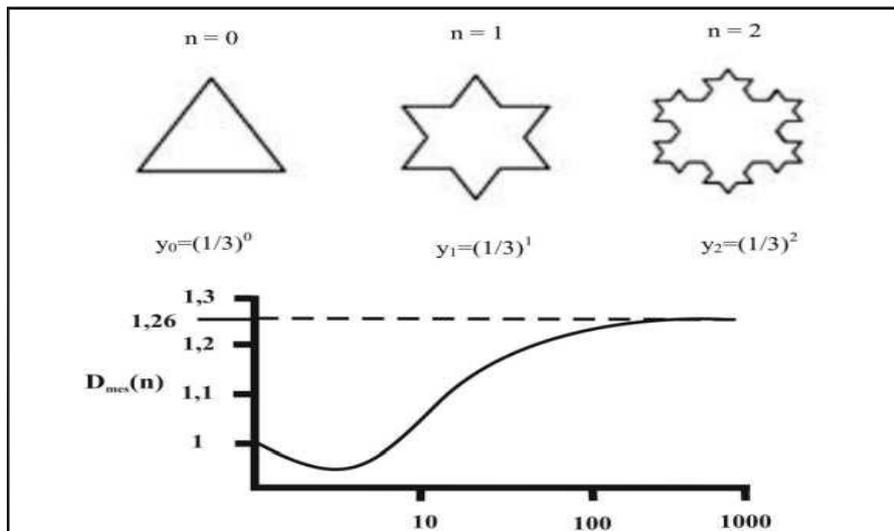


Figure 15 : Relation entre la dimension fractale et le nombre générateur

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 $D = \log 4 / \log 3 = 1.26$.

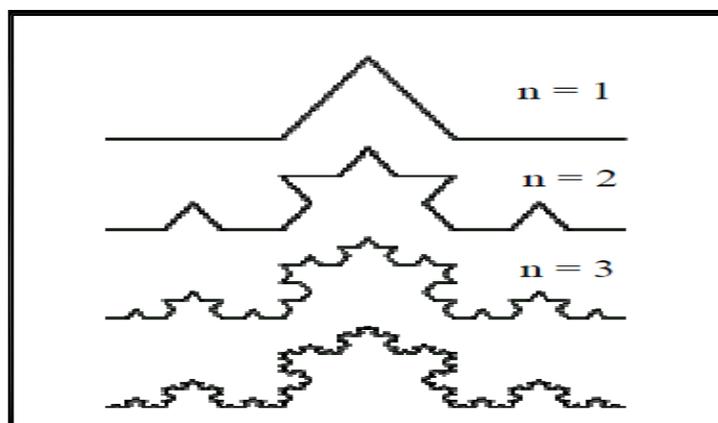


Figure 16 : Construction de la courbe triadique de KOCH

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.

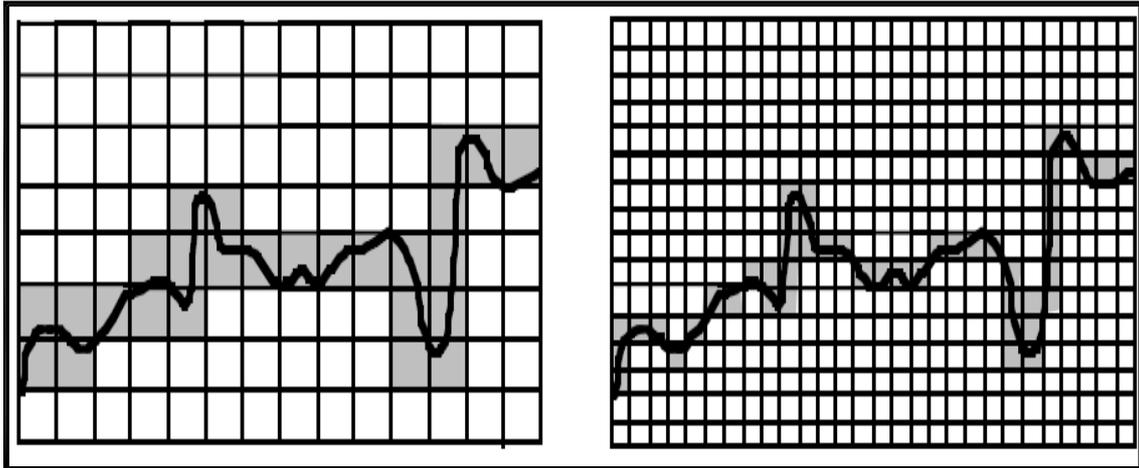


Figure 17: Méthode des boîtes ("box counting")

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 $K = 1/2 \log c^2$, 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.

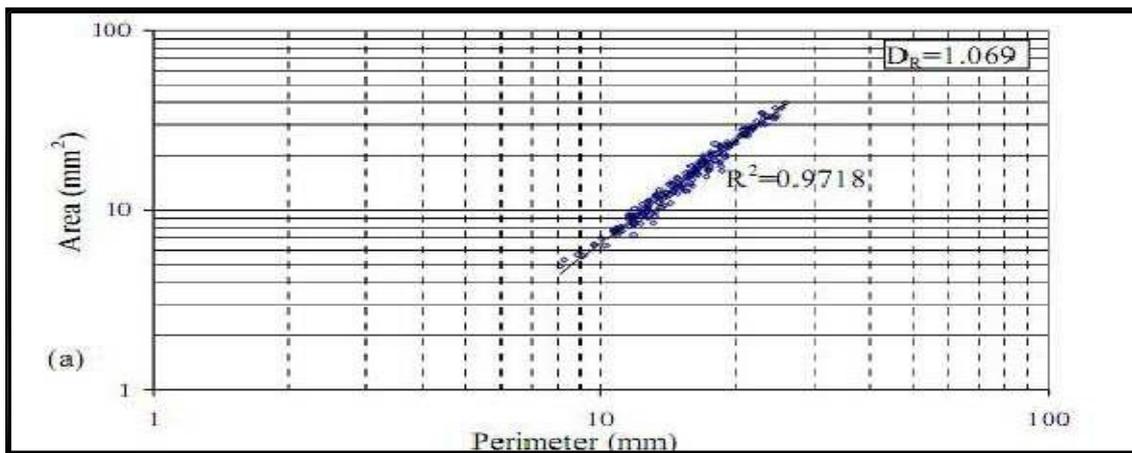
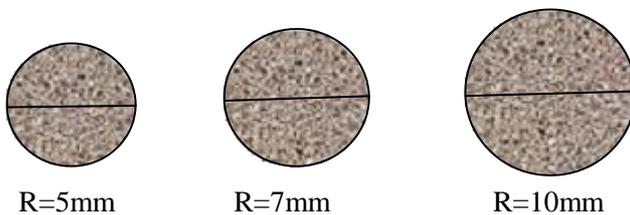


Figure 18 : Application de la méthode de area –perimeter d'un gros grain de sable d'origine d'une pierre calcaire

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 $D = 1$.

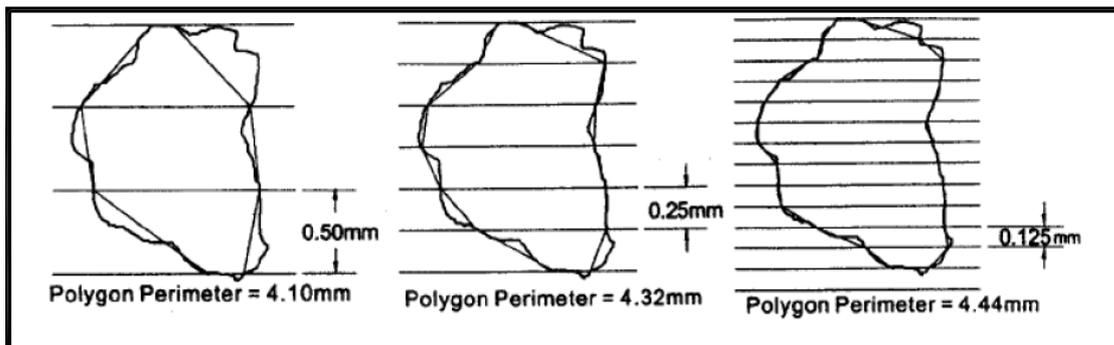
$$C = \frac{P^{1/D_R}}{A^{0,5}}$$



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).



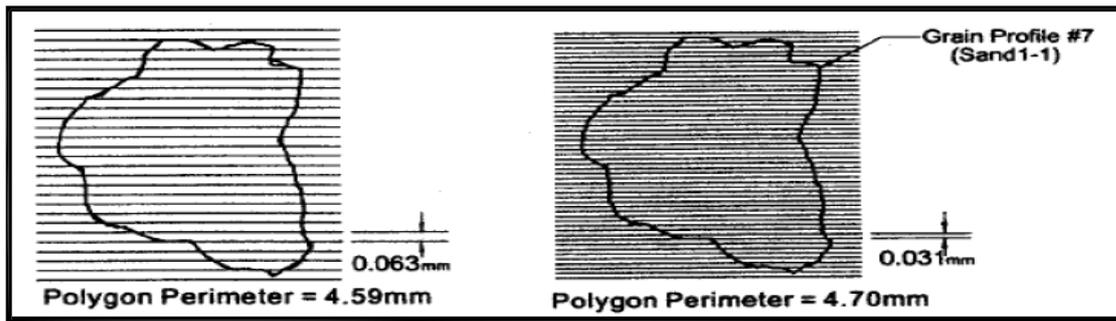


Figure 19 : Schéma représentant la méthode des lignes parallèles

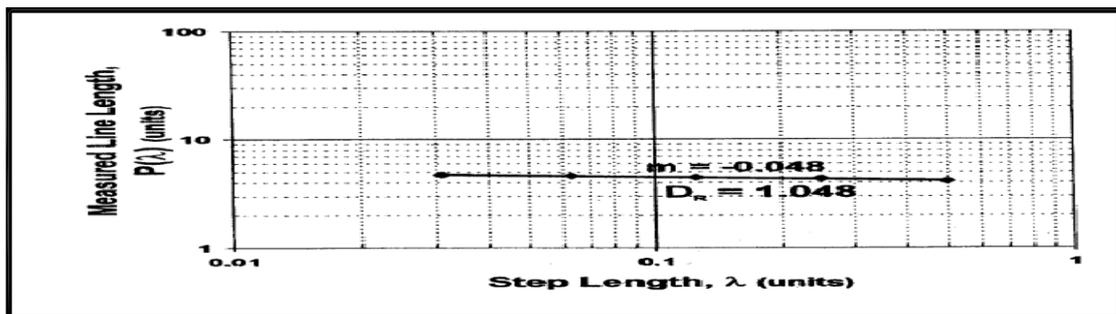


Figure 20 : Courbe de la dimension fractale de la méthode des lignes parallèles
II-8 MODELISATION FRACTALE DE LA STRUCTURE DU SOL

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 $DF \cdot \log(d/D)$.

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.

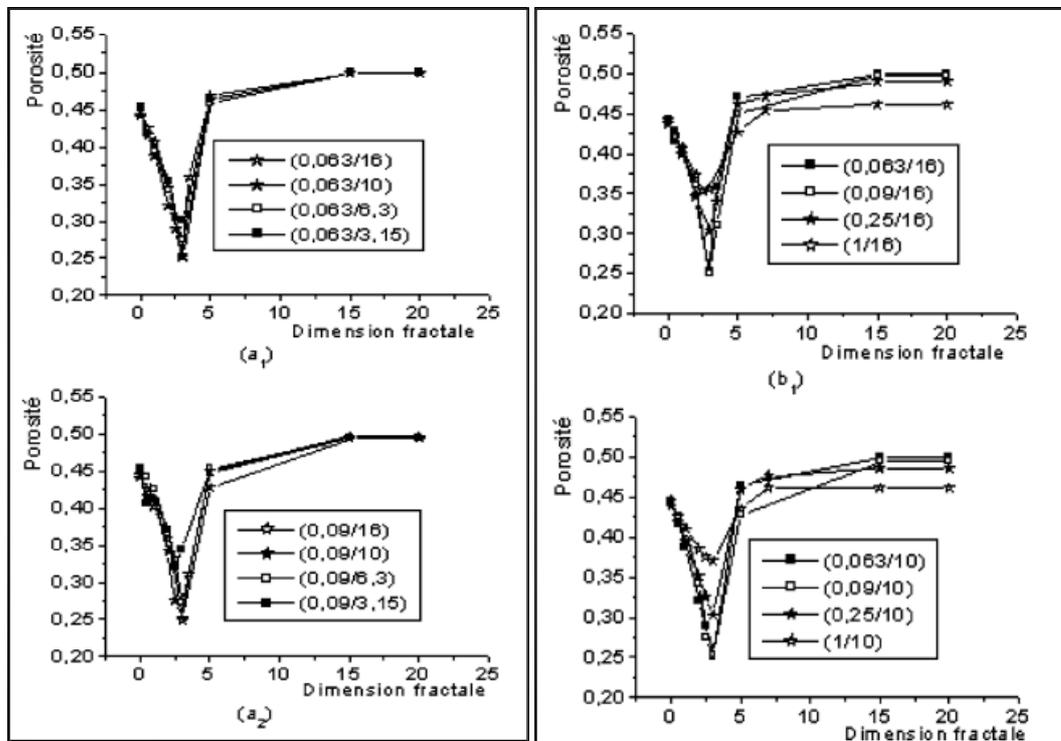


Figure 21 : Porosité en fonction de DF (ai) Mélanges d/D_i , (bi) Mélanges d_i /D

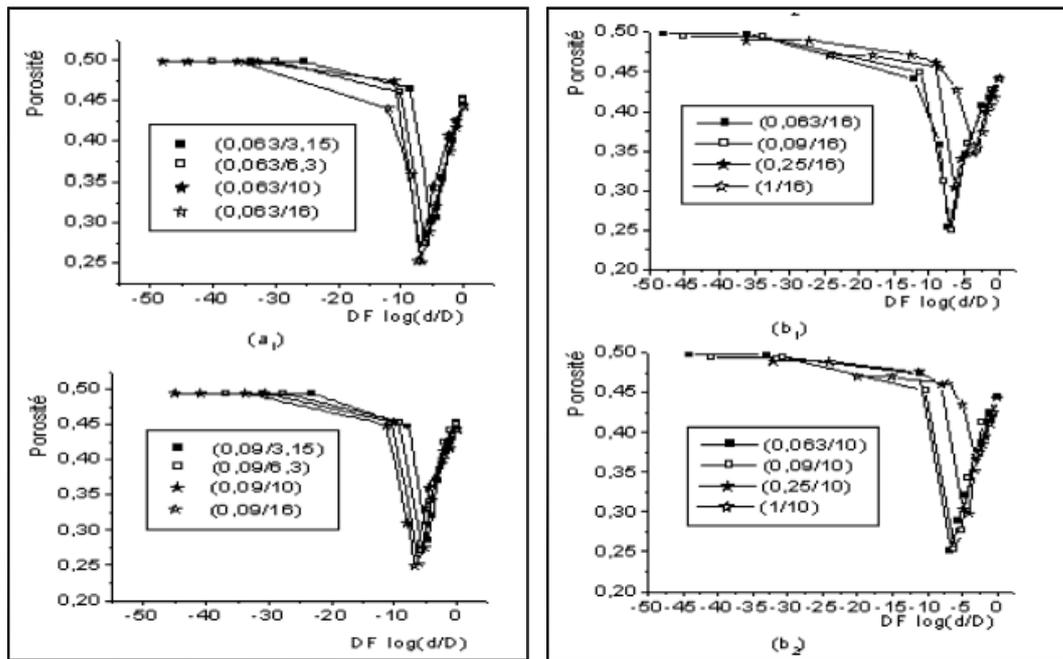


Figure 22 : Porosité en fonction de $DF \cdot \log(d/D)$ (ai) Mélanges d_i/D_i ; (bi) Mélanges d_i/D

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.

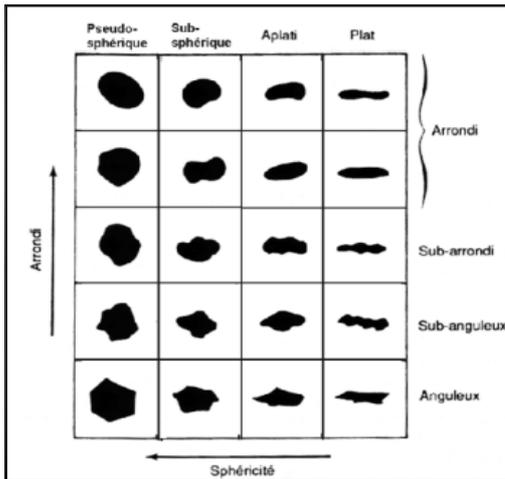


Figure 23 : Descripteurs de l'arrondi et de la sphéricité d'après (B, D et Jabiol, B. 1995, p 123)

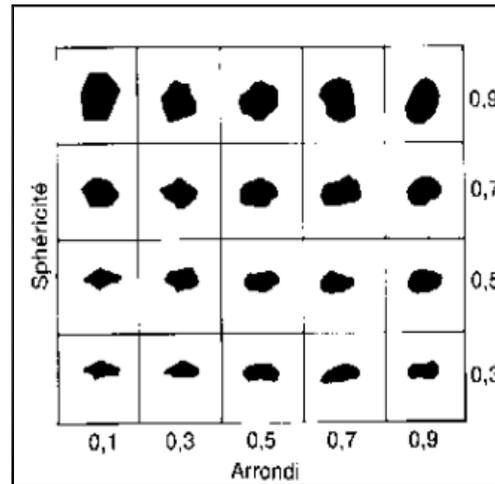
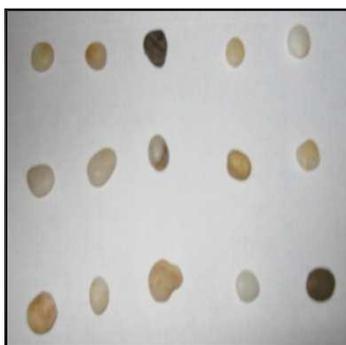
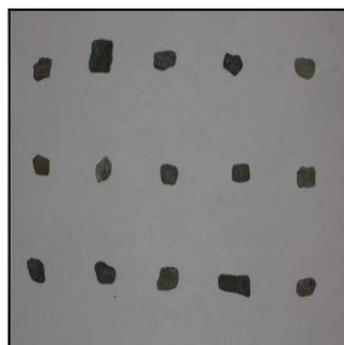


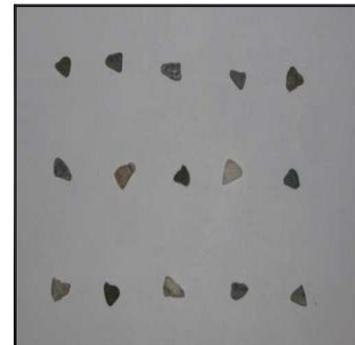
Figure 24: Indices d'arrondi et de sphéricité D'après (Delcroix, G et Havel, M.1988, p123).



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.

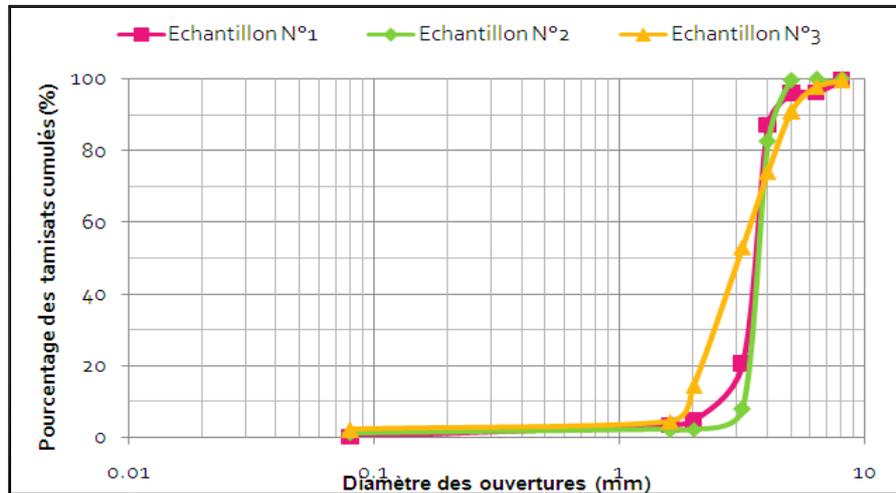


Figure 25 : courbes granulométriques des trois types de sables étudiés

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

Le coefficient de courbure, $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} D_{60}}$: 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 (B_C) par la masse des grains solides (B_D).

$$W \% = \frac{E_F}{E_G} \cdot 100 \%$$

Avec :

m_I : m -m

m_J : m -m

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 (g)	2000	2000	2000
Masse totale du sol sec : m (g)	1920	1910	1907
Masse de la tare: m (g)	450	450	450
Masse de l'eau m_I (g)	80	90	93
Masse du sol sec m_J (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 K_L et la masse volumique des grains solides sont déterminées au pycnomètre. Connaissant le K_L et w on déduira la masse volumique humide d'un échantillon K_M .

a-Détermination de la masse volumique sèche

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

$$K_L \text{ (g/NB)} = \frac{E_G}{O}$$

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		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Essai N°									
Masse de l'échantillon m_j 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 K_{LR} (g/NB)	1.72	1.72	1.64	1.63	1.61	1.65	1.58	1.64	1.61
Masse volumique sèche moyenne (g/NB)	1.69			1.63			1.61		

b-Détermination de la masse volumique humide

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		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Essai N°									
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_J g	1036	68.99	65.69	490	242.1	148.5	63.46	98.55	80.54
Masse de l'échantillon humide : m_S g = $m_J \times (w + 1)$	1092.3	72.74	69.26	520.1	257	157.6	67.50	104.8	85.67
Masse volumique humide: K_{MR} (g/NB) = $\frac{E_T}{O}$	1.82	1.81	1.73	1.73	1.71	1.75	1.68	1.74	1.71
Masse volumique humide moyenne: K_M (g/NB)	1.78			1.73			1.71		

c-Détermination de la masse volumique sèche)

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 K_D) des particules solides est le rapport de la masse des particules solides m_J par leur volume V_s :

$$K_D \text{ (g/NB)} = \frac{E_G}{O_J}$$

Ou : m_J est obtenue par pesage

V_s est mesuré au pycnomètre

Tableau 5 : Détermination de la masse volumique grains solides

Echantillon N°	1			2			3		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Essai N°									
Masse de l'échantillon m_J g	1036	68.99	65.69	490	242.1	148.5	63.46	98.55	80.54
Volume de l'échantillon V_s cm)	400	27	26	200	100	60	24	37	30
Masse volumique des grains solides K_{DR} (g/NB)	2.59	2.55	2.52	2.45	2.42	2.47	2.64	2.66	2.68
Masse volumique des grains solides moyenne K_U (g/NB	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°	K_M (g/NB)	K_L (g/NB)	K_D (g/NB)
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 (K_L , K_D), définie par la formule :

$$e = \frac{K_D}{K_L} - 1$$

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 :

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

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:

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

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

$$Sr = (K_D/K_C) \cdot (W/e)$$

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
K_L (g/NB)	1.69	1.63	1.61
K_D (g/NB)	2.55	2.44	2.66
$e = K_D/K_L - 1$	0.5	0.49	0.58
W (%)	5.44	6.16	6.38
$Sr = (K_D/K_C) \cdot (w/e)$	27.74	30.67	29.26
$n = e / (e + 1)$	0.33	0.32	0.36

Sachant que $K_C = 1$ (g/NB)

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 (%)	K_L (g/NB)	K_D (g/NB)	K_M (g/NB)	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 :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

b- Le mode

Le mode, M_o 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 :

$$M_o = C_d + \frac{e\Delta e}{\Delta e + \Delta g}$$

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 U comme la moyenne arithmétique des carrés des écarts à la moyenne.

$$h\% = \frac{\sum_{e=1}^j c_e - \hat{c}}{n}$$

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

$$S = \sqrt{h\%}$$

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.

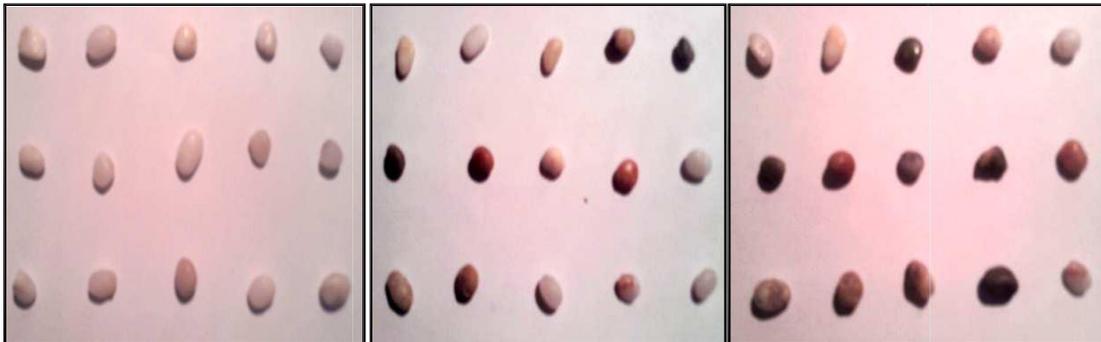
Le coefficient de variation noté C.V. est un indice de dispersion relatif prenant en compte ce biais et est égal à :

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

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).

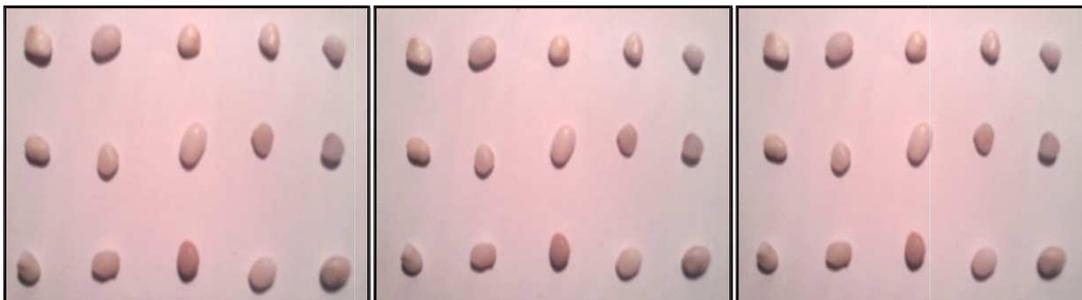


échantillon 1

échantillon 2

échantillon 3

Figure 26 : Forme arrondie (0/8)

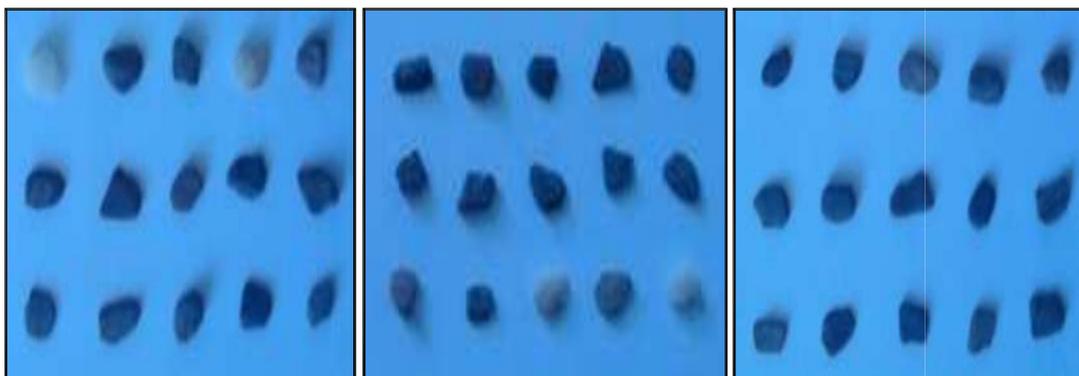


échantillon 1

échantillon 2

échantillon 3

Figure 27 : Forme arrondie (3/5)

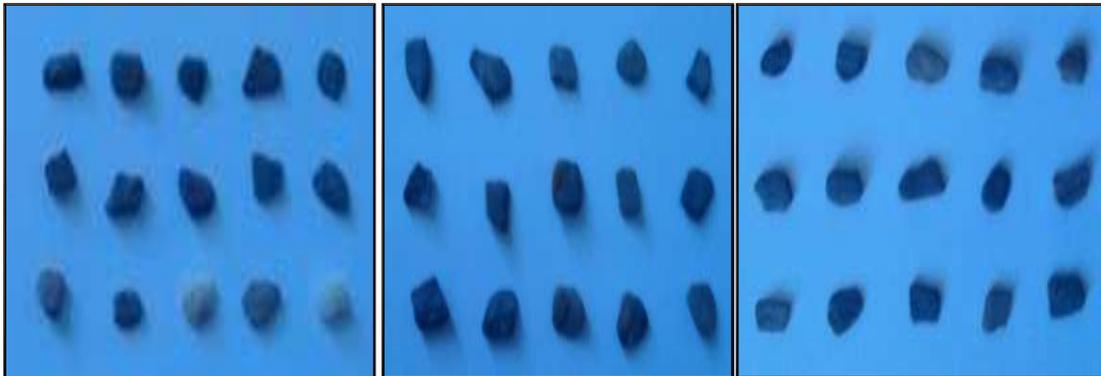


échantillon 1

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)

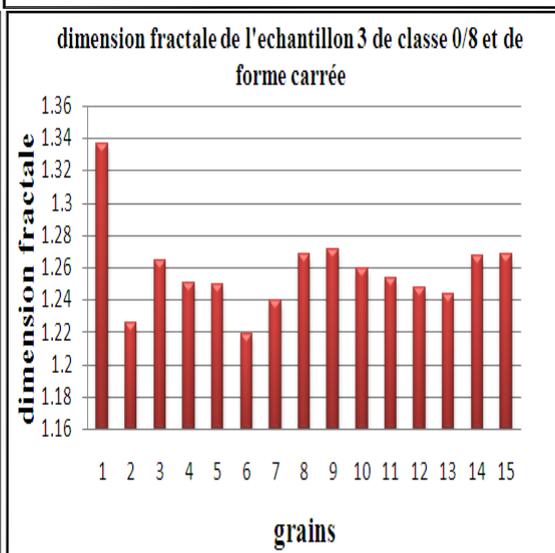
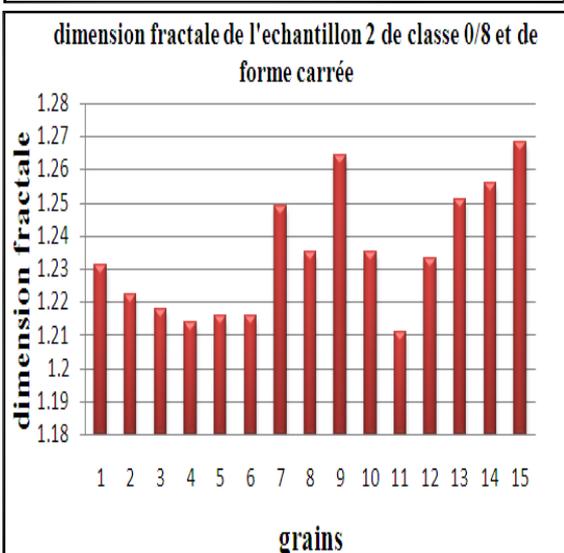
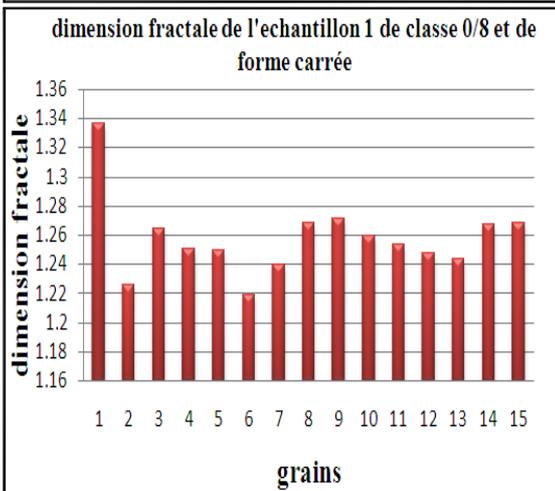
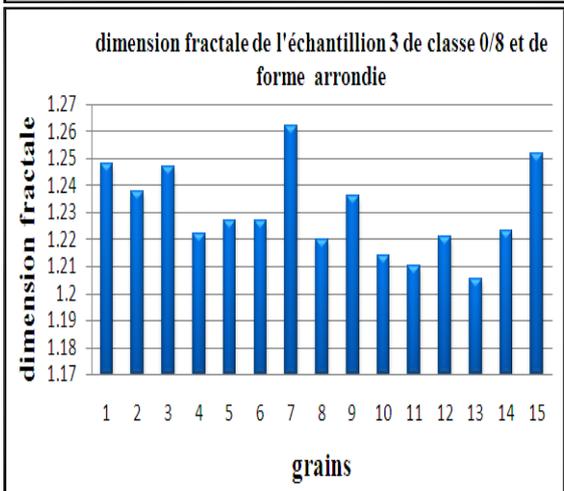
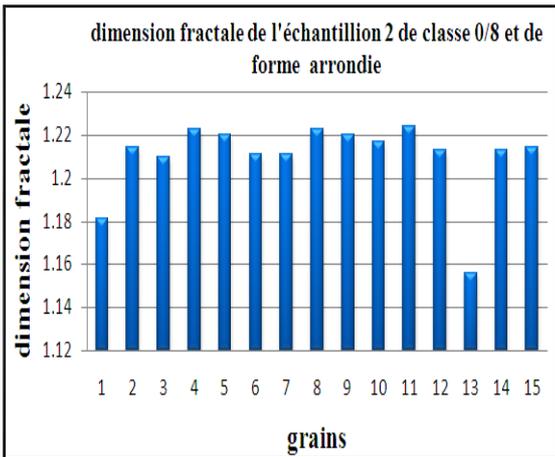
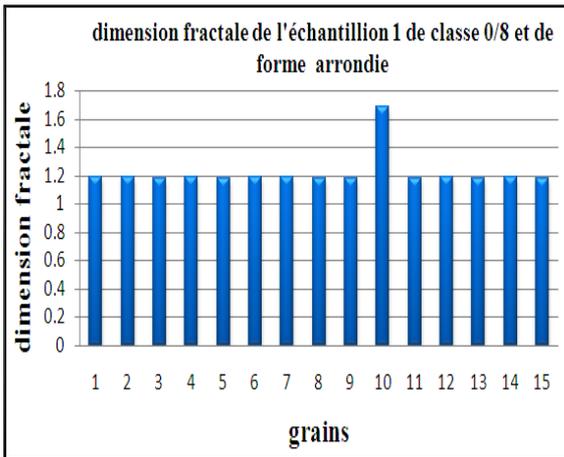
Pour calculer la dimension fractale des grains, on utilise la formule suivante :

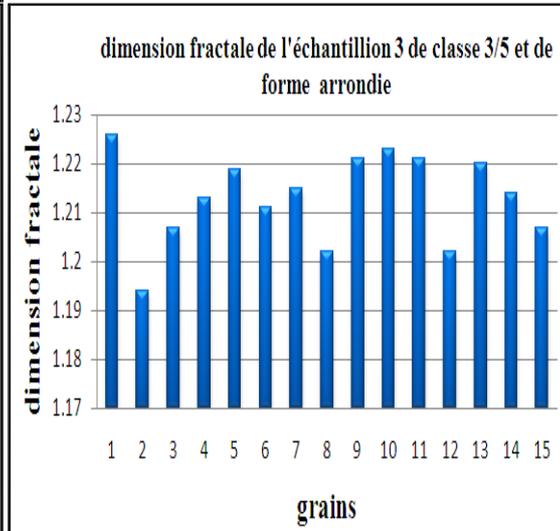
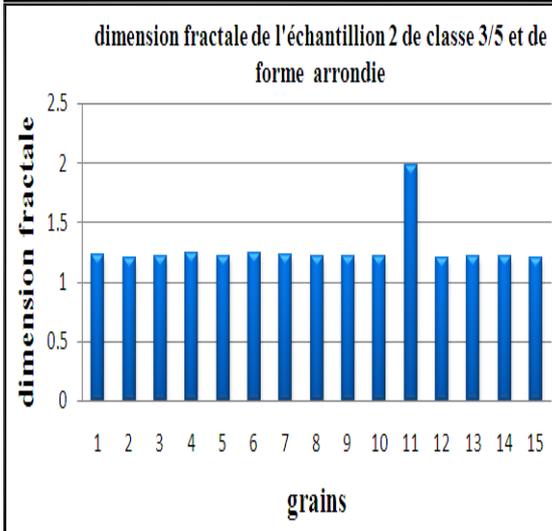
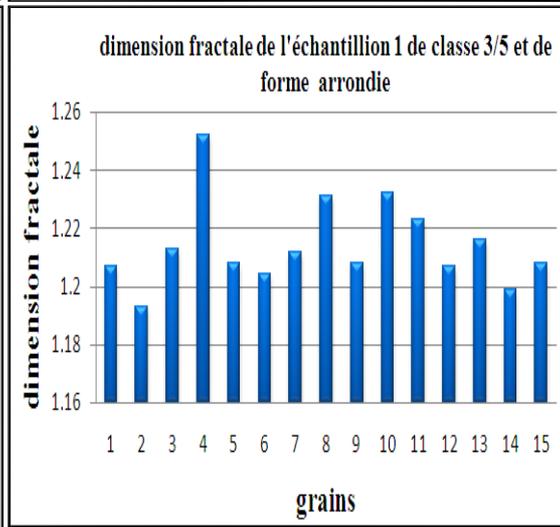
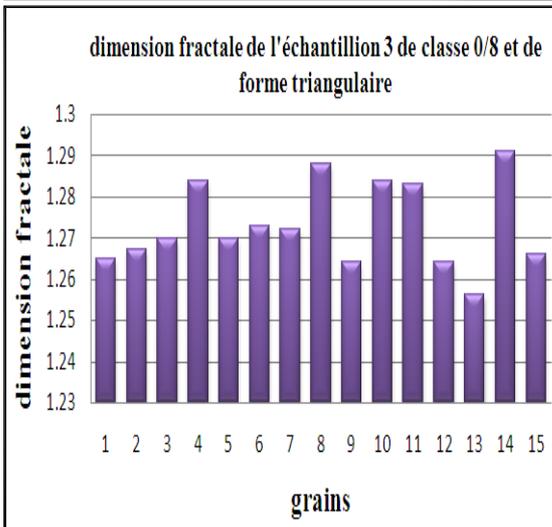
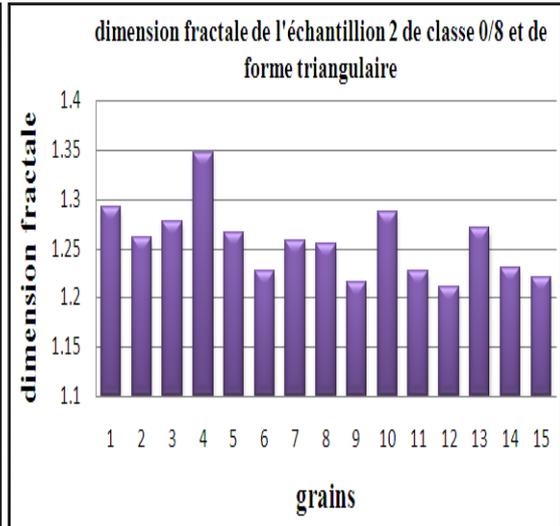
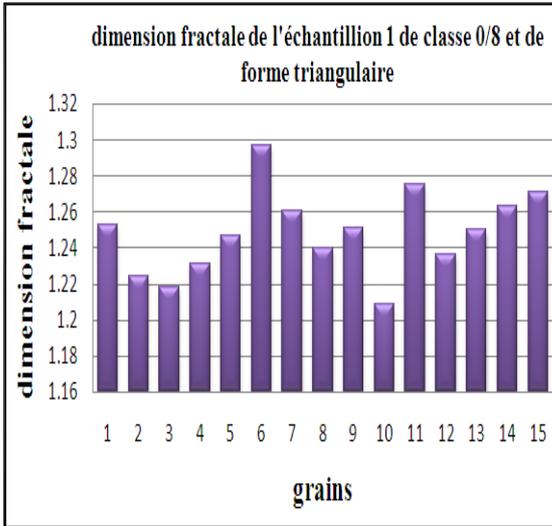
$$c = \frac{P^{1/D_R}}{A^{0,5}}$$

Avec $c = 1.77$ on obtient $r_m = \frac{567 n}{\$ \cdot 567 + 567}$

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.





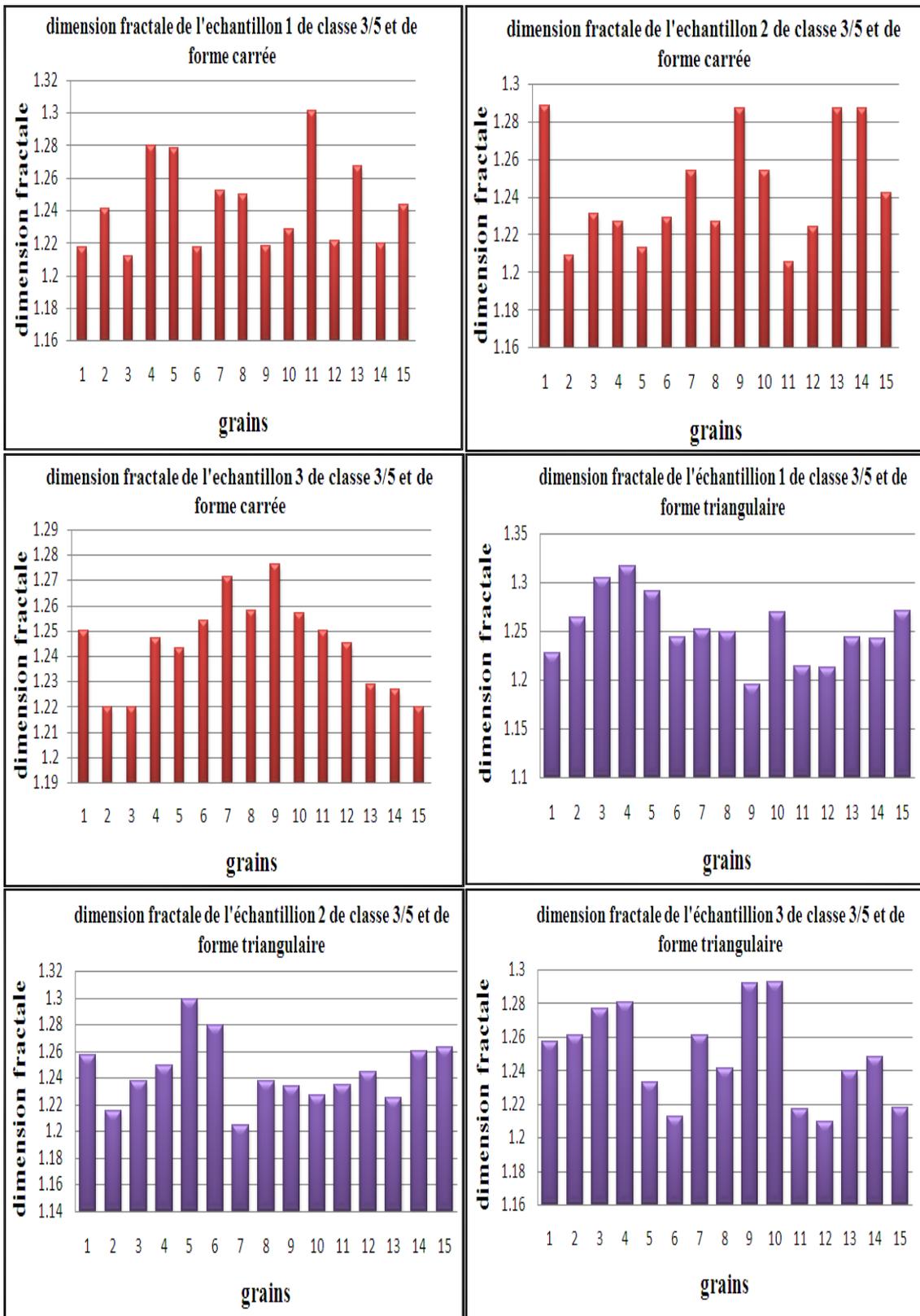


Figure 32 : représentation graphique de la dimension fractale obtenue pour les différents échantillons

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 perméamètre

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 tenu 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 gradué) 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 régle 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)	Temp (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 triangulair	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 triangulair	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

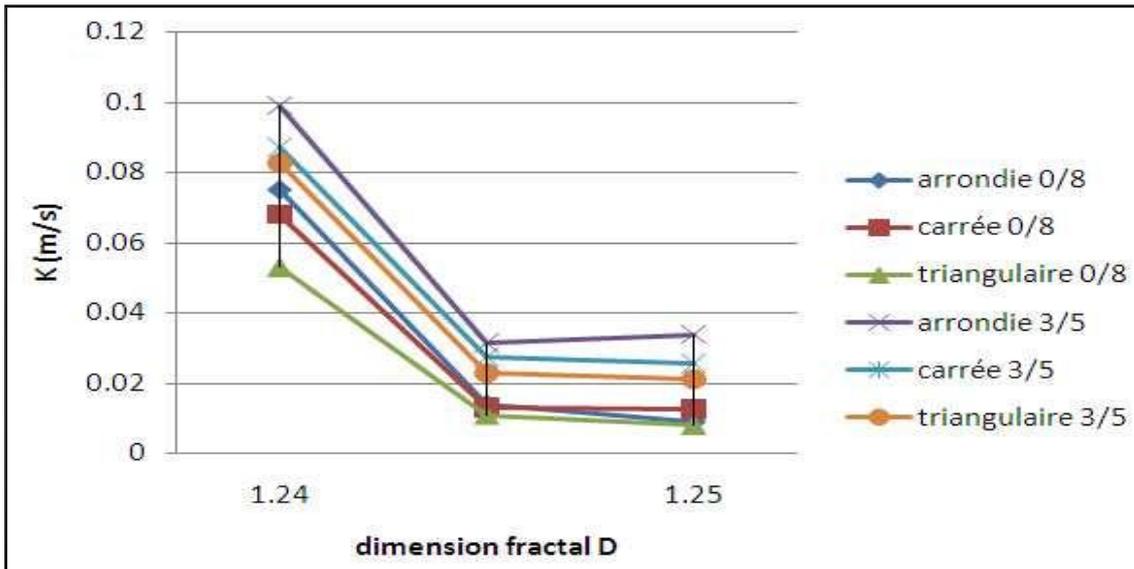


Figure 34 : Courbe de perméabilité en fonction de la dimension fractale

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.

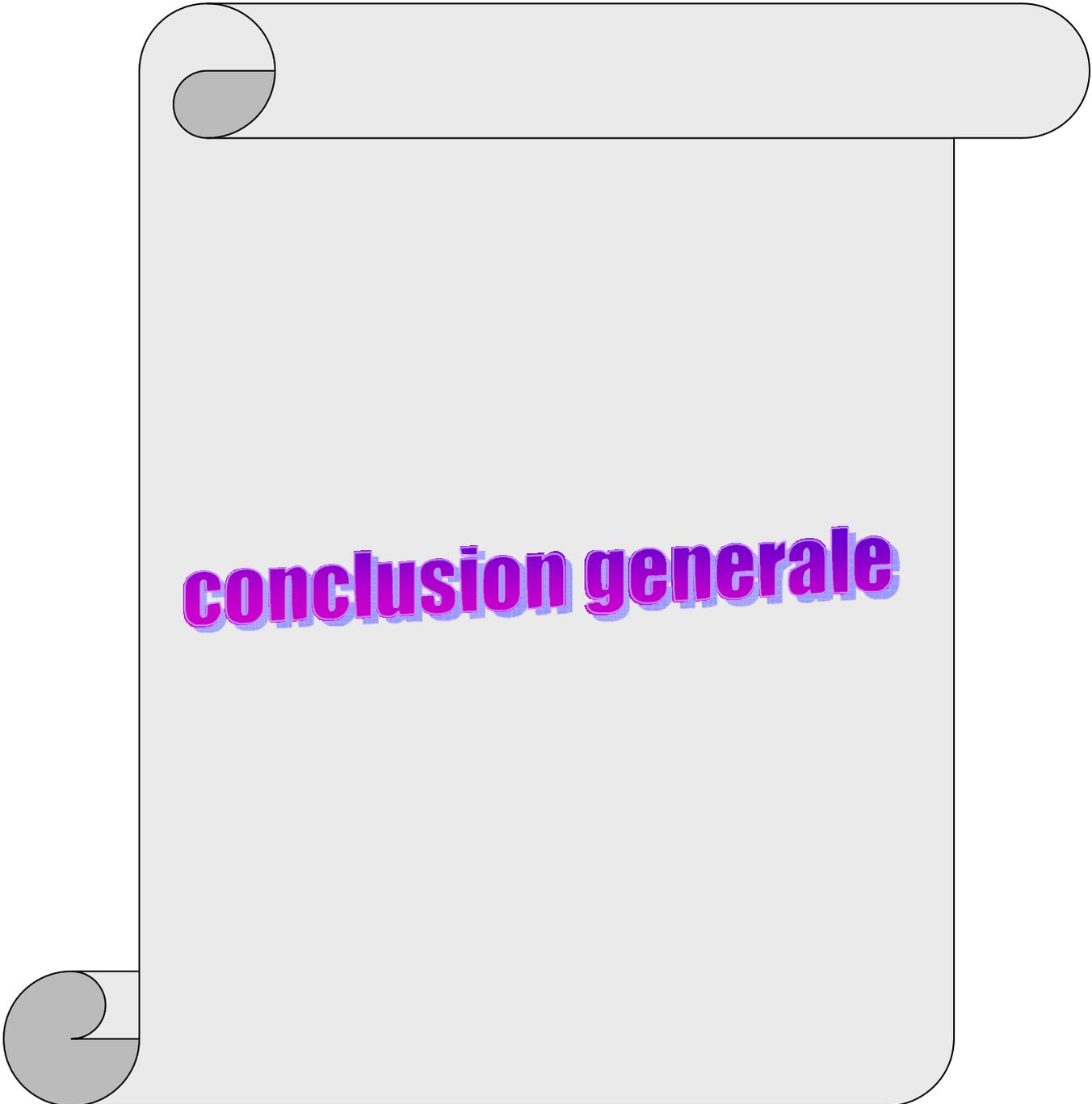
La forme triangulaire pour les deux classes (0/8, 3/5) est moins perméable des trois formes. Cela peut s'expliquer par la rugosité et l'angularité importantes qui caractérisent cette forme. L'enchevêtrement des grains, dans ce cas, réduit les vides existants dans la matrice sableuse.

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.

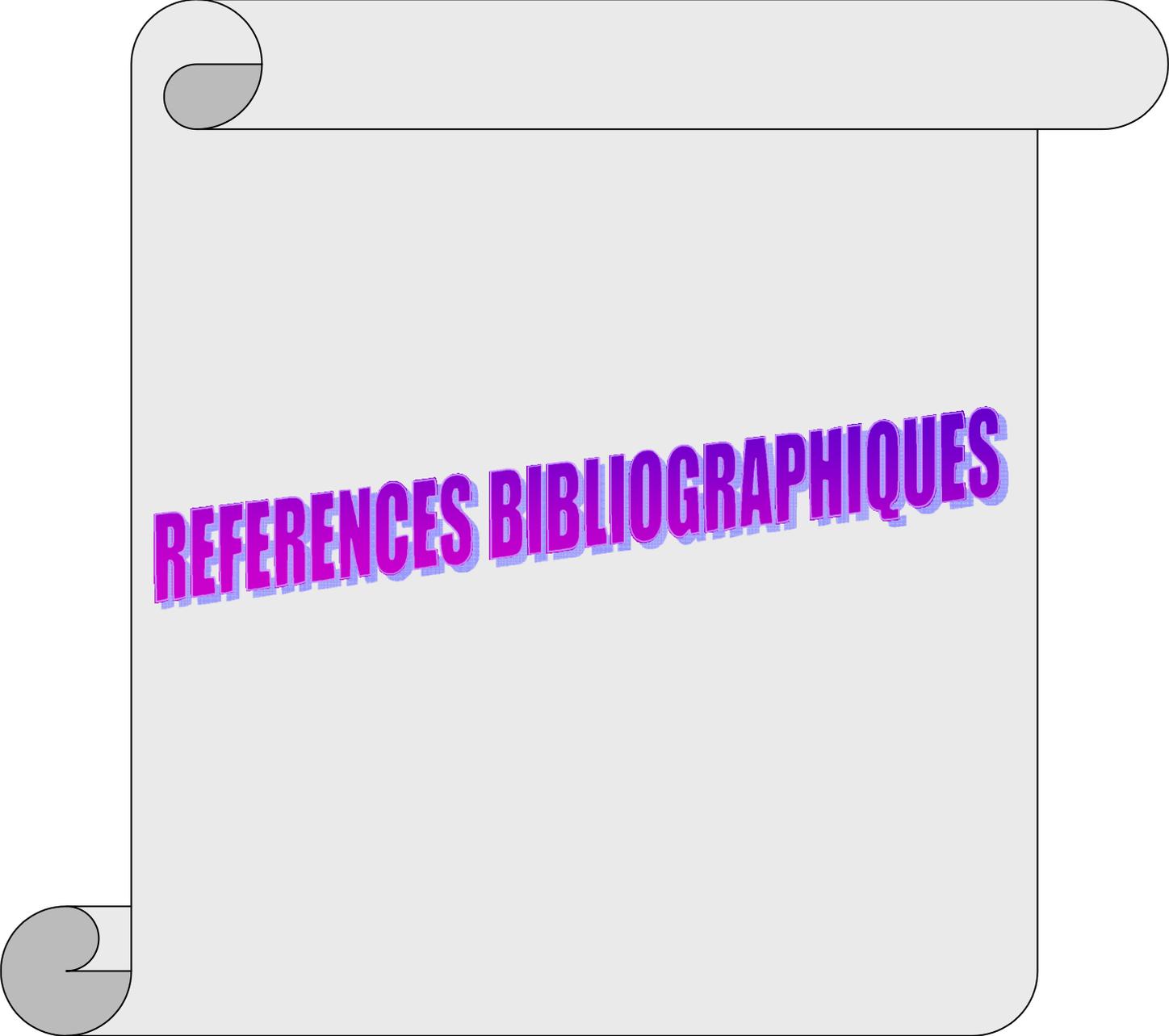
La perméabilité diminue en fonction de l'augmentation de la dimension fractale dans les deux types d'essais (oedométrique et perméamètre), cela signifie que la dimension fractale caractérise la rugosité, les angularités et l'état de surface des grains constituant les sables.

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 entrainera 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 partially 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.

LISTE DES TABLEAUX

Tab.1 Pourcentage des tamisâts cumulés pour la granulométrie 10/20 du gré avant essai.....	51
Tab.2 Pourcentage des tamisâts cumulés pour la granulométrie 10/20 du gré allongée après essai.....	51
Tab.3 Pourcentage des tamisâts cumulés pour la granulométrie 10/20 du gré sous angulaire après essai.....	52
Tab.4 Pourcentage des tamisâts cumulés pour la granulométrie 10/20 du gré sous arrondi Après essai.....	52
Tab.5 Pourcentage des tamisâts cumulés pour la granulométrie 10/20 du gré sous arrondi avant essai.....	59
Tab.6 Les coefficients MDE calculés pour chaque forme du gré	67
Tab.7 Les coefficients MDE calculés pour chaque forme du calcaire.....	68
Tab.8 Les coefficients MDE calculés pour chaque forme du schiste	69
Tab.9 Les coefficients LA calculés pour chaque forme du gré.....	71
Tab.10 Les coefficients LA calculés pour chaque forme du calcaire	72
Tab.11 Les coefficients MDE calculés pour chaque forme du schiste	75
Tab.12 : les différents écrasements observés durant les essais appliqués.....	74
Tab.13 Masses cumulatives $M(R<r)/M_T$ en fonction des rapports de diamètres des tamis r/r_L du matériau gré pour la granulométrie 10/20 avant essai de fragmentabilité.....	77
Tab.14 Masses cumulatives $M(R<r)/M_T$ en fonction des rapports de diamètres des tamis r/r_L du matériau gré pour la granulométrie 10/20 après essai de fragmentabilité.....	78
Tab.15 Les résultats de la dimension fractale du gré avant et après chaque essai.....	80
Tab.16 : Les résultats de la dimension fractale du calcaire avant et après chaque essai.....	82
Tab.17 : Les résultats de la dimension fractale du schiste avant et après chaque essai.....	84

INTRODUCTION GENERALE

L'étude du comportement des milieux granulaire, passe par la caractérisation de ses granulats. Ces derniers font partie des structures de génie civil tels que : les barrages, les fondations, les chaussées...etc. Cependant, ces matériaux sont soumis constamment aux conditions environnementales dures et aux fortes contraintes de compression. En raison de ces charges compressives, ces matériaux granulaires se fragmentent en morceaux de différentes tailles. Ce qui provoque une modification de la granulométrie (dimension, forme) des grains et de la porosité de ces matériaux, induisant alors à une variation de leurs caractéristiques mécaniques.

On peut simuler la dégradation des grains dans le cas du domaine routier par les essais (LA, MDE, fragmentabilité et dégradabilité). Le but de ce travail est d'utiliser la notion de la dimension fractale pour évaluer le taux d'écrasement des grains des matériaux granulaires (gré, schiste et calcaire) en fonction de leur dureté tout en sachant que les caractéristiques des essais routiers ont une influence sur la dimension fractale des grains des matériaux utilisés.

CHAPITRE I

CHAPITRE I

NOTION DE DIMENSION FRACTALE

1. Introduction

Dans la nature, de nombreuses choses ou objets illustrent le concept de fractalité ; comme les montagnes, les nuages, les amas galactiques, la taille des cratères sur la Lune et Mars, la forme des arbres ou des coraux etc....

La fin des années 70 a vu se développer la notion de *géométrie fractale* dans de nombreux domaines de la physique. Le concept de géométrie fractale, introduit par B.B. Mandelbrot, fournit, en effet, un cadre solide pour l'analyse des phénomènes naturels dans divers secteurs des sciences. Roger Pynn (1977) écrit dans la revue *Nature* que « si cette opinion continue à s'étendre, nous n'aurons pas longtemps à attendre avant que l'étude des fractales devienne une partie obligatoire du cursus universitaire ».

La notion de *fractale* regroupe dans un cadre géométrique unique de nombreux travaux mathématiques antérieurs. Les objets concernés ont été inventés dès la fin du XIXe siècle par des mathématiciens comme Cantor, Peano...Le terme « fractal » a été introduit par B.B. Mandelbrot (*fractal*, c'est-à-dire qui a été fractionné à l'infini, du latin « *fractus* » dérivé du verbe « *frangere* », briser). Une définition à la fois précise et générale d'un objet fractal est difficile ; Mandelbrot le définit comme un ensemble qui présente des irrégularités à toutes les échelles. C'est fondamentalement son caractère de concept *géométrique* qui en fait sa portée. La géométrie fractale est le complément qui manquait à la géométrie euclidienne et à la symétrie: comme l'a fait remarquer Mandelbrot que les nuages ne sont pas des sphères, les montagnes des cônes, ni les îles des cercles et leur description nécessite une géométrisation adaptée.

2. Définition d'une fractale

Une fractale est un objet irrégulier, dont l'irrégularité est la même à toutes échelles et en tous points. La propriété importante qui les caractérise est l'autosimilarité : c'est-à-dire le fait que des structures identiques se répètent à différentes échelles.

Autre définition (Mandelbrot) : Une fractale est une figure géométrique ou un objet naturel qui combine les caractéristiques suivantes :

- a) Ses parties ont la même structure que le tout, à ceci près qu'elles le sont à une échelle différente et peuvent être légèrement déformées ;
- b) Sa forme est extrêmement irrégulière ou fragmentée et le reste à toutes les échelles,
- c) Elle contient des éléments discernables dans une large gamme d'échelle ;

Mandelbrot a multiplié les exemples dans la nature rendant ainsi le concept de fractale opérationnel.

2.1. A quoi servent les fractales ?

L'application la plus directe et la plus simple de la géométrie fractale est la caractérisation et la mesure de l'irrégularité lorsque celle-ci possède une propriété d'autosimilarité ou une propriété d'auto-affinité sur une échelle suffisante. On essaie ainsi de mesurer le rôle spécifique de l'irrégularité, de la fractalité dans ce cas, en caractérisant les poudres par leurs géométries fractales. Autres exemples, la rugosité de certains papiers, la netteté des lettres d'imprimerie, les distributions de taille de grains dans des poudres, la fragmentation des minerais.

Les applications indirectes non empiriques, c'est-à-dire celles où on utilise la géométrie fractale pour une raison précise et bien comprise, existent dans les procédés de traitement d'images. Les notions de distributions multi fractales peuvent servir à quantifier la texture d'une image ou d'une partie d'image et aider au diagnostic sur des radiographies où l'on soupçonne l'existence de tumeurs.

3. La théorie des fractales

3.1. Origine de la théorie

A. Historique

De nombreuses notions mathématiques ont d'abord été considérées comme des « monstres mathématiques », avant d'être domestiquées, offrant alors de nouvelles perspectives et de nombreuses découvertes. Il en a été ainsi chez les pythagoriciens avec

l'apparition des nombres irrationnels, à la Renaissance avec celle des nombres négatifs et des nombres complexes, et au XIXème siècle avec l'exigence de rigueur de plus en plus poussée qui remet en cause beaucoup d'énoncés admis jusque là sans démonstration.

Les objets fractals, eux aussi, ont pendant longtemps été considérés comme des monstres, et le sont encore parfois aujourd'hui.

De 1875 à 1925, l'idée se répandit que les mathématiciens comme Cantor, Peano, Von Koch, Hausdorff étaient faiseurs d'objets pathologiques : ils créaient des objets que la nature ne connaissait pas, remettant en question la géométrie euclidienne et les notions de fonction et de dimension.

Un exemple de monstre est l'existence mathématique de courbes continues ayant de nombreux points sans dérivée. Ces monstres ne trouvèrent alors ni théorie ni application.

B. La côte de Grande-Bretagne

En 1961, Lewis Fry Richardson s'intéresse à la mesure empirique de la côte de Grande-Bretagne : comment mesurer, avec une bonne précision, la longueur d'une côte comme celle de la Grande-Bretagne ?

La méthode la plus approximative consiste à mesurer la distance entre les deux extrémités de la côte : cette approximation est sûrement inférieure à la distance réelle (qui tient compte de la complexité du relief).

Richardson comprend que la meilleure méthode semble être de définir un étalon, par exemple une barre de 1 m de longueur, et de parcourir la côte en reportant bout à bout la barre et d'en compter le nombre d'occurrences d'un point à l'autre entre lesquels on veut estimer la longueur de la côte. Si on utilise une barre 10 fois plus petite, elle pourra pénétrer plus précisément dans les recoins dessinés par la côte, la longueur mesurée sera alors plus précise, donc plus longue. Si l'on utilise une barre de 1 micron, on pourra alors contourner jusqu'aux moindres grains de sable et la mesure en sera d'autant plus précise. Ainsi, plus l'étalon utilisé est petit, plus la longueur mesurée est précise et longue, un segment infiniment petit donnerait une distance infiniment grande. Lewis Fry Richardson (1967) établit ainsi que la longueur d'une côte en fonction d'un étalon de longueur "n" est proportionnelle à n^α . La valeur de l'exposant " α " dépend de la côte choisie. Aux yeux de Richardson, α était sans signification particulière.

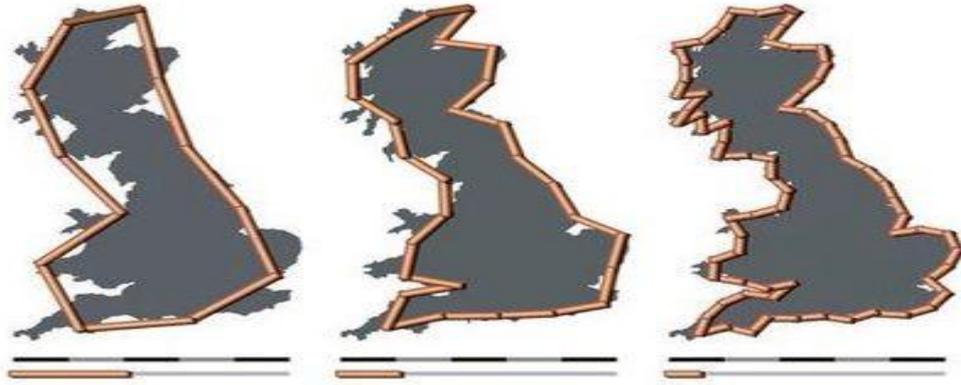


Fig. 1 Mesure de la dimension fractale de la côte de Grande-Bretagne
(B. Mandelbrot, les fractales et l'art de la rugosité, 1975)

Dans les années 1970, c'est Benoît Mandelbrot, mathématicien français, qui donna un sens à " α " en le définissant comme "D", la dimension fractale. Mandelbrot élaborait la théorie fractale expliquant les monstres mathématiques des siècles précédents et ouvrant de nombreuses perspectives et applications. Cette dimension "D" a permis entre autre de caractériser la complexité d'une côte ou de n'importe quel objet fractal, offrant un nouveau critère de comparaison plus pertinent que la longueur. La dimension fractale permettra de quantifier, de mesurer les formes, les géométries, mettant en valeur le caractère universel de ces formes.

La théorie trouva ensuite de nombreuses applications (et on trouvera probablement encore) en géologie, en biologie, en physique, mais aussi en design, photographie et cinématographie).

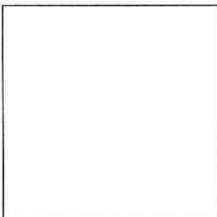
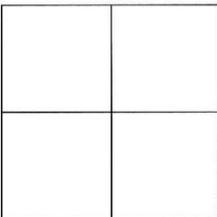
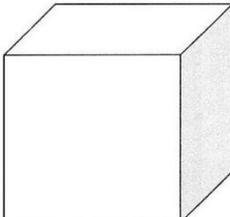
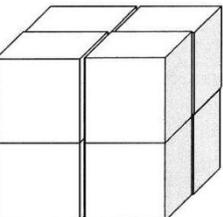
3.2. Calcul de la dimension fractale

Les figures géométriques usuelles ont une dimension entière :

1. La dimension "D" d'un segment, d'un cercle et d'une courbe régulière est de 1. Sa longueur est multipliée par 2 lorsque sa taille double.
2. La dimension "D" d'une surface simple et bornée est de 2. Elle a une aire finie et cette aire est multipliée par $4=2^2$ lorsque sa taille double.
3. La dimension "D" d'un volume simple et borné dans l'espace est de 3. Il a un volume fini et ce volume est multiplié par $8=2^3$ lorsque sa taille double.

Si D est la dimension d'un objet, alors la mesure de cet objet est multipliée par n^D lorsque la taille de cet objet est multipliée par n .

Pour comprendre ce calcul, nous allons étudier le cas d'une autosimilarité exacte :

Élément de géométrie euclidienne		Nombre de copies égales (N parts)	Relation générale $1 = N \cdot L^D$
1 D	0 l=1 	N=4 	Ligne = $4(1/4)$ <small>$2 = 2(1/2)$</small>
2D	S=1 	N=4 	Surface = $4(1/2)^2$
3D	V=1 	N=8 	Volume = $8(1/2)^3$

qui lui sont identiques à une dilatation d'échelle de facteur 3 près.

En divisant un objet en N copies égales à lui même, nous avons la relation générale suivante:

$$1 = N \cdot L^D \quad \text{où } L \text{ est la longueur d'une division et } D \text{ la dimension.}$$

Cette relation peut aussi s'écrire:

$$\text{Log } 1 = \text{log}(N \cdot L^D) \Leftrightarrow 0 = \text{Log } N + D \cdot \text{Log } L \Leftrightarrow \text{Log } N = -D \cdot \text{Log } L$$

$$\text{Soit:} \quad D = (\text{Log } N) / (\text{Log } 1/L)$$

Exemple de la courbe de Von Koch :

C'est l'exemple le plus classique et le plus historique. On l'obtient en remplaçant le tiers central d'un segment par un triangle équilatéral sans base, puis en répétant cette opération pour chacun des segments.

En répétant cette opération, on obtient une courbe fractale dont la dimension est fractionnaire : la courbe de Von Koch. Cette courbe peut être divisée en $N = 4$ sous courbes qui lui sont identiques à une dilatation d'échelle de facteur 3 près.

$$L=1$$

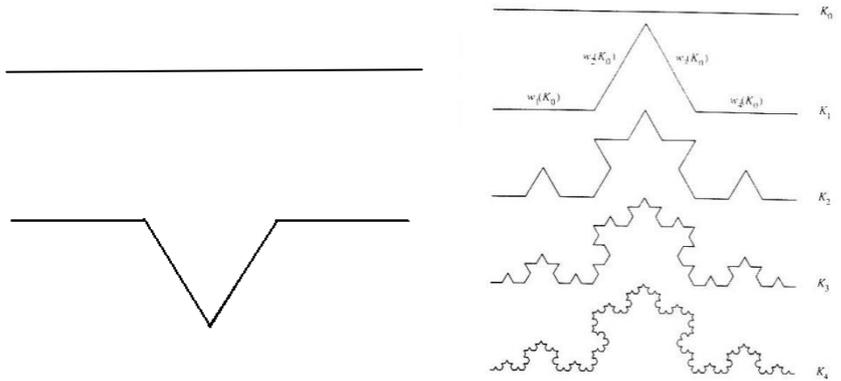
4 segments

de longueur $1/3$

$$D = (\text{Log } N) / (\text{Log } 1/L)$$

$$D = \text{Log } 4 / \text{Log } 3$$

$$D = 1.26$$



Remarque : si on remplace le point de départ de la courbe de Von Koch par un triangle équilatéral, et qu'on ajoute à tous ses côtés des protubérances triangulaires, de façon répétée jusqu'à l'infini, on obtient le célèbre flocon de neige de Von Koch.

Ainsi la théorie fractale est une généralisation de la notion de dimension de la géométrie euclidienne.

Les dimensions sont entières dans la géométrie euclidienne, tandis qu'elles seront irrationnelles pour les objets fractals. Donc en géométrie fractale, la dimension d'une série de points sur une ligne sera comprise entre 0 et 1, celle d'une courbe irrégulière et plane sera comprise entre 1 et 2, et celle d'une surface pleine de convolutions sera comprise entre 2 et 3.

Ainsi, une courbe de Peano, baptisée « courbe de remplissage du plan », n'est rien d'autre qu'une droite qui se plie et qui se déforme. Or, comme nous le savons, une droite n'a qu'une seule dimension, les mathématiciens considéraient comme évident qu'une courbe, quelle qu'en soit la complexité, devait être unidimensionnelle.

Cependant Peano avait tracé une courbe qui se tordait de manière tellement complexe qu'elle remplissait la totalité du plan, pour cette raison, on peut calculer que la dimension fractale d'une courbe de Peano peut être 2 !

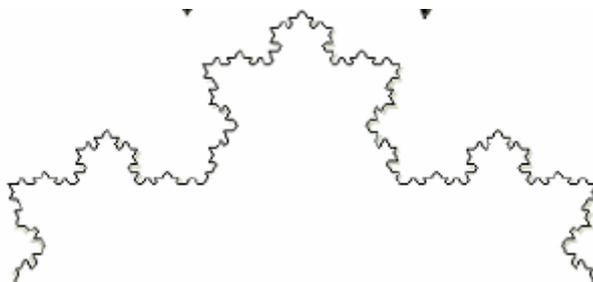


Fig.3 La courbe de Koch

3.2.1. La dimension de Hausdorff

Quand la fractale est formée de répliques d'elle-même en plus petit, sa dimension fractale D peut se calculer à l'aide de la dimension de Hausdorff, définie comme suit :

$$D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log \frac{1}{\epsilon}}$$

Où la fractale de départ est formée de $N(\epsilon)$ exemplaires de taille ϵ .

Prenons comme exemple la courbe de Koch, chacun de ses côtés est formé de 4 exemplaires de lui-même (N) réduit par un facteur $1/3$ (ϵ). Sa dimension fractale vaut donc :

$$D = \log(4)/\log(3) = 1.261859\dots$$

Cette définition reste en revanche très théorique, et dans la pratique, la plupart des surfaces et des objets dont nous voudrions calculer la dimension fractale ne seront pas forcément auto-similaires (composés de répliques d'eux-mêmes), c'est pourquoi il est nécessaire d'utiliser d'autres méthodes de calcul dans des situations pratiques.

3.2.2. La géométrie fractale appliquée aux états de surface

La géométrie euclidienne nous enseigne qu'un plan est de dimension 2 et qu'un volume est de dimension 3. Mais qu'en est-il d'une surface réelle mesurée sur un objet ? Une surface en aluminium poli est-elle de même dimension que celle d'une éponge ?



Fig. 4 Surface d'un CD (dimension = 2.17)

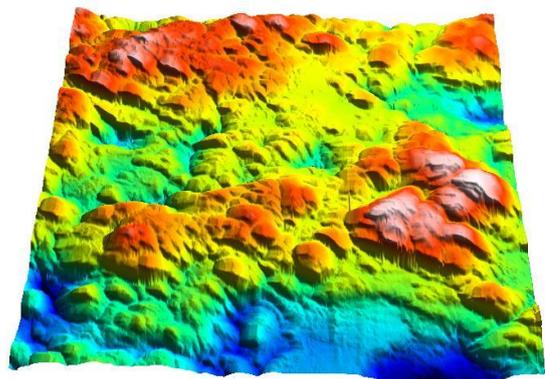


Fig. 5 Surface d'une pierre (dimension = 2.37)

La dimension fractale autorise l'utilisation de dimensions géométriques fractionnaires, par exemple dans le cas de surfaces réelles, de dimensions comprises entre 2 et 3. Une surface de dimension fractale 2,33 est donc moins complexe qu'une surface de dimension 2,65. Elle est «plus proche» d'un plan (2D) que d'un volume (3D). On peut remarquer dans les exemples suivants, que plus la dimension fractale d'une surface augmente, plus celle-ci nous apparaît « complexe »

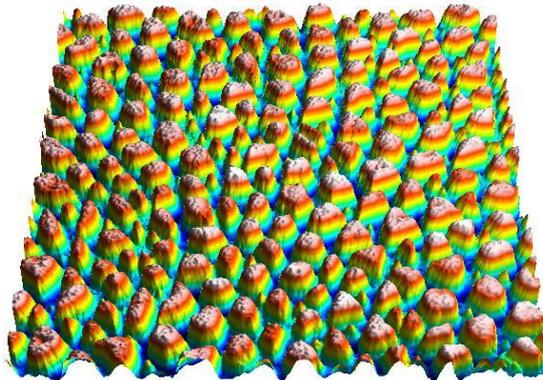


Fig.6 Surface similibuir (dimension = 2.76)

3.2.3. Méthodes de calcul de la dimension fractale d'une surface

Nous allons étudier deux méthodes de calculs de dimension fractale appliquées aux surfaces. Par soucis de simplicité, les exemples illustrant ces exemples seront donnés sur un profil (2D).

A. Méthode des boites englobantes

La méthode des boites englobantes est probablement l'une des méthodes de calcul de dimension fractal les plus simples à implémenter, mais également la moins précise. Cette dernière fonctionne comme suit :

- On recouvre la surface avec des cubes de taille fixe T .
- On compte le nombre de boites de taille T nécessaire pour recouvrir la surface.
- On recommence, avec des cubes de taille $t < T$.

La dimension fractale de la surface est ensuite calculée en traçant le graphe log-log du nombre de boites avec la taille des boites.

B. Méthode des enveloppes morphologiques

La méthode des enveloppes morphologiques est bien plus coûteuse en mémoire que la méthode des boîtes, mais est également plus performante. Elle fonctionne de la manière suivante :

- On extrait les profils d'une surface (coupes verticales ou horizontales de celle-ci) ;
- On réalise une ouverture morphologique sur ces profils (on recouvre la partie supérieure de la surface avec un élément structurant plat de taille donnée) ;
- On réalise ensuite une fermeture morphologique (on recouvre la partie inférieure de la surface avec le même élément structurant plat) ;
- On calcule l'aire comprise entre ces deux enveloppes pour chaque profil, donc pour la surface ;
- On recommence, en réduisant la taille de l'élément structurant plat.

On obtient ensuite la dimension fractale en calculant la pente du graphe log-log de l'aire incluse entre les deux enveloppes par rapport à la taille de l'élément structurant.

4. Les différents types de fractales

On peut distinguer plusieurs types de fractale

4.1. Fractales déterministes

On appelle fractale déterministe une fractale dont le mode de réplication ne fait pas intervenir de composante aléatoire

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.

4.2. Fractales non déterministes

Les objets fractals naturels sont dits "fractales non-déterministes", car le processus dynamique qui permet leur création varie lui-même avec le temps de façon aléatoire.

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.

5. Les objets fractals

On nomme fractale une courbe ou surface de forme irrégulière ou morcelée qui se crée en suivant des règles prédéterminées ou aléatoires. Cette notion à été rendue célèbre par le mathématicien français Benoit Mandelbrot dans les années 1970 :

“Un objet fractal est un objet qui présente des irrégularités à toutes les échelles”

Un objet fractal possède au moins l'une des caractéristiques suivantes :

- Il a des détails similaires à des échelles arbitrairement petites ou grandes (auto affine).
- Il est trop irrégulier pour être décrit efficacement en termes géométriques traditionnels.
- Il est exactement ou statistiquement auto similaire, c'est-à-dire que le tout est semblable à une de ses parties.
- Sa dimension de Hausdorff est plus grande que sa dimension topologique. De façon imagée, les fractales se caractérisent par une sorte de dimension non-entière.

Les objets fractals sont bien souvent assimilés comme des créations mathématiques réalisés par l'homme, mais on peut en rencontrer sous de nombreuses formes dans la nature.

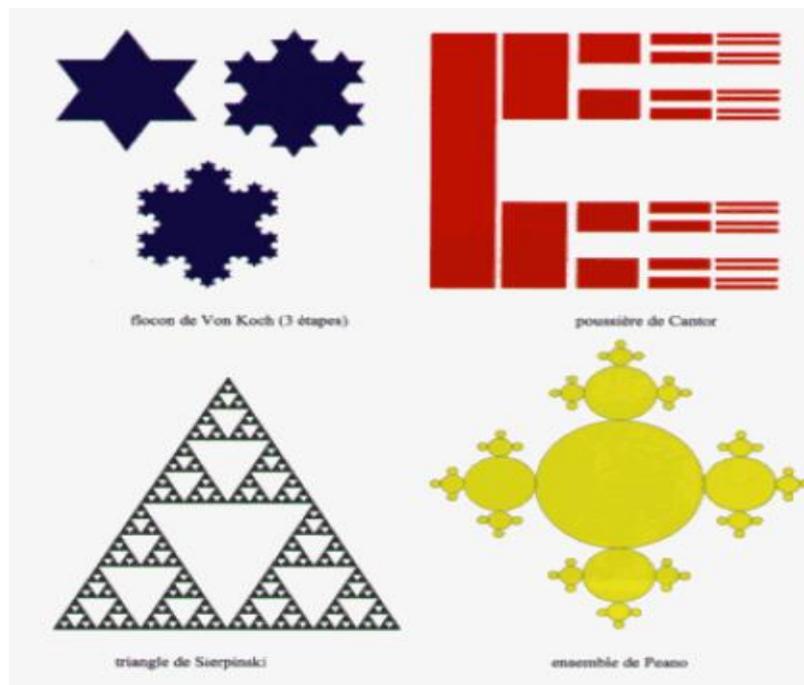


Fig.7 Les objets fractals.

SOURCE : http://membres.lycos.fr/les_fractales/frame.html
TPEFractalesAvril2003B
Lycée La Fontaine, Paris

5.1.Les fractales artificielles

On distingue plusieurs types de fractales, mais les plus connues sont classées comme suit:

5.1.1.Le flocon de neige de Von Koch

On part d'un triangle de périmètre $3a$ et on remplace sur chaque coté le tiers central par une protubérance triangulaire de coté $a/3$.

En répétant cette opération sur chacun des cotés constituant le bord de la génération n° obtenue, on obtient le célèbre flocon de neige de Von Koch dont on se propose de mesurer le périmètre.

Par construction, chaque segment a longueur 3 fois plus petite. Ainsi, le périmètre de la figure obtenue à l'issue de la 1^{ère} étape vaut $(4/3)*(3a)$. De même, celui de celle obtenue à l'issue de la 2^{ème} étape vaut $(4/3)^2 *(3a)$. Plus généralement, le contour de la figure obtenue à l'étape n est égal à $(4/3)^n *(3a)$. Par conséquent, en faisant tendre n vers l'infini, on déduit que le périmètre du flocon de Von Koch a une taille infinie. Cette courbe, qui ne débord jamais de la feuille, répond donc au problème soulevé précédemment. Par ailleurs, elle donne une bonne idée du caractère fractal d'une côte.

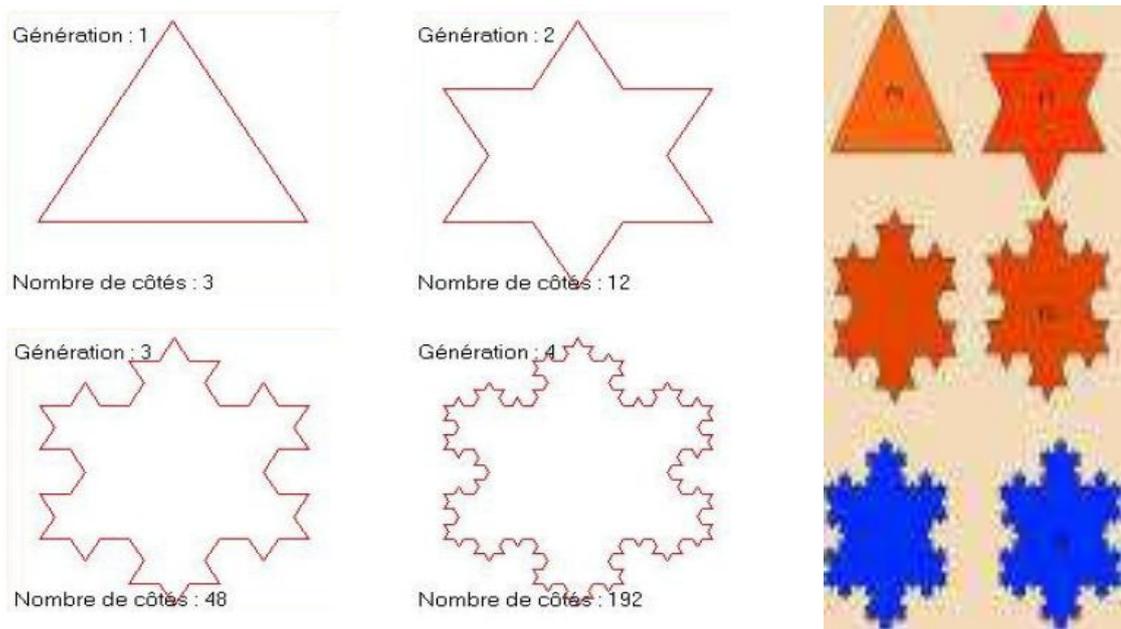


Fig.8.le flocon de neige de Von Koch

SOURCE : http://membres.lycos.fr/les_fractales/frame.html
TPEFractalesAvril2003B
Lycée La Fontaine, Paris

5.1.2. Le triangle de Sierpinsky

La construction est très simple à comprendre. On part d'un triangle équilatérale que l'on divise en 4 triangles équilatéraux. On enlève le triangle central et on effectue la même opération sur les triangles conservés. L'ensemble obtenu, connu sous le nom de triangle de Sierpinsky, a pour dimension fractale $\text{Log } 3 / \text{Log } 2$.

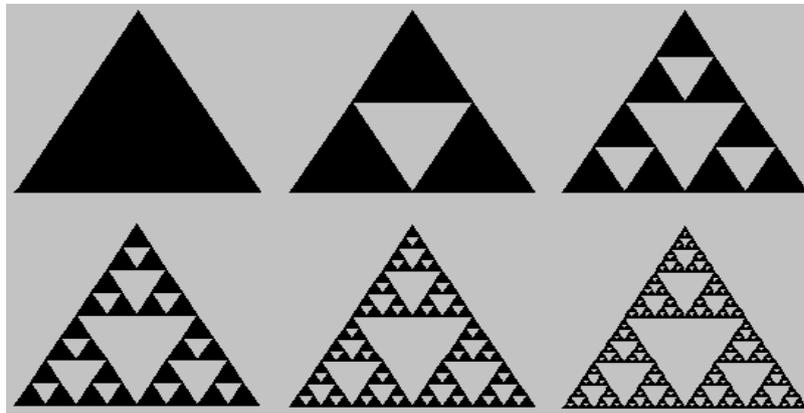


Fig.9.Le triangle de Sierpinsky

SOURCE : <http://membres.lycos.fr/les fractales/frame.html>

TPEFractalesAvril2003B
Lycée La Fontaine, Paris

5.1.3.Le tapis de Sierpinsky

A partir d'un carré initial rouge contenant un seul carré blanc, on construit à l'intérieur d'autres carrés blancs selon le procédé suivant: à chaque étape, on ajoute 8 carrés blancs autour de chaque carré que l'on vient d'ajouter

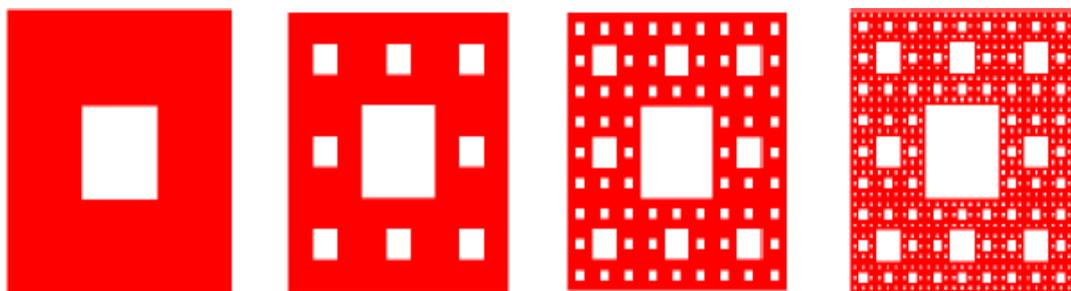


Fig.10.le tapis de Sierpinsky

SOURCE : <http://membres.lycos.fr/les fractales/frame.html>

TPEFractalesAvril2003B
Lycée La Fontaine, Paris

5.1.4. Eponge de Menger

On obtient l'éponge de Menger par itérations à partir d'un cube qu'on découpe en 27 cubes de cotés le tiers du premier, puis on enlève le petit cube central et les 6 cubes ayant une face commune avec lui, on recommence cette opération à l'infini sur chaque cube restant.

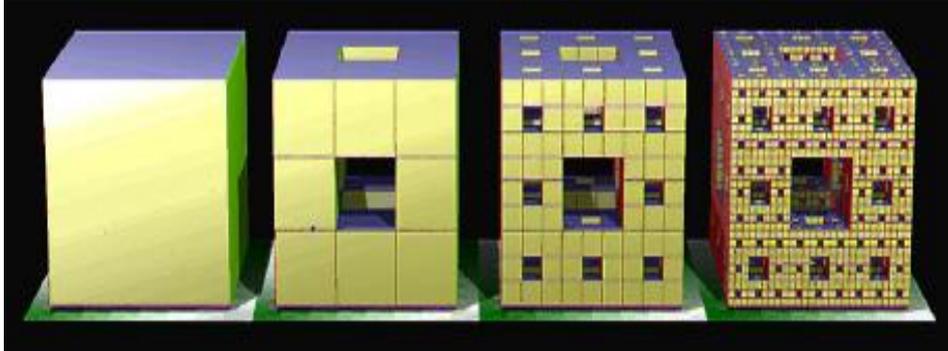


Fig.10.Eponge de Menger

SOURCE : <http://membres.lycos.fr/les fractales/frame.html>
 TPEFractalesAvril2003B
 Lycée La Fontaine, Paris

5.1.5. L'ensemble de Cantor

En mathématiques, l'**ensemble de Cantor** (ou **ensemble triadique de Cantor**, ou **poussière de Cantor**) est un sous-ensemble remarquable de la droite réelle construit par le mathématicien allemand George Cantor

On le construit de manière itérative à partir du segment initial en enlevant le tiers central ; puis on réitère l'opération sur les deux segments restants, et ainsi de suite. On peut voir les six premières itérations du procédé sur le schéma suivant :

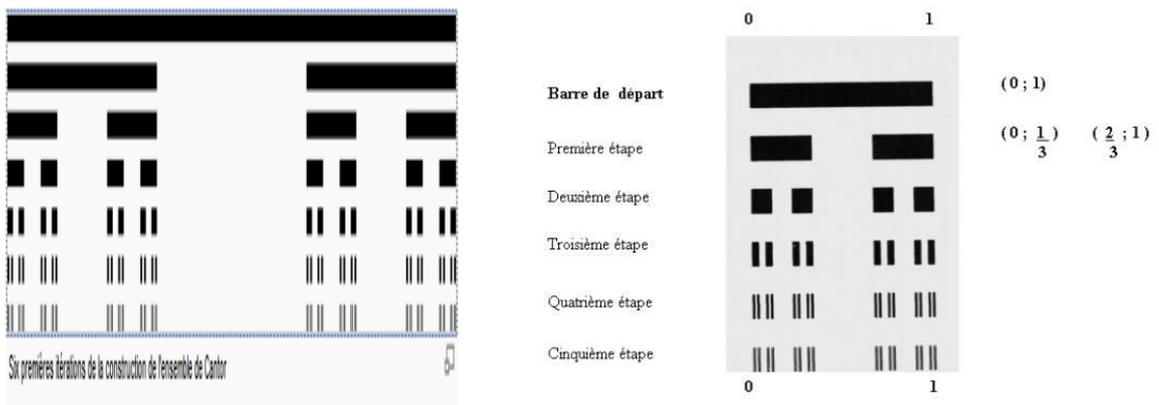


Fig.11.L'ensemble de Cantor

SOURCE : <http://membres.lycos.fr/les fractales/frame.html>
 TPEFractalesAvril2003B Lycée La Fontaine, Paris

5.1.6.L'ensemble de Mandelbrot

L'ensemble de Mandelbrot est à l'origine d'une très belle collection d'images connue sous le nom d'ensemble de Julia. On se rappelle que l'ensemble de Mandelbrot a été défini à partir de l'équation de récurrence :

$$z_{n+1} = z_n^2 + C \quad \text{En prenant } z_0 = 0 \text{ et en faisant varier la valeur de } C.$$

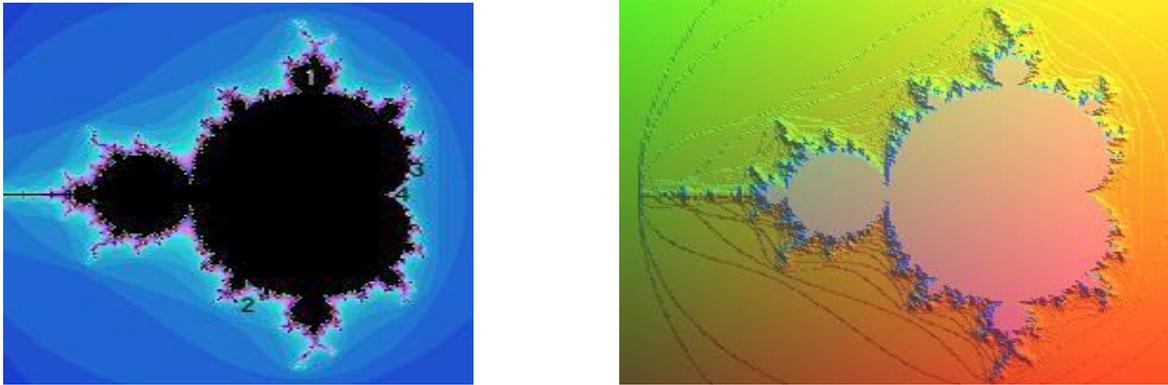


Fig.12.Images de l'ensemble de Mandelbrot

SOURCE : http://membres.lycos.fr/les_fractales/frame.html
TPEFractalesAvril2003B
Lycée La Fontaine, Paris

Le centre en noir (œuf de Mandelbrot) représente l'espace où la suite converge.les couleurs indiquent les courbes de niveau. C'est-à-dire la vitesse de divergence de la fonction.

5.1.7. L'ensemble de Julia

Pour obtenir un élément de l'ensemble de Julia, on procède à l'inverse. On fixe une valeur de C et on fait varier z_0 . D'abord on construit une grille, comme on l'a fait pour l'ensemble de Mandelbrot. On choisit un point sur cette grille (à l'intérieur ou à l'extérieur de l'ensemble de Mandelbrot). Ce point sera la valeur de C . On donne ensuite à z_0 chacune des valeurs de la grille. Pour chaque valeur associée à z_0 , on obtient une suite de nombres complexes. Si la suite des modules de ces nombres complexes ne tend pas vers l'infini ($|Z_n| < 2$ pour tout n),

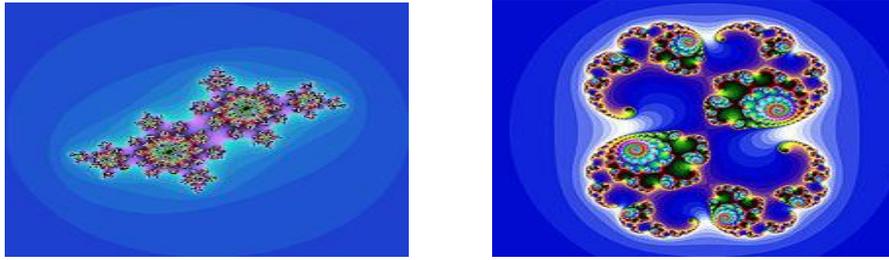


Fig.13. Images de l'ensemble de Julia

SOURCE : <http://membres.lycos.fr/les fractales/frame.html>
 TPEFractalesAvril2003B
 Lycée La Fontaine, Paris

5.2. Les fractales naturelles

A. Chez les végétaux

Nous avons déjà vu un certain nombre de formes fractales provenant du règne végétal. C'est le cas du chou-fleur, et des arbres. Mais il faut savoir qu'il existe un très grand nombre de formes fractales dans ce règne, comme par exemple les fougères, les formes des feuilles et leurs nervures, les développements racinaires, l'écorce des arbres, le chou romanesco...

Le chou romanesco et le chou-fleur

Le chou romanesco et le chou-fleur figurent parmi les plus belles formes de cette catégorie. A l'œil nu, ils ont la forme d'une section de sphère entourée de feuilles. Cependant si l'on regarde de plus près leurs surfaces, on peut noter que celles-ci sont constituées de cônes qui se juxtaposent de manière enroulée en spirales, formant ainsi des volutes qui constituent elles-mêmes des cônes similaires aux premiers, mais d'échelle plus grande.

Donc pour les deux, chacune des branches (ou sous branches agrandies plusieurs fois) peut être confondue avec le chou lui-même ou avec la branche principale d'origine.

Le chou-fleur et le chou romanesco présentent donc une auto similarité et peuvent être considérés comme fractals.

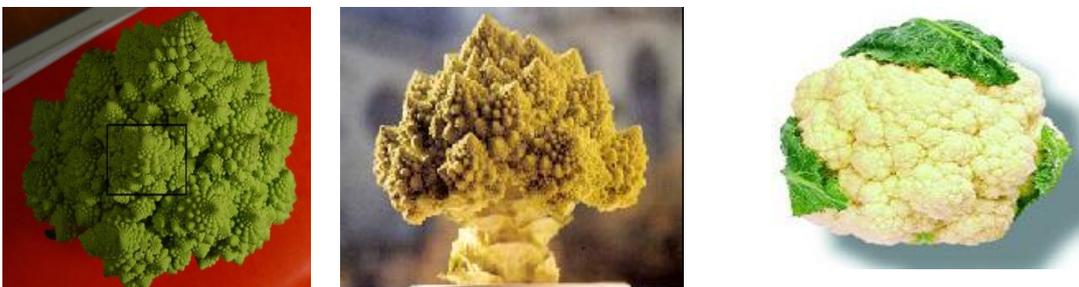


Fig.14. photo de chou romanesco et chou fleur tel que fractale naturelle

Source <http://les formes fractals dans la nature/les fractale/frame.html>

TPE les fractales. Paoli B ; Vauthier T ; Frappier L ; kende M

Les fougères

La fougère est un autre exemple de forme fractale. Ce sont en particulier les feuilles ou frondes de la plante qui présentent cette particularité d'auto similarité.

La dimension fractale des fougères est d'environ 1,7



Fig.15.le fougère (fractale naturelle)

B. Dans le corps humain

Dans le corps humain, on découvre régulièrement de nouvelles preuves montrant que notre organisme est fractal. Le premier organe identifié comme tel fut le système pulmonaire. Cette organisation permet principalement de pousser les capacités d'échanges à leur maximum en intégrant une surface la plus grande possible dans un volume faible.

Les poumons

Les ramifications sanguines pulmonaires présentent une organisation arborescente.

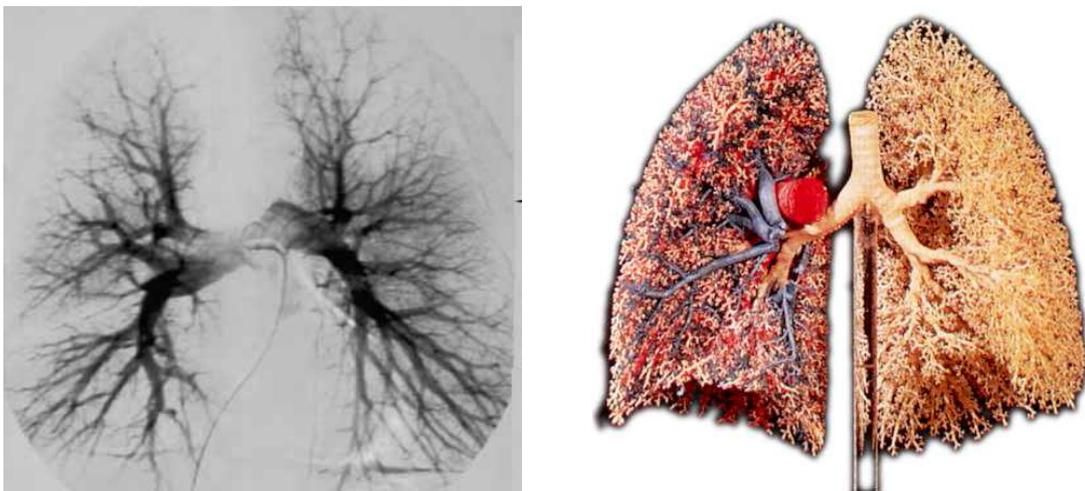


Fig.16. Ramifications sanguines pulmonaire.

Source <http://les formes fractals dans la nature/les fractale/frame.html>

TPE les fractales. Paoli B ; Vauthier T ; Frappier L ; kende M

Conclusion

Ici encore, on trouve dans ces objets naturels des caractéristiques fractales. Pourtant, il ne s'agit pas de fractales au sens du terme car celles ci sont finies. On peut néanmoins dire qu'il s'agit de fractales biologiques.

6. Les méthodes appliquées pour le calcul de la dimension fractale en génie civil

Le calcul de la dimension fractale est l'une des caractéristiques principale de la géométrie fractale, elle a été utilisée entre autres dans le domaine de génie civil. Elle décrit l'irrégularité d'un grain d'un milieu granulaire.

Le calcul de la dimension fractale consiste à déterminer le périmètre et la surface des grains. Et pour cela des techniques d'analyse d'image sont utilisées après l'utilisation d'un microscope pour photographier les grains.

Cette technique consiste à réaliser un seuillage de l'image grise, à un niveau raisonnable pour extraire la surface du grain à partir du fond. Une image binaire est ainsi obtenue pour calculer cette surface du grain. Puis, en appliquant un certain nombre d'opération comprenant l'ouverture, la fermeture, et remplissage en blancs, l'image binaire est obtenue comme une couche au-dessus de l'image grise qu'elle utilise pour calculer la surface du grain.



Fig.17.1. Exemple d'un grain de sable

Photographie d'une surface

de 31.06 mm^2

2. L'image binaire obtenue après

l'analyse d'image

Les principales méthodes sont :

6.1. 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 :

$$c = \frac{P^{1/D_R}}{A^{0.5}} \quad (1)$$

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, et le D est la dimension fractale moyenne de la rugosité des grains. Prenant le logarithme de l'équation (1), on peut obtenir l'expression suivante :

$$\frac{1}{D_R} \log P = \log(c\sqrt{A}) \quad (2)$$

Faire certains arrangements nécessaires :

$$\log P = \frac{D_R}{2} (\log c^2 + \log A) \quad (3)$$

Finalement, on obtient l'équation suivante :

$$\log P = k + \frac{D_R}{2} (\log A) \quad (4)$$

Dans l'équation (4), 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.

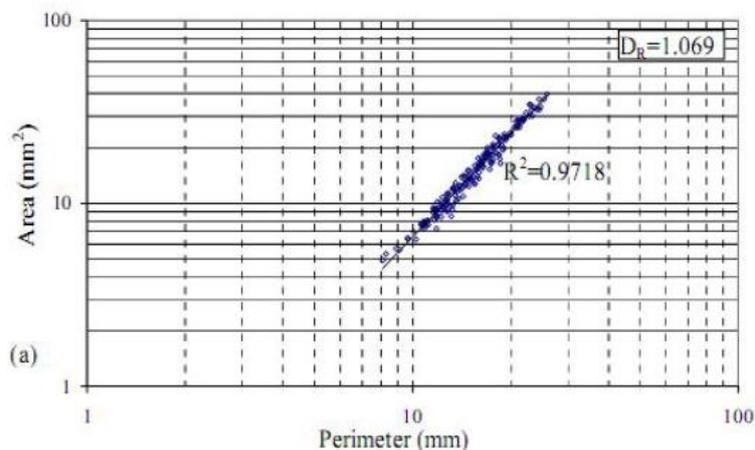


Fig.18. Application de la méthode d'area-perimeter d'un grain de sable d'origine d'une pierre calcaire.

6.2. Line divider

D'après Mandelbrot, des lignes d'une taille unique (a) ou « yard sticks » peuvent être utilisées pour former un polygone à l'intérieur des frontières d'un grain ; ainsi, le périmètre de ce polygone peut être décrite comme suit :

$$P(l) = nl^{1-D_r} \quad (5)$$

Dans cette équation, $p(l)$ est la longueur, et le D_r est la dimension fractale recherchée du grain, traçons la longueur de polygone en fonction de la taille de mesure, la dimension fractale est liée avec la pente m , de la meilleure ligne obtenue en utilisant les données de l'équation (5) et elle peut être calculée comme suit:

$$D_r = 1 - m \quad (6)$$

La ligne méthode de line divider est capable de déterminer la rugosité du grain. La taille maximum de mesure ne devrait pas dépasser 0,3 fois de diamètre de grain maximum.

Exemple d'application de cette méthode, considérant un grain de la figure (19), des polygones de différentes tailles de mesure sont formées à l'intérieur du grain. Le périmètre du grain est ainsi tracé en fonction de la taille de mesure.

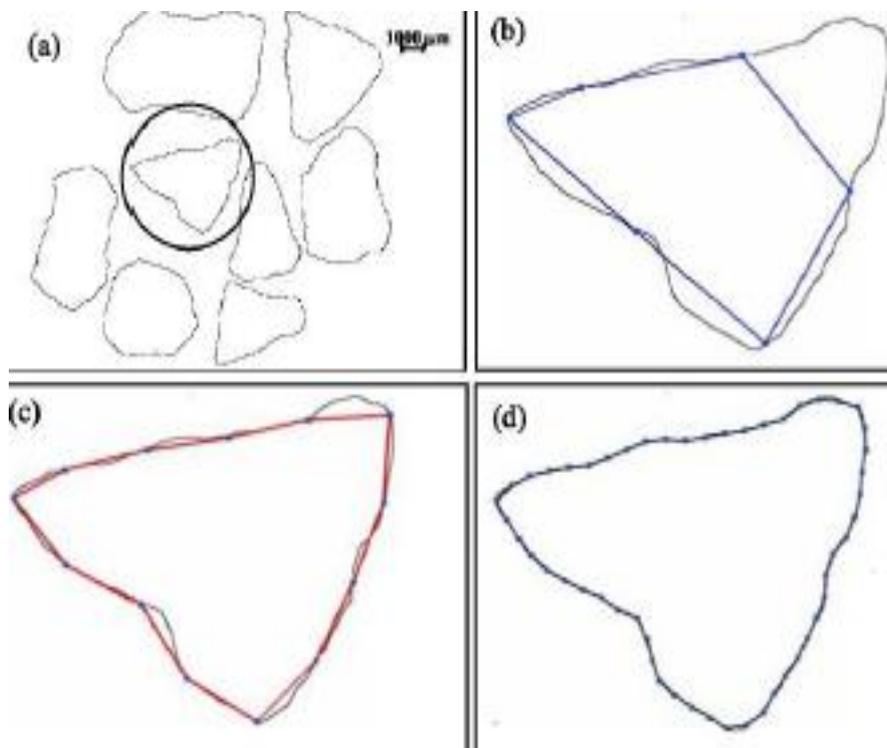


Fig.19 (a) le grain de sable après l'analyse de l'image.

(b) (c) et (d) les forme polygones des grains avec différents taille de mesure.

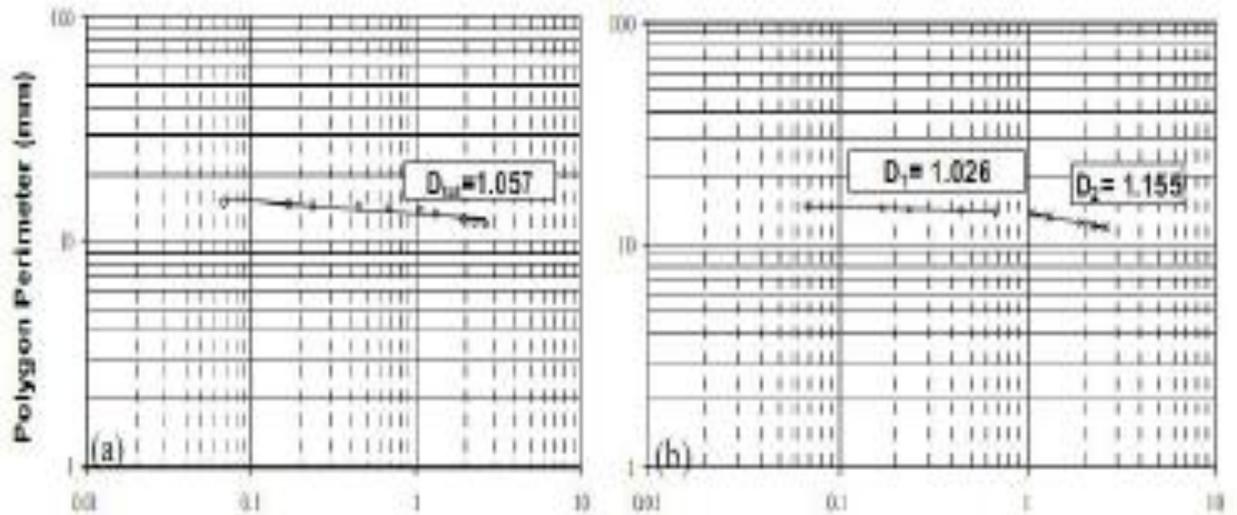


Fig.20.calcul de la dimension fractale totale (b) texturale (d1) et structurale (d2).

6.1.3. Méthode des lignes parallèles

La mesure de la rugosité par la méthode des lignes parallèles, ressemble à la méthode précédente.

1. Traçant des lignes parallèles.
2. Employant une unité de longueur de la mesure en fonction de toute la longueur du périmètre des grains.

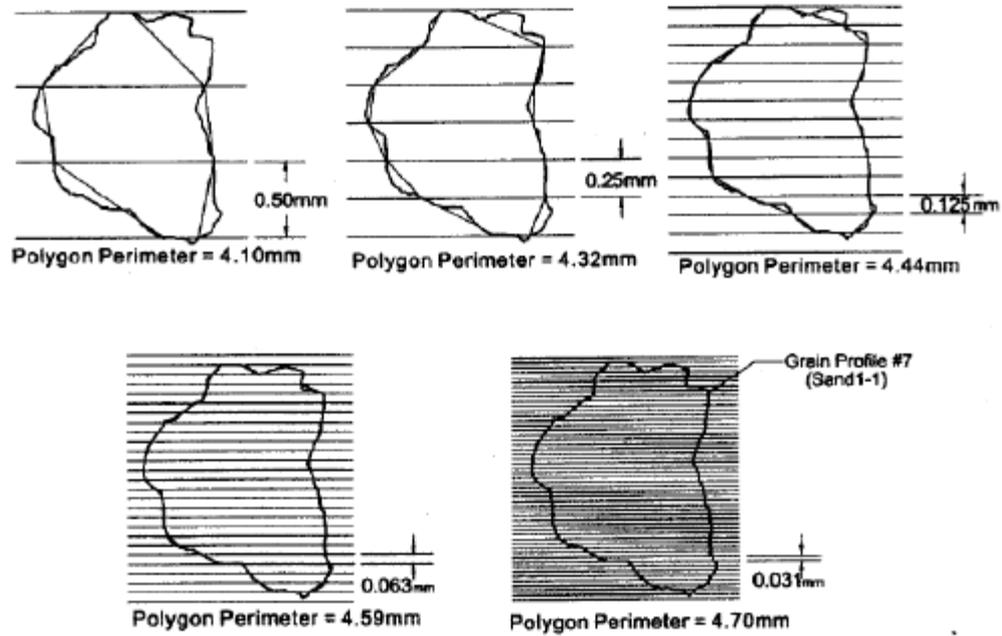


Fig.21. Méthode des lignes parallèles

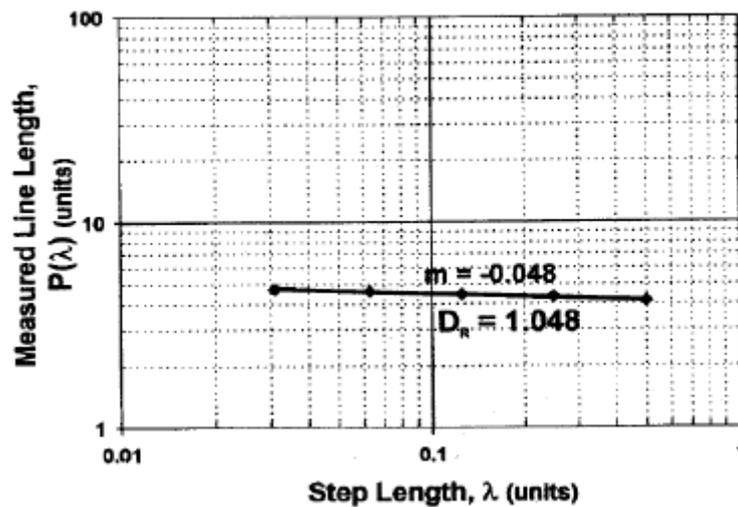


Fig.22.calcul de la dimension fractale avec la méthode des lignes parallèles

6.4.Méthode de Box counting :(comptage des boites)

C'est une méthode très intéressante pour de nombreuses structures fractales. C'est la méthode la plus utilisée dans le cas de la fragmentation, et cette valeur nous donne une idée sur la distribution dimensionnelle des grains et sur le procédé de fragmentation.

La distribution de fragments de la roche est une distribution fractale (Mandelbrot 2004) et la fragmentation fractale pourrait être mesurée en développant la dimension fractale de l'équation (7).

$$N(X > x) = Kx^{-D_f} \quad (7)$$

x : la dimension particulière prédéterminée.

X : la dimension linéaire des grains plus grande que la dimension x .

N : le nombre des grains.

K : constante de proportionnalité.

D_f : la dimension fractale de fragmentation.

En utilisant l'équation (7), on aboutit à l'équation suivante :

$$D_f = -m \quad (8)$$

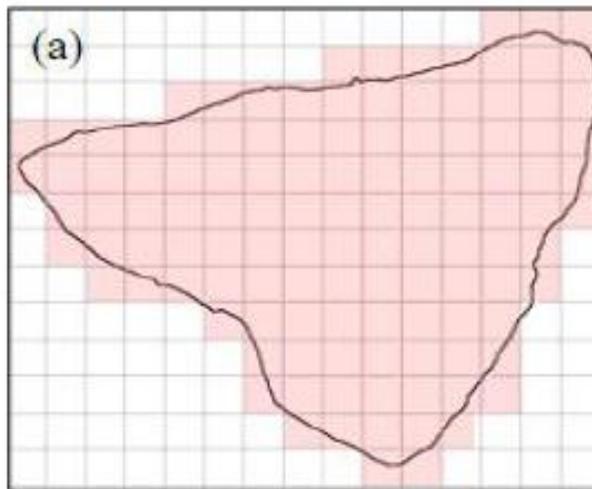


Fig.23. Application de la dimension fractale de fragmentation par Box Counting.

La dimension fractale sera calculée pour chaque grain dont il s'agit de calculer la pente dans un graphique logarithmique.

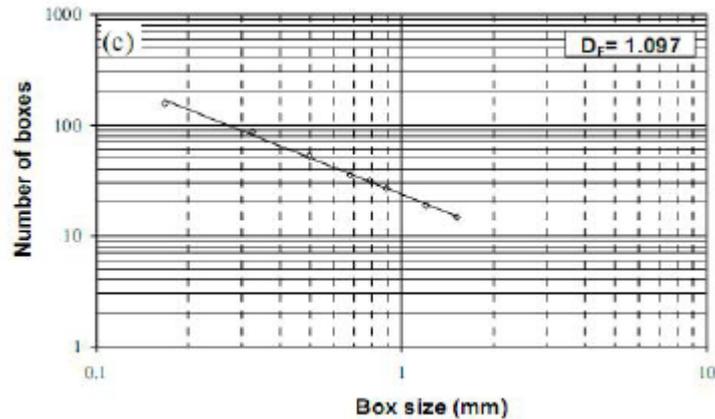


Fig.24.Droite de la dimension fractale par Box Counting

6.5. Méthodes des masses

La définition classique de la dimension fractale des masses est déduite de la masse de l'agrégat M , et de sa taille L

Cette méthode est basée sur la distribution des grandeurs des grains de l'échantillon, après avoir choisie une granulométrie bien définie d'un échantillon de matériau

Tyler et Wheatcraft (1992) ont développé une formule en utilisant l'analyse granulométrique pour le calcul de la dimension Fractale de fragmentation DF_R . Cette méthode de calcul emploie la masse retenue en passoire et son diamètre correspondant. Cette équation est définie comme suite

$$\frac{M(R < r)}{M_T} = \left(\frac{r}{r_L} \right)^{3 DF_R}$$

$M(R < r)$: masse cumulative des particules avec la taille R plus petite qu'un comparatif donné de classe r ;

M_T : masse totale des particules ;

r : taille de l'ouverture des passoires;

r_L : dimension des particules maximale définie par la plus grande ouverture de la taille des passoires

DF_R : dimension fractale de fragmentation.

La dimension fractale est calculée en utilisant l'équation suivante :

$$DF_R = 3 - m$$

Avec m la pente de la droite la mieux adaptée appliquée à l'équation

7. Modélisation de la structure du sol par les fractales vue par plusieurs chercheurs

Mandelbrot, 1982, Turcott, 1986, 1989 : la relation entre le nombre et la taille des éléments d'un objet fractal fragmentaire et une conséquence directe de la propriété d'homothéties interne, elle peut être considérée suffisante pour caractériser une distribution fractale.

Mandelbrot 1983, Turcotte 1986, Feder 1988 : le sol est à la fois un milieu fragmentaire et un milieu poreux, une représentation fractale de sa structure pourrait lui être particulièrement appropriée.

Katz et Thompson (1985), la dimension fractale de l'interface serait égale à celle du volume poral, D'après **Rieu et Sposito (1991b)**, la dimension fractale du volume poral serait égale à celle de la distribution en nombre d'agrégats, Par exemple, **Wu et al (1993)**, présentent un tableau récapitulatif de dimensions fractales publiées, dont nous remarquons qu'elles proviennent de théories très diverses, et soulignent simplement la nécessité d'améliorer la qualité des mesures afin d'estimer précisément la dimension fractale d'un sol.

8. Conclusion

En guise de conclusion sur la géométrie fractale, nous pouvons dire que c'est seulement depuis la parution des travaux de Benoît Mandelbrot que nous commençons à bien percevoir la notion de fractalité. En effet ses travaux ont permis entre autres, de rationaliser des formes qui nous semblaient avant cela irrationnelles.

La géométrie fractale a été développée pour décrire et quantifier des objets mathématiques, comme les ensembles de Cantor, la courbe de Koch ou triangle de Sierpinski.

Le sol est considéré comme étant un milieu à la fois fragmentaire et poreux. Cette notion de modèle fractal met en jeu la définition d'un domaine d'échelle dans lequel une structure fractale est développée, ainsi que de la fragmentation incomplète d'un élément de sol en classes de fractures semblables et un volume résiduel. Les principales prédictions de ce modèle sont illustrées par des données déjà publiées sur des sols de texture différente.

Dans le génie civil, les fractales sont utilisées pour la construction de certains murs absorbeurs de son, pour modéliser la structure poreuse du sol et décrire les fissures dans les roches.

CHAPITRE II

CHAPITRE II

GENERALITES SUR LES ESSAIS ROUTIERS

1. Introduction

Une bonne reconnaissance du sol d'un ouvrage est indispensable pour réaliser une structure rationnelle et économique. Il est recommandé d'effectuer une reconnaissance suffisante du sol par des essais de laboratoire et in-situ. La mécanique des sols permet à partir de ces essais d'obtenir les caractéristiques physiques et mécaniques d'un terrain donné.

Pour une bonne réalisation des routes, les différents essais routiers seront réalisés. Les granulats choisis doivent suivre les étapes suivantes qui sont résumées comme suit :

- Identification
- Réception
- Fabrication
- Mise en œuvre

2. IDENTIFICATION DES SOLS

L'identification des sols pour les routes consiste à identifier les matériaux de déblai ou d'emprunt ainsi que les matériaux d'utilisation en plate forme.

A/ Mesure de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse (Valeur de bleu de méthylène)

La valeur de bleu de méthylène d'un sol (VBS) mesure la capacité d'adsorption du sol et elle est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol. A la prise d'essai agitée dans de l'eau, on injecte successivement des doses de 5 ml d'une solution de bleu de méthylène. Après chaque injection, une goutte est prélevée et déposée sur un papier filtre. Le test devient positif lorsque l'auréole, d'abord incolore, demeure bleue clair pendant 5 minutes. La valeur de bleu est la quantité de solution injectée rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0/50 mm du sol.

Le matériel utilisé est : Agitateur électrique à ailettes, Etuve, Burette graduée, Chronomètre, Balance 3 kg, Papier filtre, Solution Bleu de méthylène

B / Indice CBR après immersion - Indice CBR immédiat

Le principe général de l'essai consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette de matériau. Les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué deux enfoncements conventionnels sont respectivement rapportés aux valeurs des forces observées sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements. L'indice CBR (Californian Bearing Ratio) est défini conventionnellement comme étant la plus grande valeur, exprimée en pourcentage, des deux rapports ainsi calculés. Les valeurs des paramètres (section du poinçon, vitesse d'enfoncement, enfoncement conventionnel, forces observées sur le matériau) sont normalisées. L'indice CBR est mesuré immédiatement après confection de l'éprouvette conventionnellement à la teneur en eau Proctor et à une compacité de 95% de l'optimum Proctor (I_{CBR} immédiat) puis après 4 jours d'immersion dans l'eau (I_{CBR} après immersion)

On mesure également le gonflement du sol dans le moule CBR pendant les 4 jours d'immersion à l'aide d'un comparateur placé sur un socle sur le moule.

Le matériel utilisé est : Etuve, Balance 35 kg, Balance 400g, Dame Proctor, Moule CBR complet avec surcharge, plateau de gonflement, comparateur, Bac d'immersion, Presse CBR, Anneau dyn. 30 kN, Anneau dyn. 60 kN, Cadence mètre (si presse manuelle).

C/ Détermination des caractéristiques de compactage d'un sol (Essais PROCTOR normal et modifié)

Il consiste à déterminer pour des teneurs en eau croissantes w les masses volumiques apparentes sèches obtenues en compactant chaque fois le matériau dans les mêmes conditions. L'essai Proctor Normal et l'essai Proctor Modifié diffèrent par l'énergie de compactage mise en œuvre. Le compactage de l'échantillon qui ne doit pas contenir d'éléments supérieurs à 20 mm se fait par couches d'épaisseur déterminée sous un nombre donné de coups d'une dame de caractéristiques normalisées. Les résultats se présentent sous la forme d'une courbe dont en abscisse : la teneur en eau et en ordonnée : le poids volumique sec. Cette courbe a un maximum dit "Optimum Proctor" normal ou modifié selon la nature de l'essai. Ce maximum définit la teneur en eau et le poids volumique max.

Le matériel utilisé est : Etuve, Balance 30 kg, Balance 400 gr, Moule Proctor normal, Moule CBR, Dame Proctor, Bac de malaxage.



D/ Essai de Gonflement libre - Méthode d'Essai Interne

10 Kg de sol tamisé à 0.4 mm sont versés dans une éprouvette graduée. On remplit d'eau l'éprouvette et on mesure la variation de hauteur du sol imbibé. Le gonflement libre FS est le rapport entre la variation de volume et le volume initial.

Le matériel utilisé est : Tamis 0.4 mm, Eprouvette graduée, Eau

Ces essais sont faits pour identifier le sol d'une route, il y a d'autres essais qui s'effectuent sur le sol destiné à étudier la stabilité de talus, d'évaluation de sol compressible ou gonflant. On les définit ci-dessous :

a) Essai de cisaillement rectiligne à la boîte

Cet essai détermine les paramètres de résistance au cisaillement (cohésion et l'angle de frottement) d'un matériau utile pour les études de stabilité de terrain (talus, fondation profonde). L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une boîte de cisaillement constituée de deux demi boîtes indépendantes. Le plan de séparation des deux demi boîtes constitue un plan de glissement correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette. Il consiste à appliquer sur la face supérieure de l'éprouvette un effort vertical maintenu constant et à produire sous l'effort un cisaillement selon le plan horizontal de glissement en leur imposant un déplacement relatif. L'expérience est renouvelée plusieurs fois avec des valeurs diverses de pression et on détermine alors la courbe intrinsèque caractéristique de l'échantillon

Le matériel utilisé : Machine de cisaillement, Boîte de casa grande, Série de poids, Trousse coupante, Comparateur Anneau dyn.



b) Essai de compressibilité à l'oedomètre

L'échantillon de sol est placé dans une boîte cylindrique rigide de section circulaire entre deux pierres poreuses assurant son drainage. Un piston permet d'appliquer sur l'échantillon une contrainte verticale uniforme constante pendant un temps déterminé. On mesure alors la variation de hauteur de l'éprouvette de sol en fonction de la contrainte appliquée.

On recommence le processus à différents paliers de chargement de 24 h. A partir de cet essai, on peut établir des courbes de compressibilité (indice des vides en fonction de la contrainte) et



de consolidation (variation relative de tassement en fonction du logarithme du temps) utiles pour évaluer l'amplitude des tassements et les durées de consolidation des sols.

Le matériel utilisé est : Balance 3 kg, Etuve, Oedomètre, Cellule de perméabilité, Série de poids, Comparateur.

c) Essai de gonflement à l'oedomètre

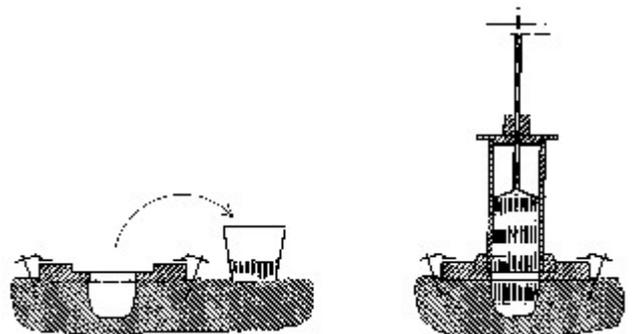
L'essai permet de déterminer la pression de gonflement d'un matériau ainsi que sa déformation lorsqu'il est soumis, en présence d'eau, à des contraintes verticales inférieures à cette pression de gonflement. Il est utilisé pour apprécier le comportement d'ouvrages pouvant être affectés par la présence de matériaux gonflants.

3. MISE EN OEUVRE DES TERRASSEMENTS : DEBLAI / REMBLAI / COUCHE FONDATION

A/ Mesure de la masse volumique des matériaux d'assises en place – méthode au densitomètre à membrane

L'essai consiste à creuser une cavité, à recueillir et peser la totalité du matériau extrait, puis à mesurer le volume de la cavité à l'aide d'un densitomètre à membrane. L'appareil est doté d'un piston qui, sous l'action de l'opérateur, refoule un volume d'eau dans une membrane souple étanche qui épouse la forme de la cavité. Une tige graduée permet de lire directement le volume. Le matériau de la cavité est séché afin de déterminer son poids sec. Cet essai ne s'applique pas lorsque le volume de la cavité de mesure peut varier durant l'essai (sable lâche, argile très humide, ...). Cet essai est plus particulièrement destiné aux matériaux dont D_{max} est inférieur à 50 mm.

Le matériel utilisé est : Densitomètre à membrane, Membrane, Balance 3 kg sur batterie, Réchaud à gaz.



B/ Mesure de la masse volumique des matériaux d'assises en place – mesure par gamma densimètre en transmission directe

L'essai a pour but de déterminer la masse volumique moyenne des matériaux situés entre la partie supérieure libre d'une couche et une cote donnée (Z) à l'aide d'un gamma densimètre. La mesure est fondée sur l'absorption par le matériau des photons gamma d'énergie donnée, émis par une source enfoncée à la profondeur Z dans la couche soumise à l'essai. Le nombre C de photons gamma traverse le matériau par unité de temps et il est directement lié à la compacité et la teneur en eau du matériau. Le gamma densimètre est calibré avant chaque utilisation sur un bloc de référence de travail dont la masse volumique est connue. Cet appareil est soumis à une réglementation stricte de matière de protection radionucléaire et seuls les opérateurs autorisés portant un dosimètre sont habilités à l'utiliser. Il peut être utilisé sur les matériaux hydrauliques (terrassement, grave ciment, grave non traité) ou hydrocarbonés (enrobé si épaisseur supérieure à 5 cm).

Pour cet essai, on utilise le Gamma densimètre.

C/ Portance des plates-formes - Module sous chargement statique à la plaque

Après repérage du point d'auscultation de la plate-forme, il est appliqué, par l'intermédiaire d'une plaque de diamètre 60 cm, deux cycles de chargement successifs conduits selon des modalités également normalisées. Le chargement est maintenu pour les deux cycles jusqu'à constatation de la stabilisation de l'enfoncement de la plaque. La valeur de l'enfoncement de la plaque mesurée à la fin du second cycle permet de calculer le «Module sous chargement statique à la plaque EV2». L'essai s'applique aux plates-formes d'ouvrages de terrassement et d'assainissement dont le D max est inférieur à 200 mm et la valeur maximale du module pouvant être mesurée par cet essai est de 250 MPa. Le «Module sous chargement statique à la plaque» ne caractérise pas l'état de compacité des sols situés sous la plate-forme auscultée.

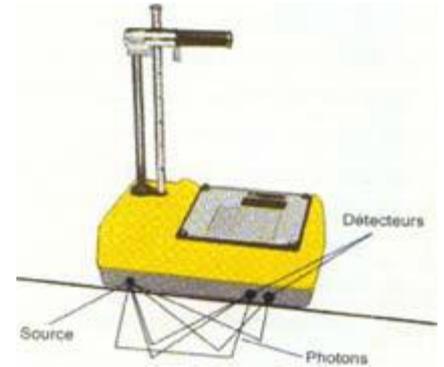
Le matériel utilisé est : Camion chargé à plus de 10 Tonnes, Plaque, Dispositif hydraulique de chargement avec manomètre, Poutre Benkelman, Comparateur.



D/ Portance des plates-formes - Module de Westergaard - Méthode d'Essai Interne Inspirée Méthode LCPC

L'essai consiste à charger une plaque de 60 cm de diamètre de façon à obtenir une pression de 0.7 kg/cm² et de mesurer l'enfoncement à l'aide d'une poutre de Benkelman. Le module de Westergaard est le rapport entre la pression et l'enfoncement. Il est utilisé pour évaluer la portance des sols supports pour les bâtiments.

Le matériel utilisé est : Camion, Plaque, Dispositif hydraulique de chargement avec manomètre, Poutre Benkelman, Comparateur.



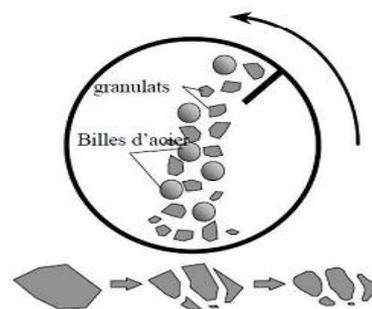
4. IDENTIFICATION DES GRANULATS

L'identification des granulats permet la fabrication des graves non traitées par les essais suivants :

A/ Essai de Los Angeles (de résistance à la fragmentation par chocs)(P18-573)

Lavée, séchée et pesée, la prise d'essai (5000 g) est placée dans le tambour de la machine avec une charge de boulets appropriés à la granularité choisie. Entraînés durant 500 tours (15 mn) par la tablette en acier, les boulets retombent avec le matériau qu'ils fragmentent. Ce dernier est ensuite lavé sur un tamis à 1.6 mm, séché et pesé. Le coefficient Los Angeles est le rapport entre la masse du refus et la masse initiale.

Le matériel utilisé est : Machine Los Angeles, Boulets, Etuve, Balance 15 kg, Tamis 1.6 mm



B/ Essai d'usure Micro Deval (de résistance à l'usure)(P18-572)

Lavée, séchée et pesée, la prise d'essai (500 g) est introduite dans un cylindre avec une charge de billes d'acier variable selon la granularité et 2.5 litres d'eau. Après 12 000 rotations (2h), le

matériau est lavé sur un tamis de 1.6 mm, séché et pesé. Le coefficient Micro Deval est le rapport en % entre la masse finale de refus et la masse initiale

Le matériel utilisé est : Machine Micro

Deval, Billes d'acier, Etuve, Balance 15 kg, Tamis
1.6 mm



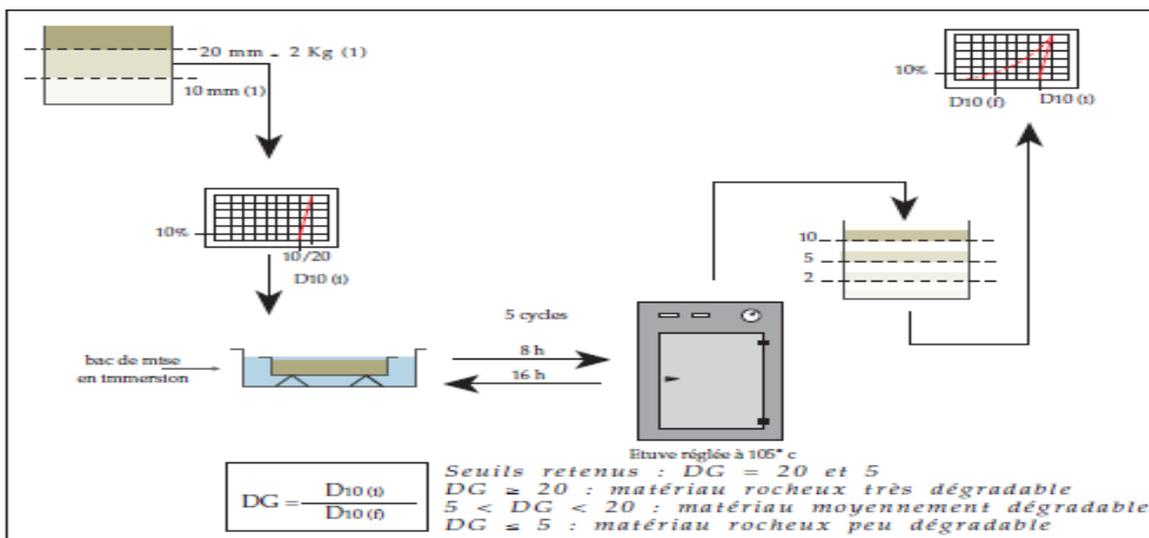
C/ Essai de dégradabilité (P94-067)

Objectif de l'essai : Il permet d'apprécier la résistance des granulats sous l'effet des cycles climatiques (mouillage- séchage).

L'essai s'effectue sur 2 Kg de la fraction granulaire 10/20 du matériau. Après avoir dressé une courbe granulométrique, l'échantillon est soumis à 5 cycles de 8 heures de séchage et de 16 heures d'immersion.

L'échantillon obtenu sera de nouveau soumis à une analyse granulométrique

Le matériel utilisé est : Une série de tamis normalisés, Un bac de mise en immersion, Une étuve réglée à 105° C.



D/Essai de fragmentabilité(P94-066)

Objectif de l'essai : il permet d'apprécier et de mesurer la sensibilité d'un matériau rocheux à se fragmenter sous la sollicitation des engins de terrassement.

Le matériel utilisé est : Une série de tamis normalisés, un moule CBR, une dame P M.

L'essai s'effectue sur 2 Kg de la fraction granulaire 10/20 du matériau. L'ensemble moule et prise d'essai est ensuite placé sur le massif de réaction utilisé pour l'exécution des essais Proctor et on applique à la surface de l'échantillon 100 coups de dame Proctor Modifié distribués conformément au mode de compactage décrit pour le compactage d'une seule couche dans l'essai Proctor.



E/Essai de friabilité (P18-576)

La friabilité est mesurée sur la fraction 0,2 - 2 mm ou 0,2 - 4 mm, cet essai est voisin du micro Deval.

Objectif de l'essai : Evaluer l'évolution des matériaux sableux sous l'effet du trafic de chantier (apprécier la résistance à la fragmentation des sables).

Domaine d'application : La friabilité est un critère d'identification retenu par le GTR pour préciser le classement des sables pour un emploi en couche de forme.

Description de l'essai : 500 g de matériau d'une fraction granulaire 0/1 ou 0/2 sont mis avec des billes métalliques de différents diamètres (de 9 ; 5 ; 19 et 35 mm) en présence d'eau (2.5 L), dans un cylindre horizontal en rotation autour de son axe (500 rotations et une vitesse de 30 T/min).



D/ Mesure des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des gravillons et cailloux

Lavé sur un tamis de 4 mm puis séché, le gravillon refroidi est immergé dans l'eau à 20°C pendant 24h puis épongé et pesé dans l'air avant de l'être dans l'eau. Pour la teneur en eau, le gravillon humide est séché à l'étuve à 105°C (ou au réchaud à gaz si méthode rapide) jusqu'à atteindre une masse constante puis pesé sec.

Le matériel utilisé est : Etuve, Réchaud à gaz, Balance 3 kg, Tamis 4 mm

E/ Mesure des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables

Le sable séché puis refroidi est immergé dans l'eau à 20°C pendant 24h puis séché à l'air chaud à 105°C à l'étuve. Il est alors introduit dans un pycnomètre dont le volume déterminé est complété avec de l'eau puis pesé. Pour la teneur en eau, le sable humide est séché à l'étuve à 105°C (ou au réchaud à gaz si méthode rapide) jusqu'à atteindre une masse constante puis pesé sec.

Pour réaliser cet essai, on utilise une Etuve, un Réchaud à gaz et une Balance de 3kg.

F/ Analyse granulométrique par tamisage

Au moyen d'une série de tamis de contrôle d'ouvertures de mailles décroissantes, la prise d'essai est fractionnée, après séchage et pesée en refus ou passants dont la masse est rapportée à la masse initiale du matériau.

Le matériel utilisé est : Etuve, Réchaud à gaz, Balance 15 kg, Echantillonneur, Série Tamis de 08 µm à 80 mm



G/ Détermination du coefficient d'aplatissement des gravillons

Séchée et pesée, la prise d'essai est d'abord divisée en classes granulaires d/D selon leur grosseur par tamisage sur tamis à mailles carrées. Chacune de ces classes est à son tour passée sur une grille à fentes parallèles d'écartement. Le coefficient d'aplatissement d'une classe correspond au passant en % du tamisage sur la grille à fente correspondante.

Le matériel utilisé est : Etuve, Réchaud à gaz, Balance 15 kg, Série Tamis de 08 μm à 80 mm, Série Grille à fente de 2.5 mm à 20 mm



H/ Détermination de la propreté superficielle des gravillons

La teneur en eau des gravillons étant mesurée sur une prise d'essai, on recueille le tamisât à 0.5 mm. La propreté superficielle est le rapport entre le passant à 0.5 mm et la masse sèche initiale. Pour le faire, on utilise une Etuve, une Balance de 15 kg et un Tamis de 0.5 mm

I/ Essai au bleu de méthylène - méthode à la tache sur les fines d'un sable

A la prise d'essai, on détermine pour avoir une quantité de fines f d'environ 30 g, on agite dans 200 ml d'eau, on injecte successivement des doses de 5 ml d'une solution de bleu de méthylène. Après chaque injection, une goutte est prélevée et déposée sur un papier filtre. Le test devient positif lorsque l'auréolé, d'abord incolore, demeure bleu clair pendant 5 minutes. La valeur de bleu est le rapport entre le volume final de solution injectée et la masse initiale de fines.

Le matériel utilisé est : Agitateur électrique à ailettes, Etuve, Burette graduée, Chronomètre, Balance 3 kg, Papier filtre, Solution Bleu de méthylène.



J/ Détermination de la propreté des sables - Equivalent de sable à 10 % de fines (sables à usage routier)

On ramène la teneur en fines de la prise d'essai du sable à 10 % en utilisant un sable correcteur lavé et on effectue l'essai selon la norme P 18-598.



Equivalent de sable (sables à béton)

Une éprouvette cylindrique ayant été remplie partiellement d'une « solution lavante » destinée à faire flocculer les fines, la prise d'essai humide y est versée et l'ensemble est agité mécaniquement selon un mouvement alternatif horizontal. On fait alors remonter les fines en injectant dans le sable à l'aide d'un tube de la solution lavante jusqu'à compléter le volume prévu. Après 20 mn de repos, on mesure en mm la hauteur du niveau supérieur du flocculat et celle de la partie sédimentée en se repérant sur la base d'un piston taré déposé à sa surface. L'équivalent de sable est le rapport de ces deux hauteurs en pourcentage.

Le matériel utilisé est : Agitateur électrique, Tube laveur, Eprouvette plexiglas, Chronomètre Piston taré, Réglette métallique, Solution lavante.

4. Conclusion

La réalisation des essais routiers permet l'obtention d'une route durable et résistante, et certainement un coût raisonnable, elle permet aussi d'apporter des solutions des problèmes du sol d'assise de la plateforme de la route ou des pentes voisines.

Les caractéristiques déduites à partir des essais mécaniques relatifs aux sols routiers nous permettent :

D'apprécier la résistance à la fragmentation des sables sous le trafic de chantier (essai de friabilité).

D'apprécier la résistance des granulats sous l'effet des cycles mouillage– séchage (essai de dégradabilité).

CHAPITRE III

IDENTIFICATION DES MATERIAUX UTILISES

1. Introduction

L'étude géologique des matériaux granulaires et leur présentation relève d'une importance capitale dans les domaines futurs de leur utilisation. La curiosité d'un universitaire à connaître leurs paramètres physiques, le guide systématiquement à mieux les analyser par les différentes méthodes existantes en géotechnique et connaître ainsi les différents types de minéraux qui les composent. Dans ce qui suit, nous essayons de présenter et de définir les trois matériaux utilisés, à savoir le grès, le calcaire et le schiste, ainsi que les différentes formes que peuvent avoir leurs grains d'une manière générale.

Dans le domaine de génie civil, le concassage des roches est effectué pour la production de granulats de formes variées (allongé, arrondi, angulaire), essentiellement utilisable pour les infrastructures.

Dans ce qui suit, nous nous intéresserons essentiellement aux grains des matériaux locaux tels que le grès, le calcaire et le schiste.

2. Définitions de grés

Les principales définitions de ce matériau se résument comme suit :

Le matériau étudié est extrait au lieu dit « Yakouréne », situé à 70 Km à l'Est du chef lieu de la wilaya de Tizi- Ouzou

Le grés est une roche détritique, issue de la cimentation (ou diagenèse) de grains de sable. Il s'agit par conséquent d'une roche cohérente et dure.

Le grés est une roche sédimentaire constituée par l'agglomération de nombreux petits grains unis par un ciment naturel de composition variable.

Le grés est une roche poreuse, fréquemment litée, constituée de sable lié par un ciment siliceux ou calcaire.

Le grés est une roche qui provient de la décomposition et de la transformation de roches anciennes. En fait, c'est une roche formée de grain de nature variable (quartz, feldspaths, calcaire...) aggloméré par un ciment siliceux. Il est généralement de couleur claire, virant au jaune ou au gris.

Le grés est une roche à gros grains qui est composée de masses consolidées de sable. Ces dernières, dont la taille des grains est inférieure à 2 mm, sont déposées par le mouvement de l'eau ou du vent. Chimiquement, le grés est composé essentiellement de quartz. Le matériau qui lie les grains entre eux est généralement composé de silice, de carbonate de calcium ou d'oxyde de fer. C'est ce liant qui confère au matériau sa couleur. Ainsi, l'oxyde de fer donne un grés rouge ou brun rougeâtre et les autres composants donnent un gré blanc, jaunâtre ou grisâtre.

La rupture du grés est caractérisée par la fracture du ciment mais pas des grains, qui eux restent entiers



Fig.25. Les échantillons du matériau grés utilisé pour cette étude

a) Localisation du matériau grés

Sur le territoire de la wilaya de Tizi-Ouzou, les niveaux géologiques favorables au développement des grés sont les nappes de flyshs (numidien) le miocène et l'oligo-miocène kabyle. Les grés numidiens sont de qualité supérieure à ceux du miocène.

Les premiers, affleurent essentiellement dans la partie orientale de la wilaya (Tabourth N'Ait Degane, Aourir, Achallam, Moknea.) et sur sa bande littorale (Cap Tedles, Zegzou, Ait Raouna), les seconds se développent au centre au sud du territoire (Souk-Tlata, Thidoucene...)

Les grés numidiens sont quartzeux de couleur gris à gris clair parfois blancs à grains moyens à gros, ils se présentent en gros bancs métriques intercalés de perlites. Epais de plusieurs centaines de mètres, ils constituent en volume l'essentiel de la série numidienne.

b) Composition minéralogique du grés

Les propriétés physico-mécaniques de ces roches montrent qu'elles ne sont pas très homogènes :

Le poids volumique varie entre 2 220 et 2 450 Kg/m³

La porosité entre 7,34 et 19,9 %

L'absorption d'eau entre 1,44 et 4,42 %

L'essai de compression à l'état sec entre 414 et 1 516 Kg.f/cm²

L'essai de compression à l'état saturé entre 302 et 975 Kg.f/cm²

Le coefficient de ramollissement entre 0,50 et 0,78

Ces propriétés ainsi que leur capacité de se débiter en blocs, font de ces grés un matériau utilisable en construction (pierre de taille moellons...). D'ailleurs, ils ont été utilisés depuis l'antiquité en tant que tel (ruines romaines de Tizirt, Azzefoun...)

Leurs propriétés chimiques, elles non plus ne sont pas très homogènes :

Si O₂ (%)	Fe₂ O₃	Al₂ O₃	Ti O₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	MnO (%)	Na₂ O	K₂ O	PAF (%)
91.57 à 98.64	0.10 à 1.8	0.04 à 3.60	0.15 à 0.36	0.10 à 1.05	0.02 à 0.21	0.01 à 0.05	0.05	0.01 à 0.51	0.29 à 1.35

Compositions minéralogiques des grés numidiens
« ***ALLILI Hakim et AMOKRANE Djouher (Mémoire Ingénieur 1999)*** »

De ces résultats, il ressort que les variétés pures (Si O₂ = 98.64% ; Fe₂ O₃ = 0.10%) des grés quartzeux peuvent être utilisés à l'état naturel dans la sidérurgie, la fonderie et même dans la verrerie ordinaire.

Par contre pour leur utilisation dans la verrerie de haute qualité, ces grés quartzeux nécessitent un enrichissement (lavage, tamisage des petites fractions, séparation électromagnétique, éventuellement flottation et frottement à flottation).

A titre d'exemple, nous citerons les grés quartzeux numidiens du gisement Ait Raouna : après enrichissement, ces roches ont donné les résultats suivant : Si O₂ = 99.05 à 99.95 % ; Fe₂ O₃ = 0.06% et Al₂ O₃ = 0.26 à 0.28%.

Les grés d'origine miocène, sont totalement différents de ceux du numidien, ils sont de couleur ocreuse, friables, à ciment carbonaté.

D'ailleurs leur composition chimique est nettement différente ; il s'agit de grés sillico-argileux ; Si O₂ varie de 56.18 à 76.30% ; Fe₂ O₃ = de 1.07 à 2.96 % ; Al₂ O₃ de 9.20 à 14.10% ; Cao de 12.58 à 14.88% ; PAF de 12.58 à 13.69 %

3. Définition des schistes

Les schistes sont des roches métamorphiques dans laquelle les cristaux du minéral principal sont disposés en couches parallèles et forment un grand nombre de feuillets bien développés, proches les uns des autres (la distance entre les plans de stratifications a moins de 5mm), provenant de la transformation des argiles par déshydratation et sous l'action de pressions orientées. Elles ont acquis cette schistosité sous l'influence de contraintes physico-mécaniques (Température et /ou pression).

Les roches schisteuses se délitent facilement le long d'un feuillet ou plan de schistosité. Les diverses roches schisteuses sont nommées et caractérisées d'après le minéral dominant qui est à l'origine de la foliation.

Parmi les schistes importants figurent les micaschistes, les chlorito schistes et les talcs schistes. Généralement, le quartz est le principal minéral secondaire. La roche schisteuse la plus courante et la roche métamorphique la plus commune après le gneiss et le micaschiste. Il se compose de mica, habituellement sous forme de biotite ou de muscovite et de quartz en quantité moindre. Les schistes qui contiennent des minéraux secondaires sont désignés par le minéral secondaire le plus important : micaschiste à grenat, calcifère.

Les schistes se forment généralement dans des conditions de faible température et de fortes pressions, donc à des profondeurs variant entre 4000 et 6000 m. Leur composition chimique ou pétrographique peut être très diverse



Fig.26. Les échantillons du matériau schiste utilisé pour cette étude

Le **schiste** est une roche qui a pour particularité d'avoir un aspect feuilleté, et de se débiter en plaques fines ou « feuillet rocheux ». On dit qu'elle présente une schistosité. Il peut s'agir d'une roche sédimentaire argileuse, ou bien d'une roche métamorphique.

4. Définition de Calcaire

Le calcaire est une roche sédimentaire très courante composée d'au moins de 50% de Calcite (CaCO_3), il existe de nombreuses variétés qui possèdent des propriétés assez variables allant des roches les plus tendres à des roches très dures.

Lorsqu'elle est brûlée ou calcinée, cette roche produit de la chaux (l'oxyde de calcium CaO). Le calcaire présente une forte réaction, à froid, à l'acide dilué ; cette réaction est l'un des critères Essentiels servant à sa détermination, qui permet de le différencier de la dolomie qui lui ressemble parfois beaucoup.

Trois paramètres sont essentiels pour définir les roches calcaires : la minéralogie, la structure et la porosité

Les **calcaires** sont des roches sédimentaires, troisièmes par ordre d'abondance après les schistes et les grès



Fig.27. les échantillons du matériau du calcaire utilisé pour cette étude

5. Forme des grains

Les grains apparaissent dans la forme différente, selon leur origine et processus postérieurs. Les grains portés par le vent, l'eau ou les glaciers, semblent être arrondies tandis que les grains des pierres concassées peuvent être angulaires (WADELL 1932). L'action chimique et l'abrasion augmentent avec l'âge des grains. D'ailleurs, les plus anciens tendent à être plus ronds indépendamment de leur dimension particulière. Plus le grain est grand plus la probabilité des imperfections et de la rupture fragile est élevée (typiquement $d > 400\mu$)

Les granulats utilisés dans les travaux de génie civil et en géotechnique doivent répondre à des impératifs de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage pour que les ouvrages présentent de bonnes caractéristiques physiques et mécaniques.

Il est évident que pour les matériaux issus de roches massives, le problème de l'angularité au sens strict ne se pose pas, mais celui de l'état de surface demeure.

La forme des grains est un facteur significatif. En fait, d'après le mode d'obtention des grains, ces derniers peuvent avoir une forme arrondie s'ils sont des matériaux alluvionnaires, car ils ont subi des transformations de textures causées par l'effet de transport d'eau, dans ce cas la rupture des grains est moins rapide. Une bonne angularité confère au mélange granulaire une meilleure stabilité mécanique.

La forme des grains comporte les caractéristiques qui se rapportent à la morphologie externe des grains. Celles-ci sont déterminées par (BUSTIN, 1995) :

- La structure interne,
- Les caractéristiques de la source des roches ;
- La lithologie;
- La dureté ;
- La rupture ;
- Le transport.

5.1. Diversités des formes de grains

Le sens commun a pour habitude de classer les granulats en « roulés » et « concassés », ce qui correspond très grossièrement à des grains présentant une courbure continue pour les premiers et des arêtes pour les seconds.

Pour notre travail de recherche ; les caractéristiques importantes liées à la forme des grains sont la minéralogie et la granulométrie. A partir de la figure 28 pour l'arrondissement, et la figure 29 pour l'angularité, on peut constater que les matériaux granulaires concassés peuvent être classés au degré élevé de 0,3 comme étant des matériaux anguleux.

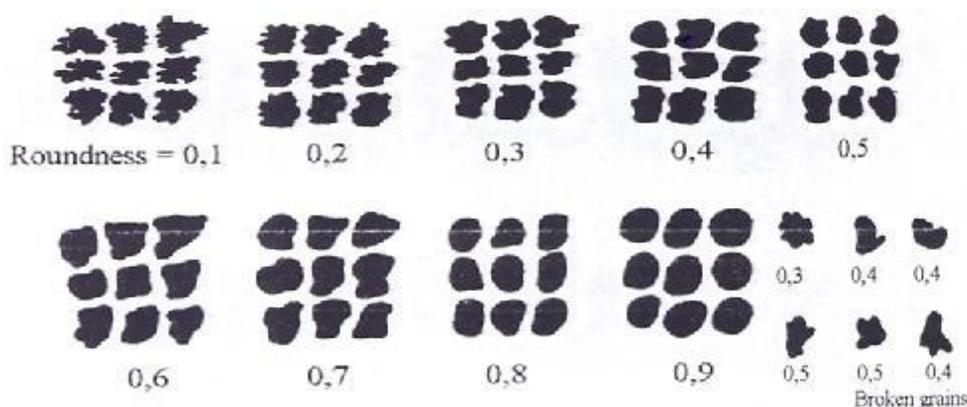


Fig. 28. Degré de forme des grains (d'après Krumbein W.C.1941).

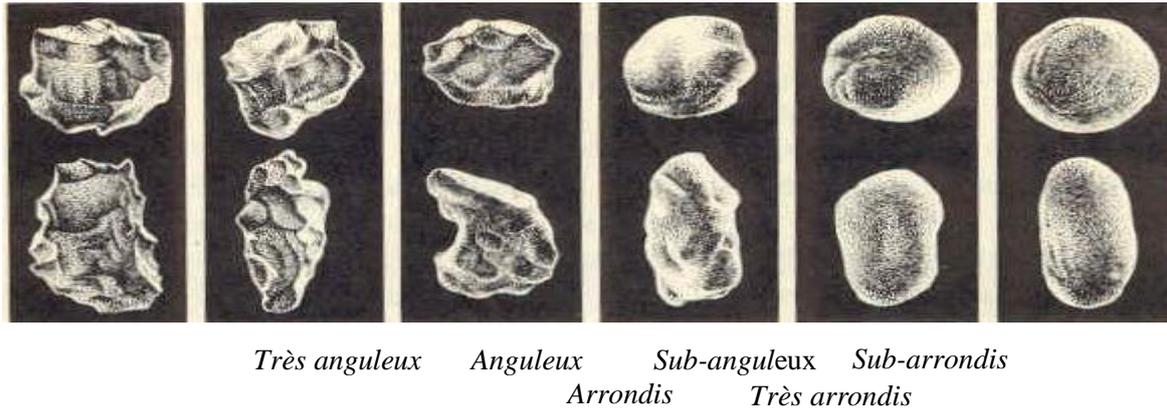


Fig.29. Modèle de forme des grains (d'après Powers M.C.1953)

La définition de la forme des grains étant complexe, on se limitera alors à définir les notions « arrondi ou moins arrondi », « très ou moins anguleux ». Hormis la forme des grains, la rugosité et l'anisotropie sont aussi à considérer pour les similitudes entre l'expérimental et la théorie.

5.2. Définitions de la rugosité

Selon Claude Tourenq et André Denis (1982), la surface d'une particule provient toujours d'une rupture. Si le grain est poly cristallin ce qui est en général le cas si sa dimension est supérieure à 1 mm, sa rugosité dépend de la structure de la roche. Si le grain est monominéral, ce qui est en général le cas en dessous de 0,1 mm, la surface est toujours lisse.

Pour les roches poly cristallines, la rugosité dépend de la dimension 'd' des cristaux : Les aspérités de la surface ne dépassant guère $d/2$. Donc, plus une roche à un grain fin, plus sa cassure est lisse : silex par exemple. Par contre, les roches à gros grains comme les granites ont toujours des surfaces rugueuses. Cette rugosité primaire peut être modifiée si les particules ont subi un transport fluvial par exemple ; la surface peut alors tendre à se polir ou au contraire à se dépolir : traces de chocs sur les gravillons de silex. L'état de surface des grains joue un rôle au niveau de la maniabilité des matériaux composites, de la stabilité des assises non traitées et de la microrugosité des couches de surface des chaussées.

5.3. L'angularité

C'est une caractéristique géométrique qui n'est pas très facile à appréhender. Au point de vue de la technique routière, on peut distinguer deux aspects de l'angularité :

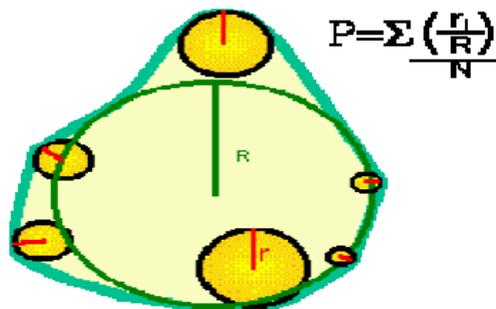
- une bonne angularité confère aux matériaux un angle de frottement interne élevé, donc une bonne stabilité mécanique,
- pour les couches superficielles et pour lutter contre la glissance, les granulats doivent avoir des arêtes vives et ne pas présenter de faces arrondies.

L'angularité des granulats se caractérise par la valeur plus ou moins aiguë des angles entre les faces limitant les particules et par le caractère plus ou moins émoussé des arêtes délimitant ces faces.

5.4. L'arrondi

L'arrondi peut être évalué en faisant la moyenne du rayon de courbure r_i , faisant le coin, et le comparer au rayon de la plus grande sphère inscrite, *WADELL* (1932). Le procédé est bidimensionnel mais, il peut être prolongé à trois dimensions par l'utilisation des sphères au lieu des cercles. Comme vous pouvez voir, ce type de mesure est très facile (*RAYMOND*, 1995).

$$P = \frac{\sum \left(\frac{r_i}{R} \right)}{N}$$



La plupart des géologues comparent l'arrondi des grains aux diagrammes présentés dans la Figure 30.



Fig.30.1. Les diagrammes les plus utilisés par les géologues pour comparer l'arrondi des grains (RAYMOND, 1995).

6. L'écrasement des grains selon (Guyon et Troadec, 1994)

Guyon et Troadec (1994) ont classé la rupture des grains selon trois modes: la fracture, l'écaillage et l'abrasion (Fig.31) :

La fracture : un grain se casse pour en donner de nouveaux de tailles sensiblement égales et inférieures à la taille du grain original.

L'écaillage (ou l'attrition) : un grain se casse pour donner un grain de taille un peu inférieure et plusieurs de plus petite taille.

L'abrasion : le résultat est un grain ayant sensiblement la même taille que le grain original mais avec une production de particules de taille très fines.

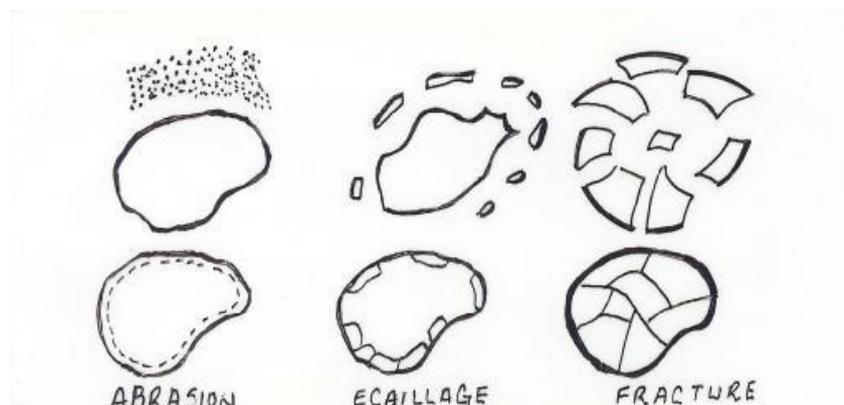


Fig.30.2. différents modes de rupture des grains selon Guyon et Troadec, 1994.48

7. Conclusion

La région de Tizi-Ouzou dispose de plusieurs gisements des matériaux (grès, calcaire et les schistes) situés en surface et près des routes nationales, ce qui rend leur exploitation facile et à moindre coût. Ces matériaux disposent des principaux minéraux qui sont la silice, le quartz, le feldspath et les micas.

Au cours des discussions concernant la forme des grains, il ressort que les concepts d'angularité, d'arrondi et de rugosité sont vagues. Il est évident qu'il y ait une certaine différence entre leurs limites sur une base. Ceci est le produit de la recherche d'une méthode de mesure quantifiable de la forme des grains

Pour nos essais au laboratoire, le type du matériau, la taille et la forme d'un agrégat (anguleux, arrondis ou allongé ...) joue un rôle très important pour définir la dimension fractale, plus la forme d'un grain est rugueuse plus sa dimension fractale doit être importante, et c'est ce qu'on va déduire dans la partie expérimentale.

CHAPITRE IV

Les essais de laboratoire

1. Introduction

Différents essais ont été proposés pour étudier la résistance à la fragmentation sous l'effet de charges statiques ou dynamiques et à l'usure par frottement mutuel (attrition) ou par frottement sur des surfaces métalliques. Des machines reproduisent plus ou moins bien les sollicitations complexes existant dans une chaussée, mais on ne sait pas suffisamment quelles sont les sollicitations auxquelles sont soumis les granulats dans les différentes couches de chaussée ; il est vraisemblable qu'elles varient suivant la couche considérée et la rigidité du matériau composite qui la constitue.

Par leur nature minéralogique, leurs caractéristiques mécaniques et leurs caractéristiques géométriques, les granulats influencent le comportement des matériaux de chaussées.

- Le type d'exploitation a une influence sur certaines caractéristiques des granulats.
- Tous les types de roches ne peuvent pas être utilisés pour fabriquer des granulats pour matériaux de chaussées.

On a effectué des essais mécaniques dans le but de connaître le comportement mécanique et les caractéristiques de ces matériaux et éventuellement leurs applications aux sols routiers.

Les principaux essais réalisés sur les granulats sont :

2. Essai de dégradabilité (norme P 94-067)

-L'essai de dégradabilité permet d'apprécier les potentialités d'un matériau à évaluer après sa mise en œuvre sous l'action des cycles immersion - séchage (cycles climatiques).

-Appareillage : Une série de tamis normalisés. Un bac de mise en immersion. Une étuve réglée à 105° C.

-Mode opératoire : l'essai s'effectue sur 2 Kg de la fraction granulaire 10/20 du matériau à tester. Après avoir dressé une courbe granulométrique, Cet échantillon est soumis à 5 cycles de 8 h de séchage et de 16 h d'immersion.

L'échantillon obtenu sera de nouveau soumis à une analyse granulométrique.

-Expression des résultats : Le coefficient de dégradabilité (DG)

Ce coefficient s'exprime par le rapport des D_{10} d'un échantillon de granularité initiale donnée, mesurés avant et après l'avoir soumis à des cycles de séchage – immersion conventionnelle.

Il est donné par la formule suivante $DG = D_{10}(i) / D_{10}(f)$

$D_{10}(i)$: Diamètre correspondant à 10 % en poids du matériau initial.

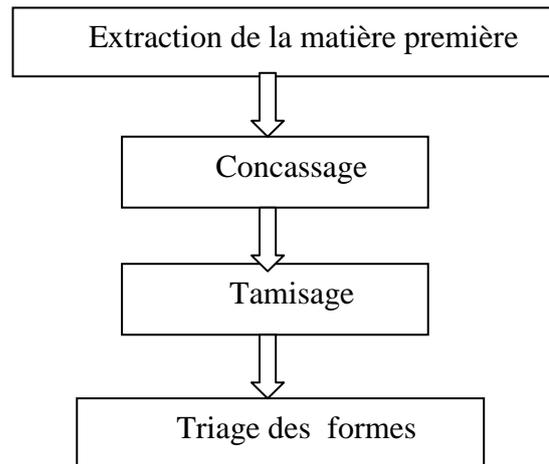
$D_{10}(f)$: Diamètre correspondant à 10 % en poids du matériau après l'essai.

$DG > 20$ → Matériaux rocheux très dégradables.

$5 < DG < 20$ → Matériaux rocheux moyennement dégradables.

$DG < 5$ → Matériaux rocheux peu dégradables.

2.1 Préparation des échantillons



Les matériaux utilisés sont concassés: ils passent de l'état de bloc à l'état de granulat. L'opération est faite manuellement avec un marteau ou avec un concasseur à mâchoires.

Une fois le matériau est concassé, on passe à l'étape de tamisage pour préparer les classes granulométriques désirées (4-6.3), (6.3-10), (10-20).

Le choix des formes est fait manuellement à l'œil nu, tous les grains ont une forme irrégulière, on en distinguera : des grains de forme allongée, des grains de forme sous angulaire et sous arrondi qui sont les trois formes dominantes lors de concassage.

Ces trois formes sont difficiles à les avoir en quantité suffisante d'un matériau à un autre, par exemple, pour les grés une grande difficulté est rencontrée pour la forme sous angulaire ainsi que pour acquérir la quantité désirée pour les différentes classes granulaires.



Fig.31.Les différents formes des grains de calcaire

2.2. Le grés

2.2.1 Avant essai

L'analyse granulométrique de la fraction granulaire 10/20 pour les trois formes de grés a donné les résultats suivants :

Tab.1 Pourcentage des tamisats cumulés pour la granulométrie 10/20 du grés avant essai

DIAMETRE	REFUS (g)	REFUS cumulés	TAMISATS cumulés	TAMISATS cumulés %
20	929	929	1071	53,55
16	521	1450	550	27,5
12,5	400	1850	150	7,5
10	150	2000	0	0

2.2.2 Après essai

L'analyse de 0/20 a donné les résultats suivants :

A-Grés de forme allongée :

Tab.2 : Pourcentage des tamisats cumulés pour la granulométrie 10/20 du grés de forme allongée après essai

DIAMETRE	REFUS (g)	REFUS cumulés	TAMISATS cumulés	tamisât cumulés %
20	774,5	774,5	1225,1	61,2672535
16	637,2	1411,7	587,9	29,4008802
12,5	367,6	1779,3	220,3	11,0172034
10	179,6	1958,9	40,7	2,03540708
8	14,4	1973,3	26,3	1,31526305
6,3	2	1975,3	24,3	1,21524305
5	1,5	1976,8	22,8	1,14022805
4	1,1	1977,9	21,7	1,08521704
3,15	0,6	1978,5	21,1	1,05521104
2	0,4	1978,9	20,7	1,03520704
1,6	0,1	1979	20,6	1,03020604
1,25	0,2	1979,2	20,4	1,02020404
1	0,2	1979,4	20,2	1,01020204
0,63	0,3	1979,7	19,9	0,99519904
0,4	0,4	1980,1	19,5	0,97519504
0,315	0,7	1980,8	18,8	0,94018804
0,2	2,3	1983,1	16,5	0,82516503
0,16	4,7	1987,8	11,8	0,59011802
0,12	0,6	1988,4	11,2	0,56011202
0,08	3,6	1992	7,6	0,38007602
0	7,6	1999,6	0	0

B-Grés sous angulaire :

Tab.3 : Pourcentage des tamisâts cumulés pour la granulométrie 10/20 du gré sous angulaire après essai

DIAMETRE	REFUS (g)	REFUS cumulés	TAMISATS cumulés	tamisât cumulés %
20	785,3	785,3	1209,3	60,4770954
16	529,8	1315,1	679,5	33,9817964
12,5	474,9	1790	204,6	10,2320464
10	156,7	1946,7	47,9	2,3954791
8	21,2	1967,9	26,7	1,33526705
6,3	3,1	1971	23,6	1,18023605
5	0,7	1971,7	22,9	1,14522905
4	3,6	1975,3	19,3	0,96519304
3,15	0,7	1976	18,6	0,93018604
2	0,4	1976,4	18,2	0,91018204
1,6	0,1	1976,5	18,1	0,90518104
1,25	0,1	1976,6	18	0,90018004
1	0,2	1976,8	17,8	0,89017804
0,63	0,2	1977	17,6	0,88017604
0,315	0,8	1977,8	16,8	0,84016803
0,2	2,5	1980,3	14,3	0,71514303
0,16	4,1	1984,4	10,2	0,51010202
0,08	3,6	1988	6,6	0,33006601
0	6,6	1994,6	0	0

C-Grés de forme sous arrondi :

Tab.4 : Pourcentage des tamisâts cumulés pour la granulométrie 10/20 du gré sous arrondi après essai

DIAMETRE	REFUS (g)	REFUS cumulés	TAMISATS cumulés	tamisât cumulés %
20	770	770	1224,6	61,2422484
16	678,1	1448,1	546,5	27,3304661
12,5	356,3	1804,4	190,2	9,51190238
10	159,8	1964,2	30,4	1,52030406
8	7,6	1971,8	22,8	1,14022805
6,3	2	1973,8	20,8	1,04020804
5	0,1	1973,9	20,7	1,03520704
4	0,6	1974,5	20,1	1,00520104
3,15	0,6	1975,1	19,5	0,97519504
2	0,1	1975,2	19,4	0,97019404
1,6	0,2	1975,4	19,2	0,96019204
1,25	0,1	1975,5	19,1	0,95519104
1	0,2	1975,7	18,9	0,94518904
0,63	0,3	1976	18,6	0,93018604
0,315	0,6	1976,6	18	0,90018004
0,2	2	1978,6	16	0,80016003
0,16	2,7	1981,3	13,3	0,66513303
0,08	3,1	1984,4	10,2	0,51010202
0	7,4	1991,8	2,8	0,14002801

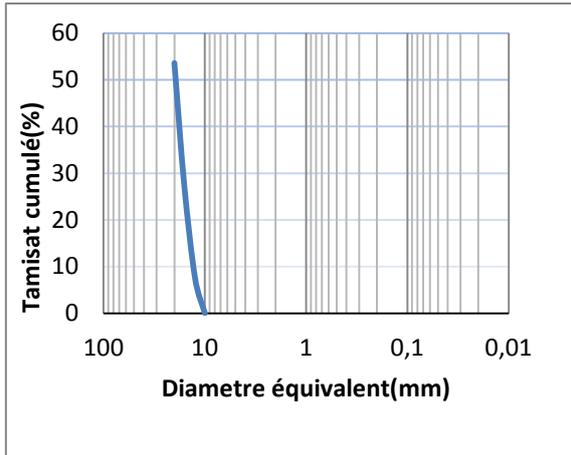


Fig.32. Courbe granulométrique du grés (10/20)
Avant essai de dégradabilité

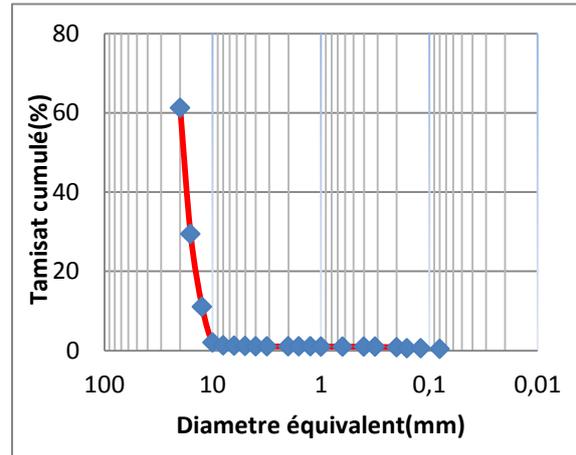


Fig.33 courbe granulométrique du grés
de forme allongée après essai

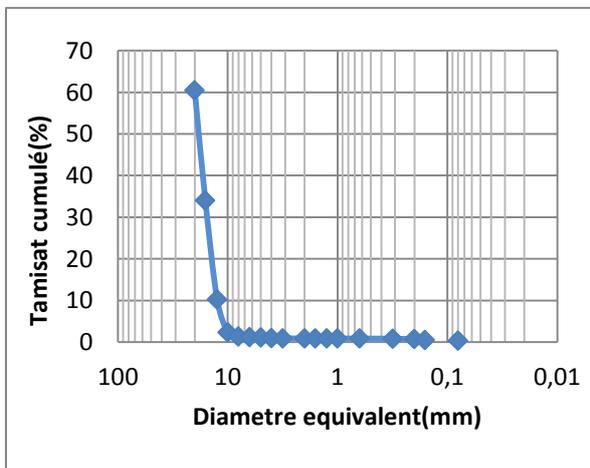


Fig.34 courbe granulométrique du grés de
forme sous angulaire avant essai

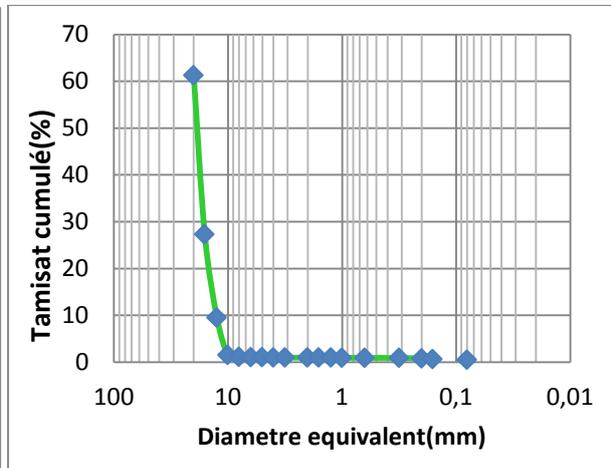


Fig.35 courbe granulométrique du grés de
de forme sous arrondi après essai



Fig.36 Les échantillons du grés avant et après essai

*Interprétation des courbes granulométriques obtenues après les essais de dégradabilité

D'après les courbes granulométriques présentées ci-dessus, on constate que :

- Avant essai, la courbe initiale présente une granulométrie serrée
- Après essai, on constate que les courbes granulométriques obtenue semblent être confondues. Elles ont la même allure, mais elles sont plus étalées que la courbe initiale et on remarque que des particules fines ont été produites.

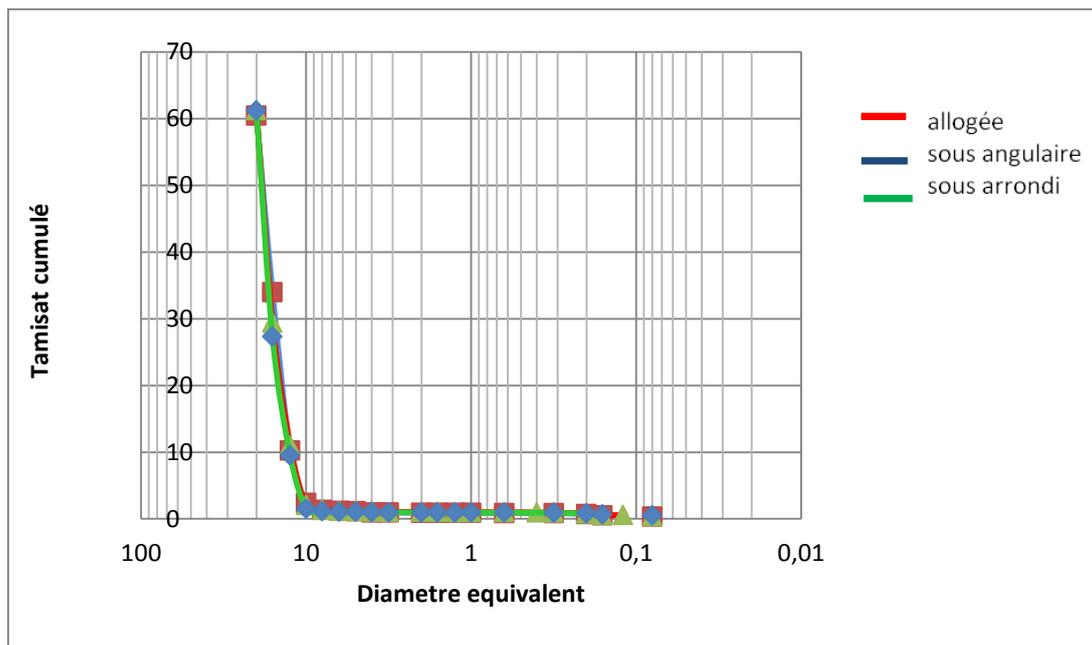


Fig.37 Les différentes courbes granulométriques du gré obtenu après essai de dégradabilité pour les trois formes des granulats.

Résultats :

Calcul de coefficient de dégradabilité (DG) de chaque forme du gré :

$DG = D_{10} (i) / D_{10} (f)$ on obtient comme résultats :

$D_{10} (i) = 13 \text{ mm}$; $D_{10} (f)$ (des trois formes) = 12,5 mm

→ $DG = 1,04$

Dans notre cas, le coefficient de dégradabilité des trois formes du grés est inférieur à 5, ce qui permet de dire que notre matériau rocheux est peu dégradable.

2.2. Le calcaire

2.2.1 Après essai :

Les courbes granulométriques des trois formes de calcaire sont présentées dans les figures

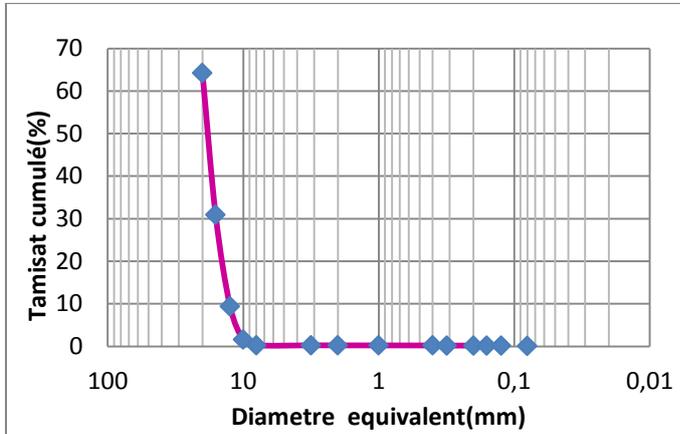


Fig.38 courbe granulométrique des grains de calcaire de forme allongée après essai de dégradabilité

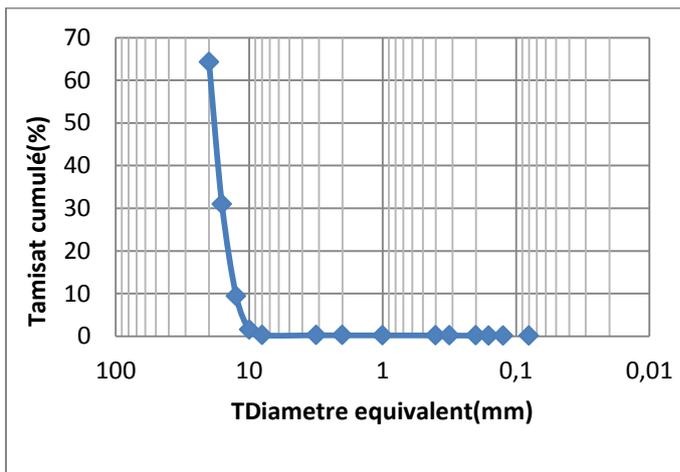


Fig.39 courbe granulométrique des grains de calcaire de forme sous angulaire après essai de dégradabilité

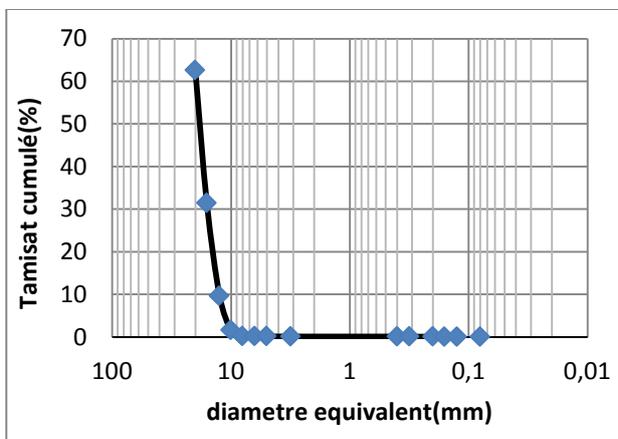


Fig.40 courbe granulométrique des grains de calcaire de forme sous arrondi après essai de dégradabilité



Fig.41 Les échantillons du calcaire avant et après essai de dégradabilité

Résultats :

Calcul de coefficient de dégradabilité (DG) de chaque forme des grains de calcaire :

$DG = D_{10} (i) / D_{10} (f)$; on obtient comme résultats :

$D_{10} (i)=13 \text{ mm}$; $D_{10} (f)$ (des trois formes)= 12,6 mm

$DG = 1,03$	< 5
-------------	-------

Le coefficient de dégradabilité des trois formes du calcaire est inférieur à 5, donc ce matériau " calcaire" est peu dégradable.

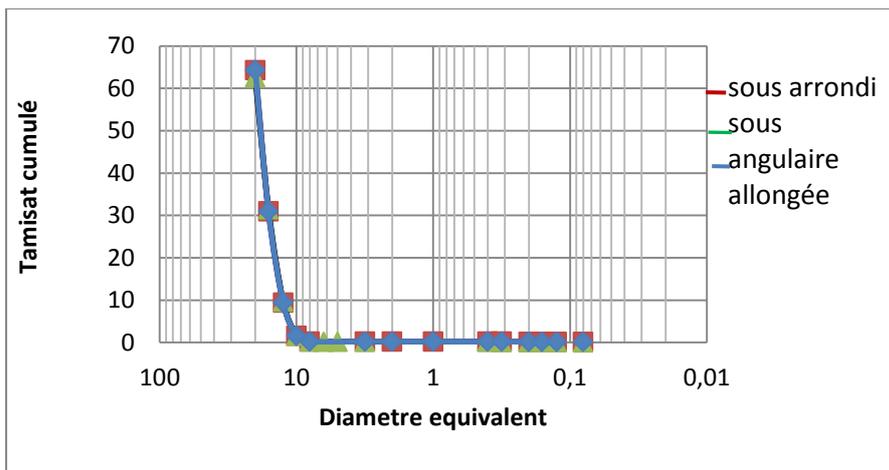


Fig.42 Les différentes courbes granulométriques des trois formes de granulats calcaire obtenues après essai

***Interprétation**

Après essai, on constate que les courbes granulométriques obtenues semblent être confondues. Elles ont la même allure, mais elles sont plus étalées que la courbe initiale et on remarque que des particules fines ont été produites.

2.3. Le schiste

2.3.1. Après essai

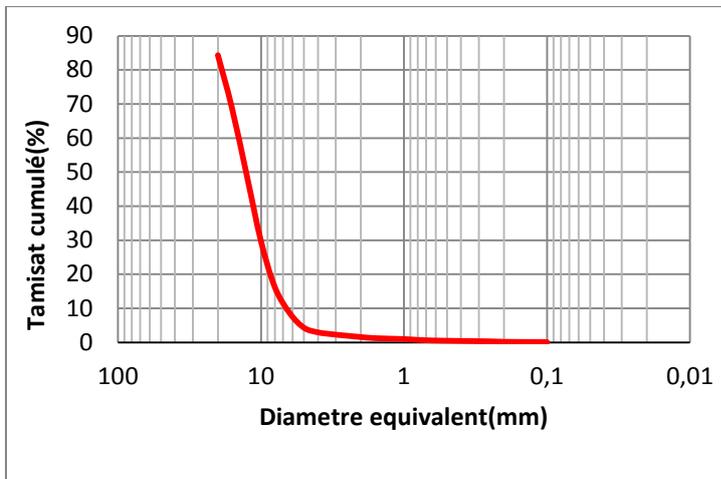


Fig.43 courbe granulométrique des grains de schiste de forme allongée après essai de dégradabilité

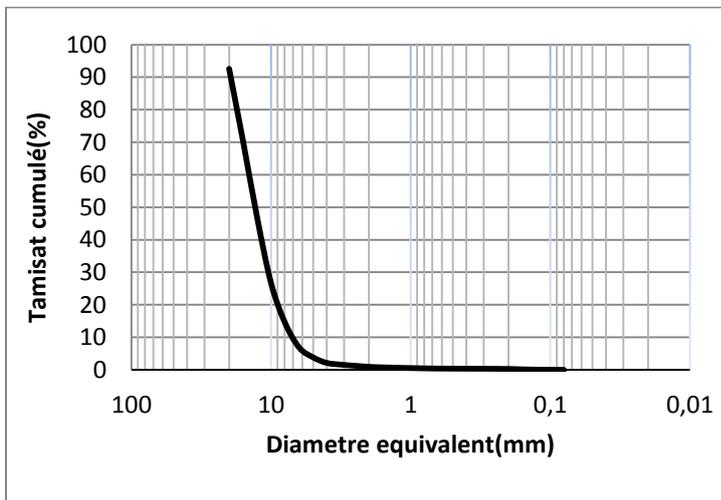


Fig.44 courbe granulométrique des grains de schiste de forme sous angulaire après essai de dégradabilité

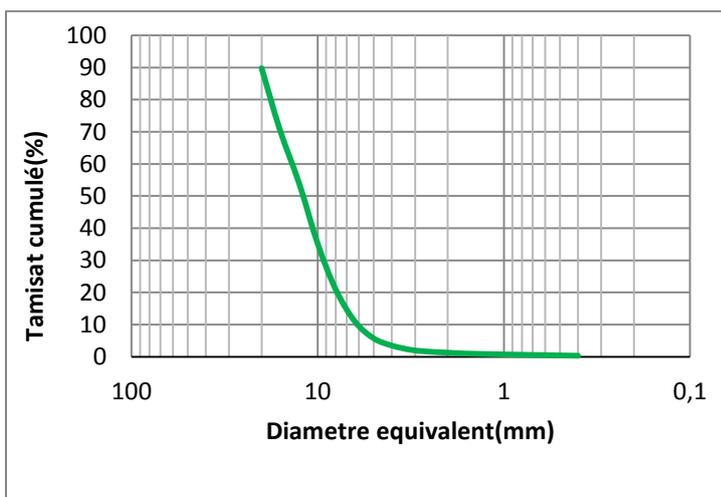


Fig.45 courbe granulométrique des grains de schiste de forme sous arrondi après essai de dégradabilité

Résultats :

Calcul de (DG) de chaque forme du schiste :

$$DG = D_{10} (i) / D_{10} (f)$$

$$D_{10} (i) = 13 \text{ mm}$$

$$D_{10} (f) (\text{schiste allongée}) = 9 \text{ mm} \longrightarrow \boxed{DG = 1,44} < 5$$

$$D_{10}(f) (\text{schiste sous arrondi et sous angulaire}) = 6,3 \text{ mm} \longrightarrow \boxed{DG = 2} < 5$$

Dans les deux cas, le coefficient de dégradabilité est inférieur à 5 donc notre matériau schiste est peu dégradable.

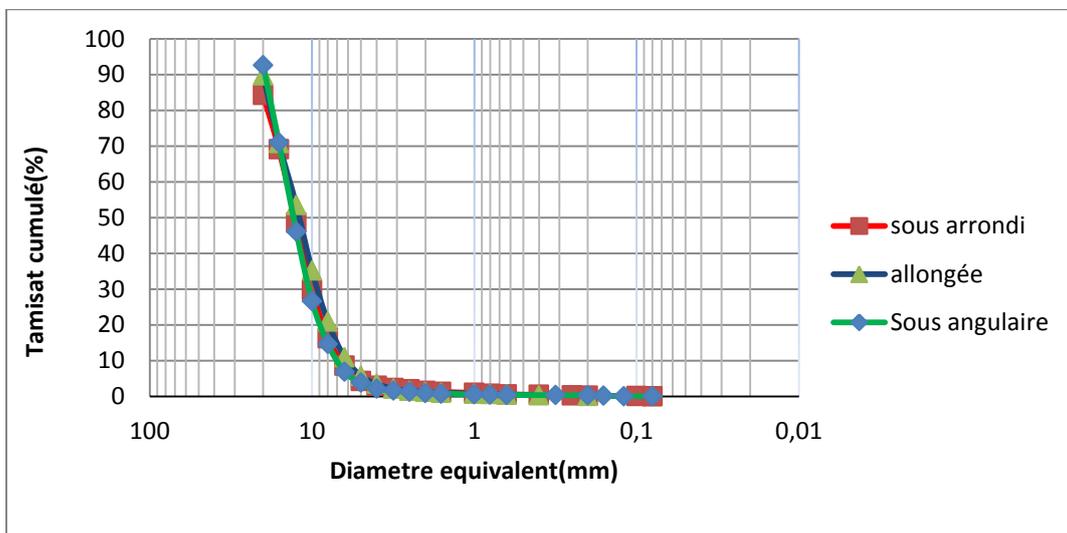


Fig.46 Les différentes courbes granulométriques de grés obtenus après essai de fragmentabilité pour les trois formes de granulat.

* **Interprétation**

Après essai, on remarque que les courbes granulométriques obtenues semblent être confondues. Elles ont la même allure, mais elles sont plus étalées que la courbe initiale et on remarque que des particules fines ont été produites.

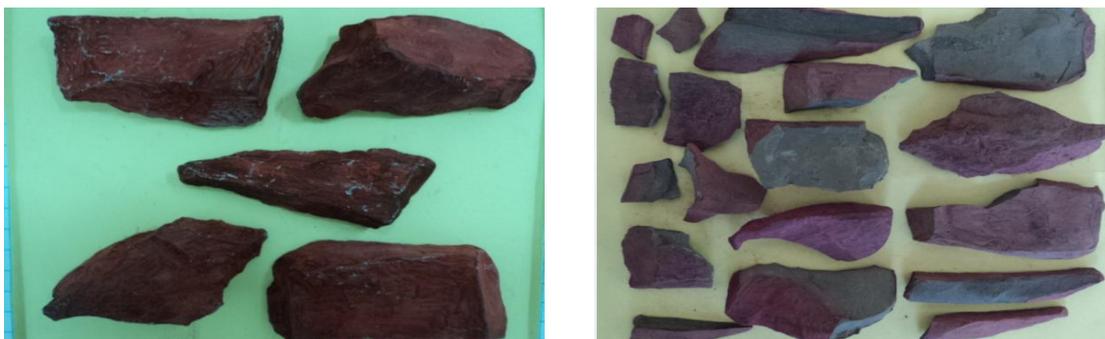


Fig.47 les échantillons du schiste allongé avant et après essai

3. Essai de fragmentabilité (norme P94-066)

-L'essai de fragmentabilité permet d'apprécier et de mesurer la sensibilité d'un matériau rocheux à se fragmenter sous la sollicitation des engins de terrassement.

-Appareillage: Une série de tamis normalisés, un moule CBR, une dame P M, une balance.

-Mode opératoire: l'essai s'effectue sur 2 Kg de la fraction granulaire 10/20 du matériau à tester. Cet échantillon est mis dans un moule CBR en une seule couche et reçoit 100 coups de dame Proctor modifié. L'échantillon obtenu sera de nouveau soumis à une analyse granulométrique.

-Expression des résultats : Le coefficient de fragmentabilité (FR)

Ce coefficient s'exprime par le rapport des D_{10} d'un échantillon de granularité initiale donnée, mesurée avant et après l'essai. Il est donné par la formule suivante

$$FR = D_{10} (i) / D_{10} (f)$$

$D_{10} (i)$: Diamètre correspondant à 10 % en poids du matériau initial.

$D_{10} (f)$: Diamètre correspondant à 10 % en poids du matériau après l'essai.

$FR < 7$ la roche peu fragmentable.

$FR > 7$ la roche fragmentable.

3.1. Le grés

3.1.1. Avant essai : L'analyse granulométrique de la fraction granulaire 10/20 pour les trois formes de chaque matériau (calcaire et schiste) a donné les résultats suivants :

Tab.5 Pourcentage des tamisats cumulés pour la granulométrie 10/25 du grés sous arrondi avant essai

DIAMETRE	REFUS (g)	REFUS cumulés	TAMISATS cumulés	TAMISATS cumulés %
25	0	0	2000	100
20	929	929	1071	53,55
16	521	1450	550	27,5
12,5	400	1850	150	7,5
10	150	2000	0	0

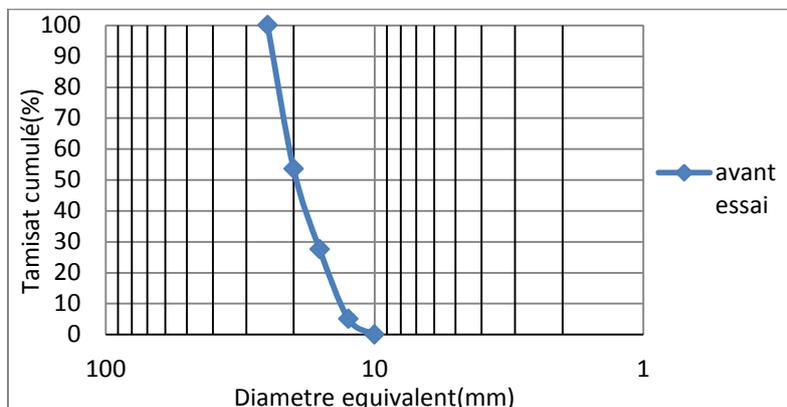


Fig.48 Courbe granulométrique des grains de grés Avant essai de fragmentabilité

2.3.2. Après essai

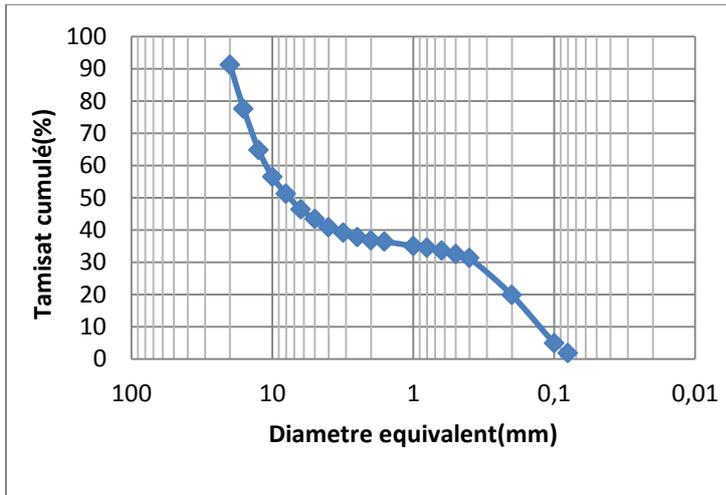


Fig.49 Courbe granulométrique des granulats de grés de forme allongés après essai de fragmentabilité

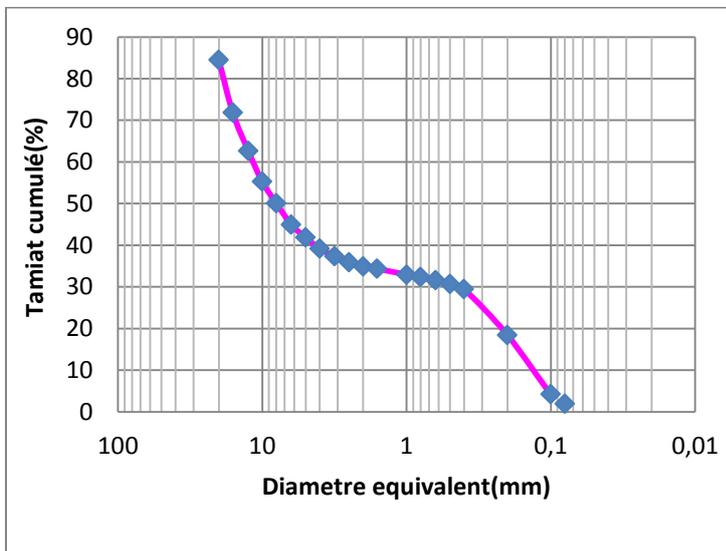


Fig.50 Courbe granulométrique des granulats de grés de forme sous arrondis après essai de fragmentabilité

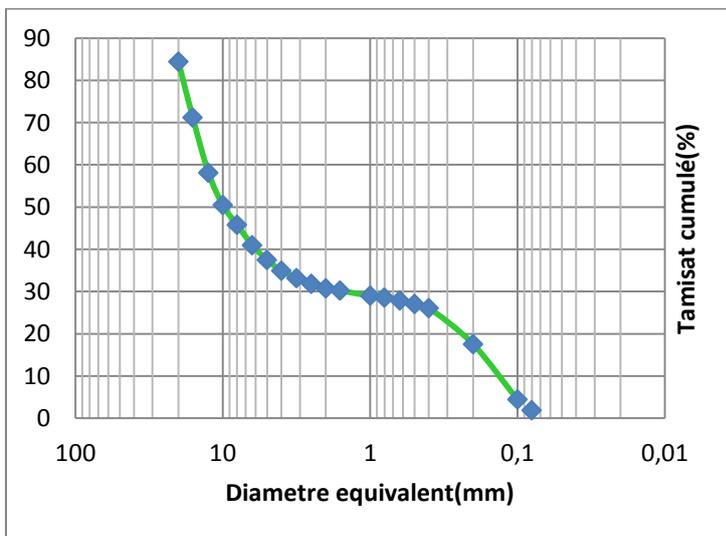


Fig.51 Courbe granulométrique des granulats de gré de forme sous angulaire après essai de fragmentabilité

Résultats :

Calcul de coefficient de fragmentabilité de chaque forme du gré :

$$FR = D_{10} (I) / D_{10} (f)$$

$D_{10} (I) = 13 \text{ mm}$; $D_{10} (f) \text{ (trois forms)} = 0,11 \text{ mm}$.

$$FR = 118 > 7$$

Le coefficient de fragmentabilité des trois formes du grés est supérieur à 7 donc notre matériau est fragmentable.

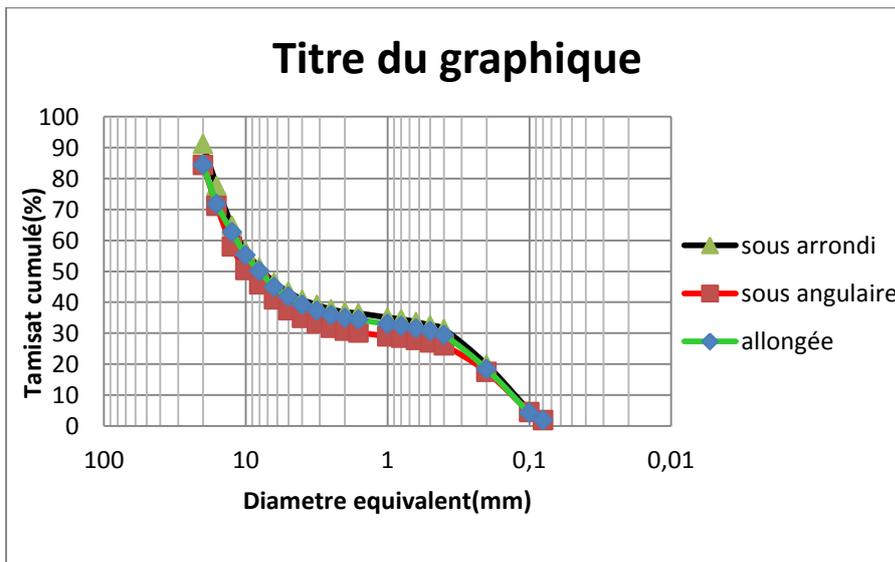


Fig.52 Les différentes courbes granulométriques des trois formes de granulats de grés obtenues après essai de fragmentabilité

* Interprétation

On remarque que les courbes granulométriques obtenues semblent être confondues. Elles ont la même allure, mais elles sont plus étalées que la courbe initiale.

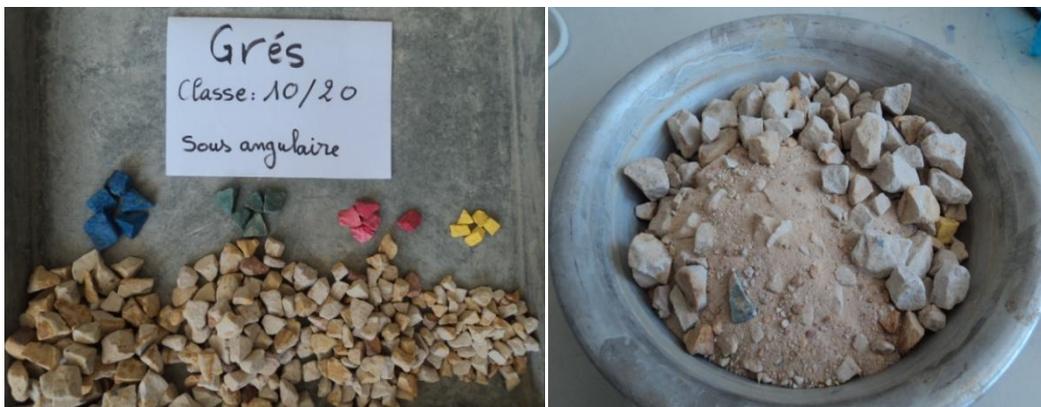


Fig.53 Les échantillons du grés avant et après essai de fragmentabilité

3.2. Le calcaire

3.2.1 .Après essai :

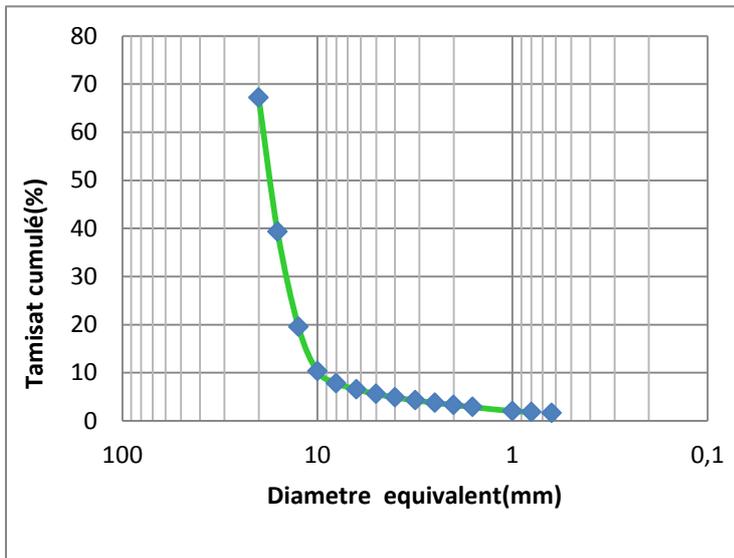


Fig.54 Courbe granulométrique des granulats de calcaire de forme sous angulaire après essai de fragmentabilité

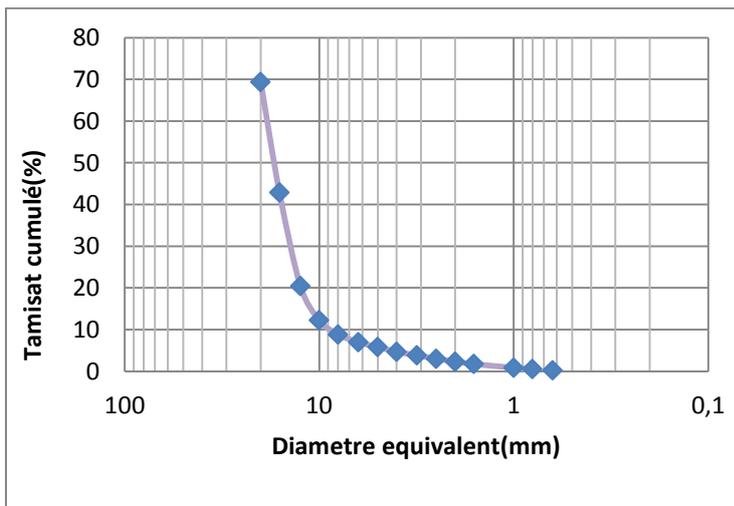


Fig.55 Courbe granulométrique des granulats de calcaire de forme sous allongée après essai de fragmentabilité

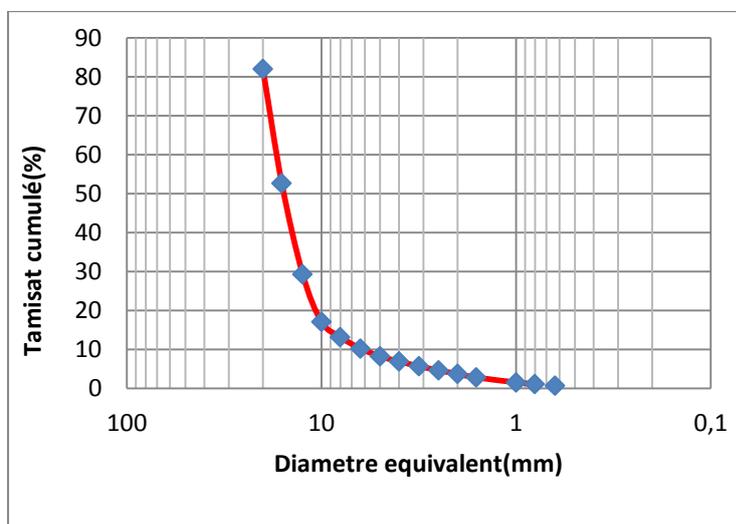


Fig.56 courbe granulométrique des granulats de calcaire de forme sous arrondi après essai de fragmentabilité

Résultats :

Calcul de coefficient de fragmentabilité de chaque forme du calcaire :

$$FR = D_{10} (I) / D_{10} (f)$$

$D_{10} (I) = 13 \text{ mm}$; $D_{10} (f) \text{ (trois forms)} = 6,3 \text{ mm}$.

$$FR = 2 < 7$$

Le coefficient de fragmentabilité est inférieur à 7 donc notre matériau est peu fragmentable

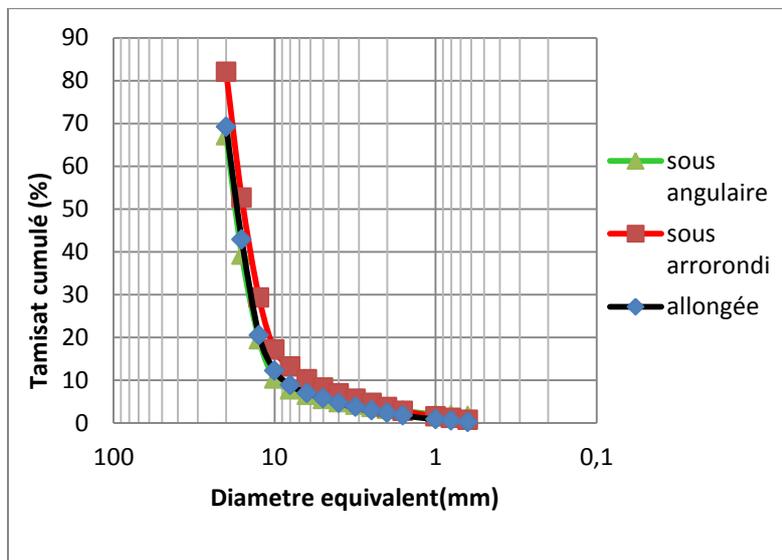


Fig.57 Les différentes courbes granulométriques des trois formes de granulats de calcaire obtenues après essai de fragmentabilité

*Interprétation

On remarque que les courbes granulométriques obtenues semblent être confondues. Elles ont la même allure et elles sont plus étalées que la courbe initiale. Et on remarque que le calcaire de forme sous angulaire est la forme plus fragmentée.



Fig.58 Les échantillons du calcaire de forme sous angulaire avant et après essai

3.3. Le schiste

3.3.1. Après essai :

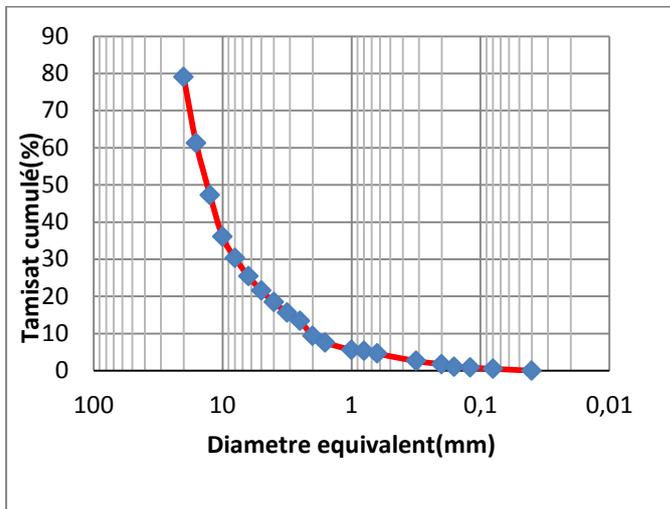


Fig.59 courbe granulométrique des granulats de schiste de forme sous arrondi après essai

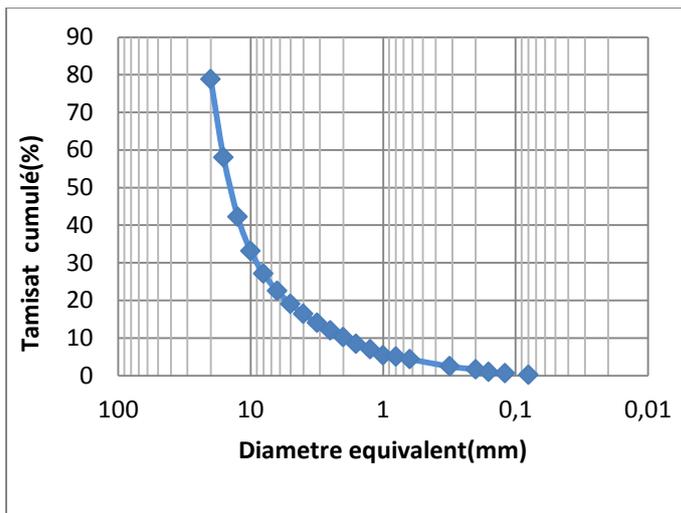


Fig.60 courbe granulométrique des granulats de schiste de forme sous arrondi après essai

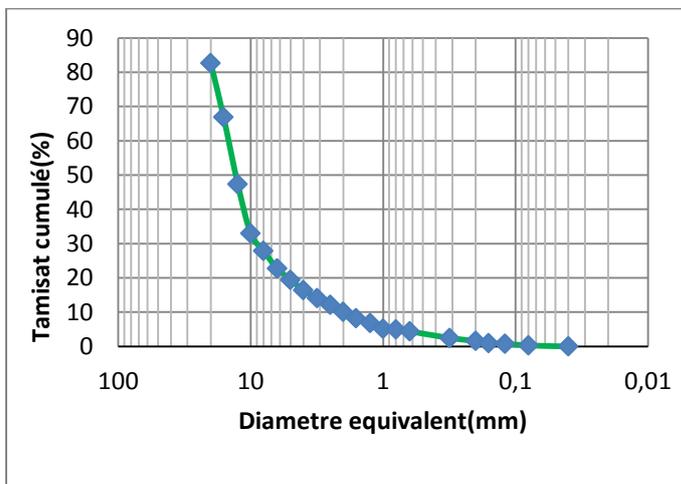


Fig.61 courbe granulométrique des granulats de schiste de forme sous angulaire après essai

Résultats :

Calcul de coefficient de fragmentabilité de chaque forme du schiste :

$$FR = D_{10} (I) / D_{10} (f)$$

$D_{10} (I) = 13 \text{ mm}$; $D_{10} (f) \text{ (trois forms)} = 2 \text{ mm}$.

$$FR = 6,5 < 7$$

Le coefficient de fragmentabilité des trois formes du grés est inférieur à 7 donc notre matériau est peu fragmentable

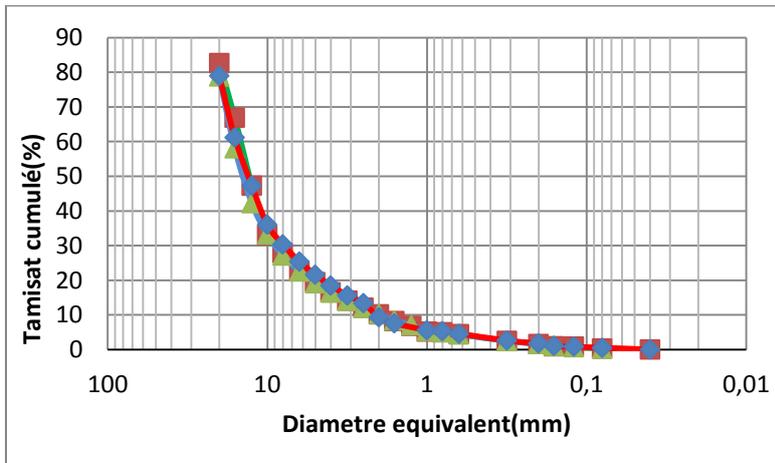


Fig.62 Les différentes courbes granulométriques des granulates de grés obtenus après essai

***Interprétation**

Les courbes granulométriques obtenues après essai semblent être confondues. Elles ont la même allure et plus étalées que la courbe initiale et on remarque que des particules fines ont été produites.

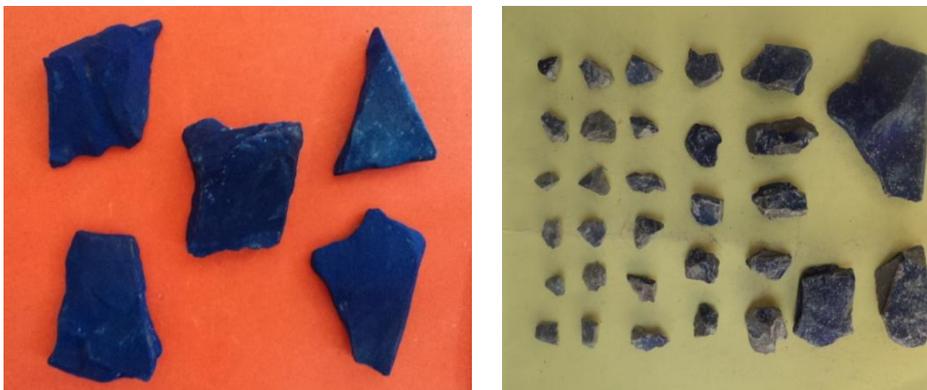


Fig.63 Les échantillons de schiste de forme sous angulaire avant et après essai

IV. Essai de Micro Deval norme P18-572

-L'essai Micro Deval permet de mesurer la résistance à l'usure des granulats (usure par frottement) des granulats et leur sensibilité à l'eau.

-Mode opératoire : Le matériau (500 g) est mis dans un cylindre horizontal de 20 cm de diamètre en présence d'eau (2.5 L) et de billes d'acier de même taille, qui sont destinées à accélérer le processus d'attrition. Après deux heures de rotation (12000 tours) du cylindre selon son axe, on mesure le pourcentage des particules de taille supérieure à 1,6 mm par tamisage.

Classe granulaire (mm)	Charge abrasive (g)
4-6,3	2000± 5
6,3-10	4000±5
10-16	5000±5

Expression des résultats : Coefficient **$MDE = 100 (M - m') / M$**

M : Masse du matériau initial.

M' : Refus au tamis 1.6 mm.

MDE < 20 → matériaux pour corps de chaussée.

MDE < 45 → matériaux pour couche de forme.

Pour les travaux routiers, on demande en général un indice Micro Deval inférieur à **27**.

IV.1.Le grés

Les masses et les classes granulaires des trois matériaux de chaque formes avant essai est toujours les mêmes.

A. Avant essai

Classe granulaire	La messe de l'échantillon	La charge abrasive
4- 6,3	500 g	2000± 5
6,3-10		4000± 5
10-16		5000± 5

B. Après essai

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant :

Tab.6 Les coefficients MDE calculés pour chaque forme du gré

La forme du gré	La classe granulaire	Coefficient MDE
allongée	4-6,3	93%
	6,3-10	75%
	10-16	60%
Sous arrondi	4-6,3	91%
	6,3-10	80%
	10-16	58%
Sous angulaire	4-6,3	96%
	6,3-10	77%
	10-16	64%

*Interprétation

Les coefficients MDE des trois formes du gré sont très élevés surtout pour la forme sous angulaire et ils sont supérieurs à 20 et supérieurs à 45 ; donc notre matériau n'est ni pour les corps de chaussée et ni pour couches de forme.



Fig.64 Les échantillons des grains de grés de forme sous angulaire avant et après essai

IV.2 Le calcaire

A. Après essai

Les résultats de cet essai pour ce matériau sont regroupés dans le tableau suivant

Tab.7 Les coefficients MDE calculés pour chaque forme du calcaire

La forme du calcaire	La classe granulaire	Coefficient MDE
allongée	4-6,3	13%
	6,3-10	15%
	10-16	17 %
Sous arrondi	4-6,3	12,5%
	6,3-10	17%
	10-16	19%
Sous angulaire	4-6,3	15%
	6,3-10	18%
	10-16	20%

***Interprétation**

Les coefficients MDE obtenues pour les trois formes sont inférieurs à 20 ; donc ce matériau est utilisé pour les corps de chaussée et comme il est inférieur à 45, il peut être utilisé pour les couches de forme.



Fig.65 Les échantillons de calcaire de forme sous angulaire avant et après essai

IV.3.Le schiste

A. Après essai

Les résultats de cet essai pour ce matériau sont regroupés dans le tableau suivant :

Tab.8 Les coefficients MDE calculés pour chaque forme du schiste

La forme du schiste	La classe granulaire	Coefficient MDE
allongée	4-6,3	53%
	6,3-10	67%
	10-16	80%
Sous arrondi	4-6,3	51
	6,3-10	72%
	10-16	84%
Sous angulaire	4-6,3	49%
	6,3-10	69%
	10-16	79%

***Interprétation**

Les coefficients MDE des trois formes des grains de gré sont très élevés surtout pour la forme sous arrondi et ils sont supérieurs à 20 et supérieurs à 45 ; donc notre matériau n'est pas utilisable pour les corps de chaussée et ni pour les couches de forme.

5. Essai LOS ANGELES norme P18-573

-L'essai **LOS ANGELES** permet de mesurer la résistance aux chocs des granulats.

-Mode opératoire : Le matériau (5 Kg) est mis dans un cylindre horizontal de 70 cm de diamètre tournant selon son axe (500 tours), et muni d'une plaque radiale soudée à l'intérieur du cylindre suivant une génératrice. Un certain nombre de boulets de fonte est ajouté dans le cylindre.

Classes granulaires mm	Nombre de boulets	Masse totale de la charge g	
4 — 6,3	7	3 080	+ 20
6,3 — 10	9	3 960	à
10 — 14	11	4 840	- 150
10 — 25	11	4 840	+ 20
16 — 31,5	12	5 280	à
25 — 50	12	5 280	- 150

Lors de la rotation du cylindre (vitesse = 30 T/min), le matériau tombe en même temps que les boulets qui par percussion fragmentent les granulats. L'essai se termine par un tamisage des particules inférieures à 1,6 mm.

-Expression des résultats : Connaissant la granularité et la fraction du matériau avant l'essai, on mesure à la sortie de la machine la quantité de fines produites par la fraction boulet.

Le coefficient Los Angeles est par définition : **LA = 100 (5000 - M') / 5000**

M' : Refus du tamis 1.6 mm.

5000 = 5Kg de matériaux utilisés dans l'appareil Los Angeles.

LA < 25 → matériaux à utiliser dans les corps de chaussées.

LA < 45 → matériaux pour couche de forme.

Plus LA est élevé, plus le matériau a subi une usure importante

5.1. Le grès

A. Avant essai

Classe granulaire	La messe de l'échantillon	La charge abrasive		Nombre de boules
4- 6,3	5000 g	3080	+ 20	7
6,3-10		3960	à	9
10-16		4840	-150	11

B. Après essai Les résultats de cet essai pour ce matériau sont regroupés dans le tableau suivant

Tab.9 Les coefficients LA calculés pour chaque forme des grains de grés

La forme du gré	La classe granulaire	Coefficient LA
allongée	4-6,3	93 %
	6,3-10	98 %
	10-16	95 %
Sous arrondi	4-6,3	92 %
	6,3-10	99 %
	10-16	94 %
Sous angulaire	4-6,3	95 %
	6,3-10	97%
	10-16	95 %

***Interprétation**

Les coefficients LA des trois formes des grains de grés sont très élevés (93%,95%,97%...) et ils sont supérieurs à 45, donc notre matériau n'est pas utilisable pour les corps de chaussée ni pour les couches de forme.



Fig.66 Les échantillons des grains de grés de forme sous angulaire avant et après essai

5.2. Le calcaire

A. Après essai

Tab.10 Les coefficients LA calculés pour chaque forme du calcaire

La forme du calcaire	La classe granulaire	Coefficient LA
allongée	4-6,3	23 %
	6,3-10	38 %
	10-16	27 %
Sous arrondi	4-6,3	20 %
	6,3-10	22 %
	10-16	21 %
Sous angulaire	4-6,3	23 %
	6,3-10	24 %
	10-16	4 %

***Interprétation**

Les coefficients LA des trois formes sont supérieurs à 20 et inférieurs à 45 donc notre matériau est utilisable uniquement pour les couches de forme. Mais le coefficient LA de la forme sous angulaire de la classe (10-16) est inférieur à 20 (4 %) donc le calcaire sous angulaire de classe (10-16) est utilisable dans les corps de chaussée.



Fig.67 Les échantillons de calcaire de forme sous arrondi avant et après essai

5. 3. Le schiste

Après essai

Tab.11 Les coefficients MDE calculés pour chaque forme du schiste

La forme du schiste	La classe granulaire	Coefficient LA
Allongée	4-6,3	29 %
	6,3-10	34%
	10-16	40%
Sous arrondi	4-6,3	28%
	6,3-10	32%
	10-16	39%
Sous angulaire	4-6,3	30%
	6,3-10	31%
	10-16	40%

***Interprétation**

Les coefficients LA des trois formes sont supérieurs à 20 et inférieurs à 45 (29%,32%,39%...) donc notre matériau est utilisable pour les couches de forme



Fig.68 Les échantillons de schiste de forme sous angulaire avant et après essai

6. Conclusion

Les résultats obtenus à partir des essais routiers sur les différents matériaux, nous permettent de classer les matériaux comme suit :

-le gré est un matériau peu dégradable, fragmentable et n'est pas utilisable pour les ouvrages routiers.

-le calcaire est un matériau peu dégradable, peu fragmentable et qui peut être utilisé dans les ouvrages routiers.

-le schiste est un matériau peu dégradable, peu fragmentable et qui peut être utilisé au moins comme couche de forme.

Les grains de sol subissent un écrasement lors de réalisation des essais, trois modes de rupture prédominant ont été observés (l'abrasion, l'écaillage et la fracture) qui se différencient d'un matériau à un autre.

L'écrasement des grains est influencé par le type de sollicitation appliquée (c'est-à-dire le type d'essai) et la nature de matériau étudié. Dans le cas de cette étude les trois matériaux étudiés présentent des écrasements différents selon le type d'essai comme le montre le tableau suivant :

Tab.12 : les différents écrasements observés durant les essais appliqués

Type d'essai Le matériau	dégradabilité	fragmentabilité	Micro Deval	Los Angeles
La Grés	Abrasion	Fracture	Ecaillage	Fracture
Calcaire	Abrasion	Ecaillage	Abrasion	Fracture
Schiste	Fracture	Fracture	Ecaillage	Fracture

Le comportement mécanique des grains est influencé par la présence d'eau par exemple dans l'essai MICRO DEVAL l'eau a ramollie la surface superficielle des grains, ce qui a facilité leur écrasement et a changé la dimension des grains.

CHAPITRE V

CALCUL DE LA DIMENSION FRACTALE

1. Introduction

Il existe plusieurs méthodes pour la détermination de la dimension fractales des grains d'où la mesure de la rugosité des particules.

La méthode la plus commode qui lie la dimension fractale à la fragmentation des grains est la méthode des masses, qui prend en compte la distribution granulaire et la masse des grains de chaque diamètre.

Pour la méthode des masses, elle est calculée en utilisant l'analyse granulométrique d'un échantillon de sol. L'avantage de cette méthode est que l'on puisse utiliser les données de la courbe granulométrique. Un autre avantage de cette méthode est que DFR tient compte de plus de points dans la courbe granulométrique que les autres méthodes. En conséquence, la valeur de DFR qui est déterminée peut représenter une distribution de grandeurs plus précises

2. Détermination de la Dimension fractale par la méthode des masses

Le calcul de la dimension fractale pour les matériaux utilisés par la méthode des masses se fera en fonction de la granulométrie et du type de matériau choisi.

Le principe du tracé de la courbe granulométrique théorique, consiste à introduire les données numériques à savoir les refus cumulés (q_n), le rapport r/r_L ; d'autre part des graphes logarithmiques avec application des lois en puissance seront représentés pour le calcul de la dimension fractale par les masses des échantillons en fonction des diamètres des tamis.

2.1. Présentation des résultats concernant la détermination de la dimension fractale

a- Avant essai de fragmentabilité, matériau gré allongée de masse totale $M_t=2000g$

Tab. 13 : Masses cumulatives $M(R<r)/M_T$ en fonction des rapports de diamètre des tamis r/r_L du matériau gré pour la granulométrie 10/20 avant essai de fragmentabilité

DIAMETRE	Masses (gr)	r/r_L	tamisât cumules	$M(R<r)/M_T$
20	929	1	1071	0,5355
16	521	0,8	550	0,275
12,5	400	0,625	150	0,075
10	150	0,5	0	0

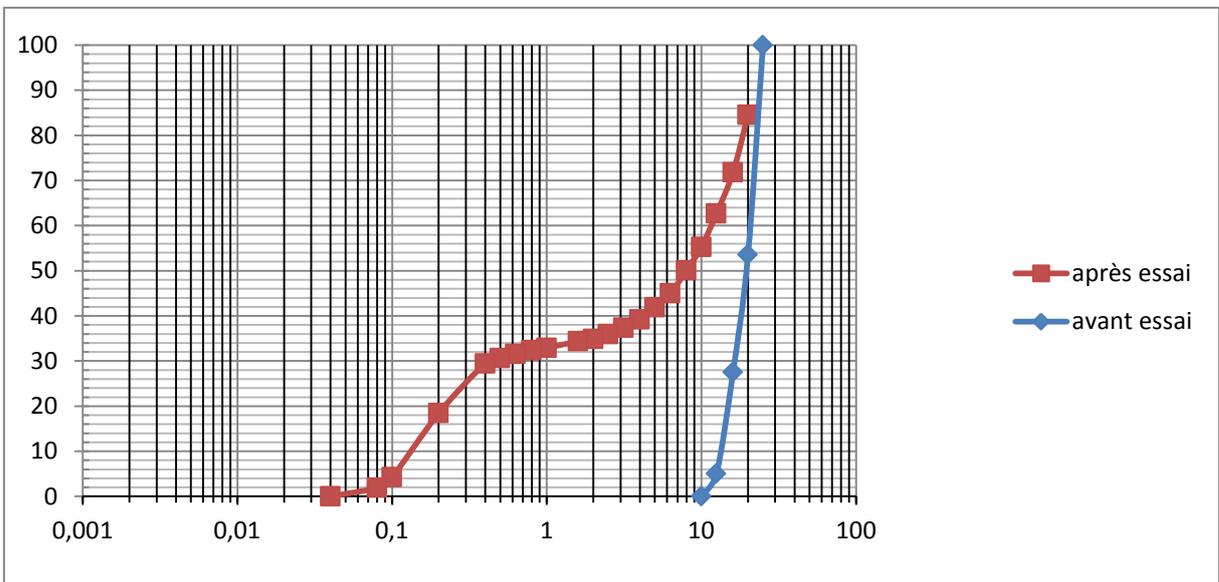


Fig.69 Courbe granulométrique du matériau gré de classe granulaire (10/20) avant et après essai de fragmentation

b-Après essai : la masse totale $M_t=1999,6$

Tab.14 : Masses cumulatives $M(R<r)/M_T$ en fonction des rapports de diamètres des tamis r/r_L du matériau gré pour la granulométrie 10/20 après essai de fragmentabilité.

diamètre	Masses (gr)	r/r_L	tamisât cumules	$M(R<r)/M_T$
20	774,5	1	1225,1	0,612672535
16	637,2	0,8	587,9	0,294008802
12,5	367,6	0,625	220,3	0,110172034
10	179,6	0,5	40,7	0,020354071
8	14,4	0,4	26,3	0,013152631
6,3	2	0,315	24,3	0,01215243
5	1,5	0,25	22,8	0,01140228
4	1,1	0,2	21,7	0,01085217
3,15	0,6	0,1575	21,1	0,01055211
2	0,4	0,1	20,7	0,01035207
1,6	0,1	0,08	20,6	0,01030206
1,25	0,2	0,0625	20,4	0,01020204
1	0,2	0,05	20,2	0,01010202
0,63	0,3	0,0315	19,9	0,00995199
0,4	0,4	0,02	19,5	0,00975195
0,315	0,7	0,01575	18,8	0,00940188
0,2	2,3	0,01	16,5	0,00825165
0,16	4,7	0,008	11,8	0,00590118
0,12	0,6	0,006	11,2	0,00560112
0,08	3,6	0,004	7,6	0,00380076
0,04	7,6	0,002	0	0

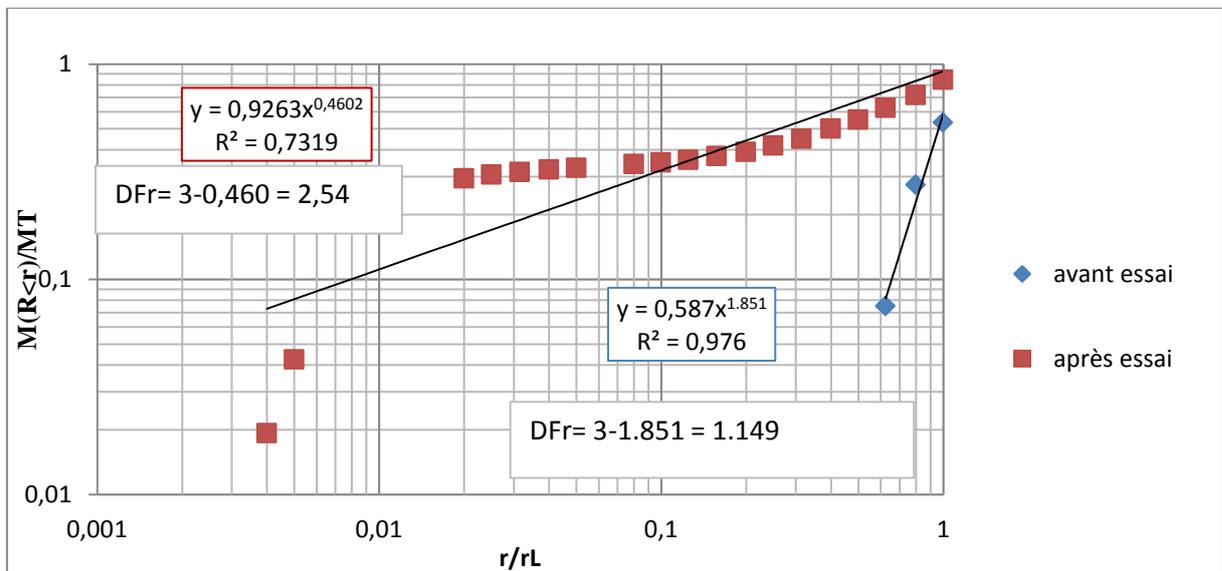


Fig.70 Détermination de la dimension fractale DFR du gré allongé par la méthode des masses avant et après essai de fragmentabilité

D'après les Figures (69), nous constatons que la dimension fractale de fragmentation DF_R calculée par la méthode des masses pour le matériau gré augmente de 1.149 à 2.54 et cela pour une granulométrie étalée.

Les résultats obtenus de la dimension fractale calculée par la méthode des masses avant et après chaque essai sont regroupés dans les tableaux (14), (15) et (16) :

Tab.15 Les résultats de la dimension fractale du gré avant et après chaque essai.

Essai	Classe avant essai	Forme	Avant essai	Après essai
Fragmentabilité	10-20	Sous angulaire	1.149	2,543
		Allongé		2.54
		Sous arrondi		2,545
Dégradabilité	10-20	Sous angulaire	1.149	2,379
		Allongé		2.451
		Sous arrondi		2,447
Micro Deval	4-6.3	Sous angulaire	0.678	0.908
		Allongé		0.892
		Sous arrondi		0.876
	6.3-10	Sous angulaire	1.081	1.471
		Allongé		1.228
		Sous arrondi		1.257
	10-16	Sous angulaire	1.285	2.273
		Allongé		2.180
		Sous arrondi		2.093
Los Angeles	4-6.3	Sous angulaire	0.678	0.985
		Allongé		1.000
		Sous arrondi		0.886
	6.3-10	Sous angulaire	1.081	1.856
		Allongé		1.900
		Sous arrondi		1.828
	10-16	Sous angulaire	1.285	2.063
		Allongé		2.042
		Sous arrondi		2.000

***Interprétation des résultats du gré :**

-Pour l'essai de fragmentabilité : on remarque que la dimension fractale augmente considérablement de 1,149 à 2,545.

-Pour l'essai de dégradabilité : on remarque que la dimension fractale augmente de 1,149 à 2,451. Cette dimension fractale est appelée dimension fractale de fragmentation DF_R , d'après Turcotte (1986), une dimension fractale qui atteint la valeur de 2,5 nous amène à dire que la fragmentation est pure, plus la fragmentation est importante plus la dimension fractale tend vers 3 cette dimension fractale est appelée dimension fractale de fragmentation.

-Pour l'essai Micro Deval : on remarque une augmentation de la dimension fractale surtout pour la forme sous angulaire (classe 10-16) de 1,285 à 2,273

-Pour l'essai Los Angeles : on remarque l'augmentation de la dimension fractale surtout celle du gré sous angulaire (classe 10-16) de 1,285 à 2,063.

Les valeurs élevées de cette dimension indique que l'échantillon est fractal ou à une plus grande quantité de particules fines. Une caractéristique remarquable de la dimension fractale, est que DF_R augmente toujours après l'essai.

-L'essai qui donne une DFR plus grande est l'essai de fragmentabilité (classe 10-20) (avant essai $DFR=1.149$, après essai $DFR=2.545$).

-L'essai qui donne une DFR plus petite est l'essai Micro Deval (classe 4-6.3) (avant essai $DFR=0.678$ après essai $DFR=0.876$).

Tab.16 : Les résultats de la dimension fractale du calcaire avant et après chaque essai.

Essai	Classe avant essai	Forme	Avant essai	Après essai
Fragmentabilité	10-20	Sous angulaire	1.149	2,064
		Allongé		1.544
		Sous arrondi		1.783
Dégradabilité	10-20	Sous angulaire	1.149	2,008
		Allongé		2,138
		Sous arrondi		1.834
Micro Deval	4-6.3	Sous angulaire	0.678	0.701
		Allongé		0.689
		Sous arrondi		0.681
	6.3-10	Sous angulaire	1.081	1.051
		Allongé		1.003
		Sous arrondi		0.961
	10-16	Sous angulaire	1.285	1.209
		Allongé		1.183
		Sous arrondi		1.140
Los Angeles	4-6.3	Sous angulaire	0.678	0.692
		Allongé		0.637
		Sous arrondi		0.623
	6.3-10	Sous angulaire	1.081	1.228
		Allongé		1.215
		Sous arrondi		1.197
	10-16	Sous angulaire	1.285	1.471
		Allongé		1.593
		Sous arrondi		1.553

*** Interprétation des résultats du calcaire**

-Pour l'essai de fragmentabilité : on remarque que la dimension fractale augmente considérablement de 1,149 à 2,064.

-Pour l'essai de dégradabilité : on remarque que la dimension fractale augmente de 1,149 à 2,138.

-Pour l'essai Micro Deval : on remarque l'augmentation de la dimension fractale surtout pour la forme sous angulaire (classe 4-6.3) de 0,678 à 0.701.

On remarque que la dimension fractale du calcaire de classe (6.3-10) et (10-16) diminue surtout pour la forme sous arrondi classe (4-6.3) de 1.081 à 0.961.

-Pour l'essai Los Angeles : on remarque que la dimension fractale des grains de calcaire de forme allongée (classe 10-16) augmente de 1,285 à 1.593 et on remarque une diminution de 0.678 à 0.623 pour la forme sous arrondi (classe 4-6.3)

Les valeurs élevées de cette dimension indique que l'échantillon est fractal ou à une plus grande quantité de particules fines. Une caractéristique remarquable de la dimension fractale, est que DF_R augmente toujours après l'essai sauf pour certaines classes. Cette diminution indique que l'échantillon n'est pas fragmentable et y a pas de production de particules fines.

-L'essai qui donne une DFR plus grande est l'essai de dégradabilité (avant essai $DFR=1.149$, après essai $DFR=2.138$).

-L'essai qui donne une DFR plus petite est l'essai Los Angeles (avant essai $DFR=0.678$ après essai $DFR=0.623$).

Tab.17 : Les résultats de la dimension fractale du schiste avant et après chaque essai

Essai	Classe avant essai	Forme	Avant essai	Après essai
Fragmentabilité	10-20	Sous angulaire	1.149	2,113
		Allongé		2,09
		Sous arrondi		2,142
Dégradabilité	10-20	Sous angulaire	1.149	1.695
		Allongé		1,707
		Sous arrondi		1.528
Micro Deval	4-6.3	Sous angulaire	0.678	1.644
		Allongé		1.635
		Sous arrondi		1.630
	6.3-10	Sous angulaire	1.081	1.911
		Allongé		1.845
		Sous arrondi		1.777
	10-16	Sous angulaire	1.285	2.030
		Allongé		1.986
		Sous arrondi		1.930
Los Angeles	4-6.3	Sous angulaire	0.678	0.749
		Allongé		1.739
		Sous arrondi		1.741
	6.3-10	Sous angulaire	1.081	1.449
		Allongé		1.5
		Sous arrondi		1.437
	10-16	Sous angulaire	1.285	1.870
		Allongé		1.828
		Sous arrondi		1.790

***Interprétation des résultats du schiste**

-Pour l'essai de fragmentabilité : on remarque que la dimension fractale augmente considérablement de 1,149 à 2.142.

-Pour l'essai de dégradabilité : on remarque que la dimension fractale augmente de 1,149 à 1.707.

-Pour l'essai Micro Deval : on remarque l'augmentation de la dimension fractale surtout pour la forme sous angulaire (classe 10-16) de 1,285 à 2.030.

-Pour l'essai Los Angeles : on remarque que la dimension fractale augmente de 1,285 à 1.870 pour la (classe 10-16).

-L'essai qui donne une DFR plus grande est l'essai de fragmentabilité (avant essai DFR=1.149, après essai DFR=2.142).

-L'essai qui donne une DFR plus petite est l'essai Los Angeles (avant essai DFR=0.678 après essai DFR=0.749).

*** Comparaison de la dimension fractale des trois matériaux**

*Le matériau qui a la plus grande DFR est le gré ; c'est le matériau le plus fragmentable.

*Le matériau qui a une DFR la plus petite est le calcaire ; c'est le matériau le moins fragmentable.

*L'essai qui donne une DFR plus petite est l'essai Los Angeles (matériau calcaire ; après essai 0.623).

L'essai qui donne une DFR plus grande est l'essai de fragmentabilité (matériau gré ; après essai DFR=2.545).

*La forme qui donne une DFR plus grande est la forme sous angulaire (matériau gré ; DFR=2.545)

*La forme qui donne une DFR plus petite est la forme sous arrondi (matériau calcaire ; DFR=1.092).

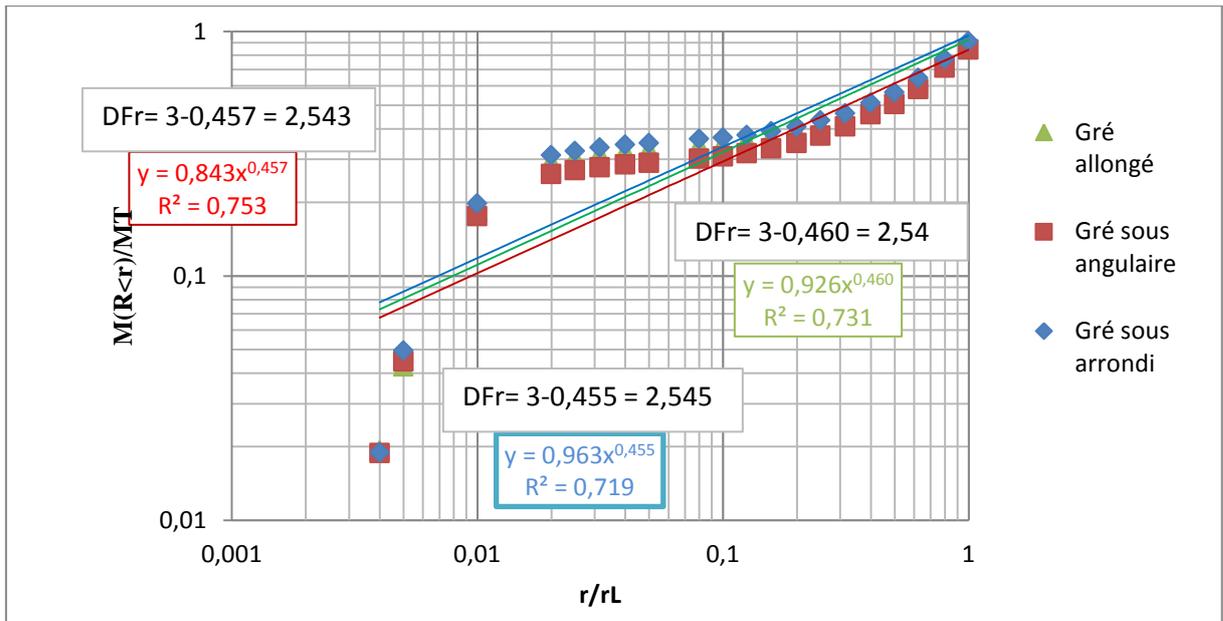


Fig.71 : Influence de la forme du gré sur la dimension fractale des grains sous l'essai de fragmentabilité.

On remarque que les dimensions fractales de gré sous l'essai de fragmentabilité selon les trois formes étudiées présentent les mêmes allures (DFR sous arrondi=DFR sous angulaire=DFR allongée).

Donc la forme des grains n'a pas d'influence sur la dimension fractale.

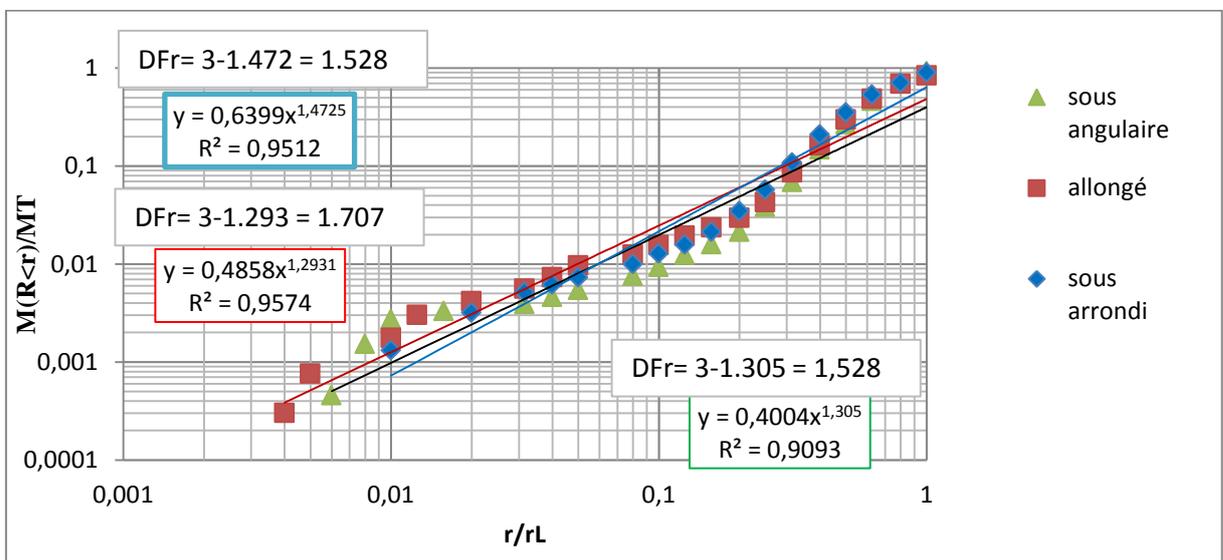


Fig.72 : Influence de la forme du schiste sur la dimension fractale des grains sous l'essai de dégradabilité.

On remarque que la dimension fractale des grains de schiste allongés est égale à la dimension fractale des grains de schiste sous angulaires qui sont supérieures à celle des grains de schiste

sous arrondi. Les formes les plus fragmentables sous l'essai de dégradabilité sont la forme allongée et la forme sous angulaire.

La dimension fractale des grains sous l'essai de dégradabilité est plus importante pour les formes allongée et sous angulaire.

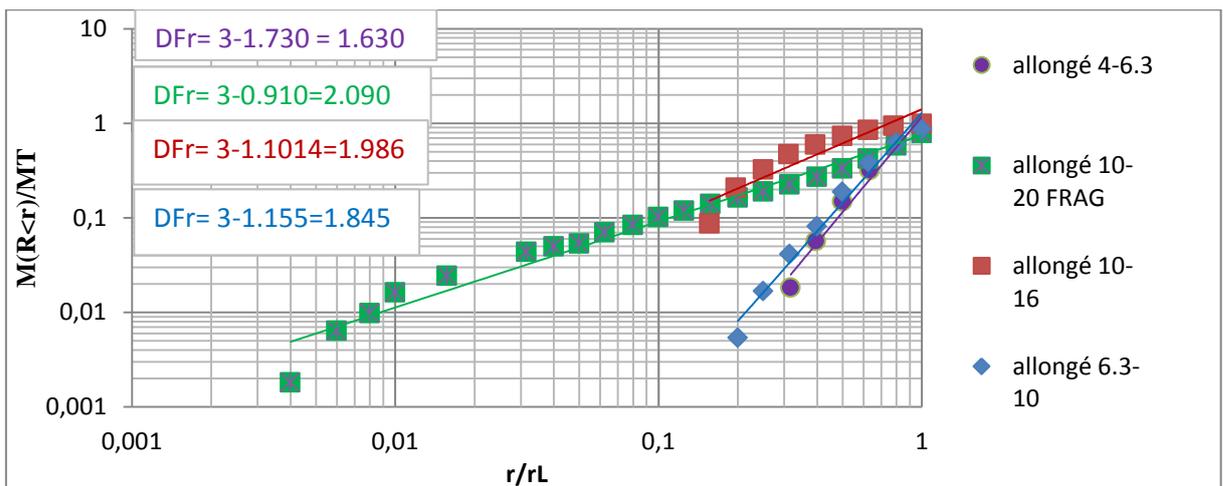
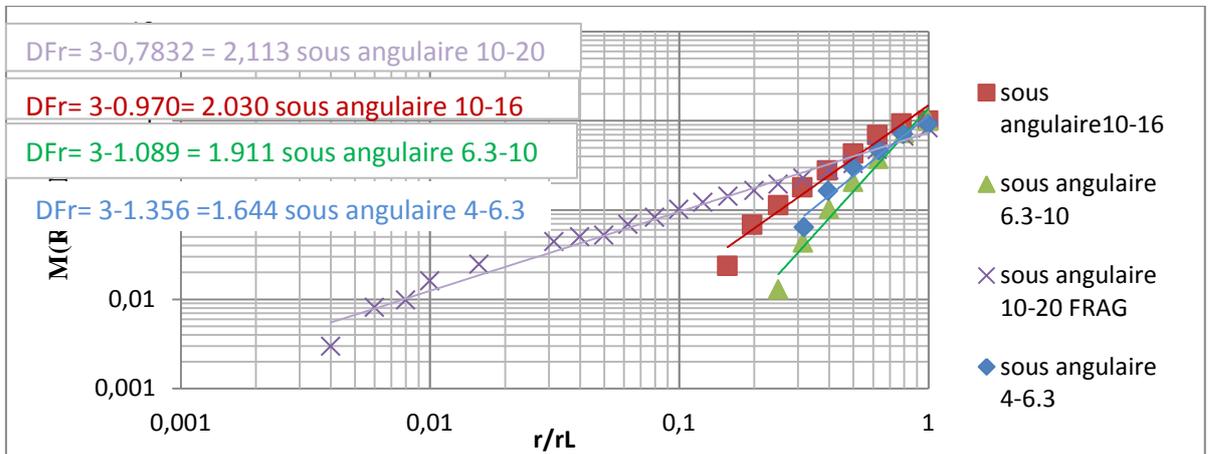
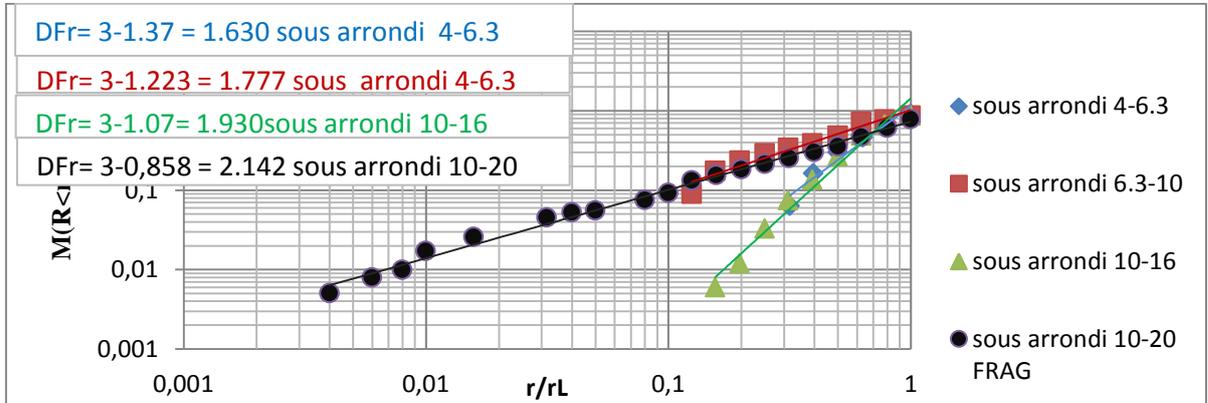


Fig.73 : Influence de la forme du schiste et la classe granulaire sur la dimension fractale des grains sous les essais MICRO DEVAL et fragmentabilité.

On remarque que les dimensions fractales des différentes formes de même classe sont presque égales par exemple : la classe 6.3-10 : DFR schiste allongée \approx DFR schiste sous angulaire $\approx 1,6$ et DFR schiste sous arrondi.

On remarque que les DFR des différentes formes de schiste classe 10-20 d'essai de fragmentabilité sont égaux.

La dimension fractale de schiste sous arrondi classe 10-16 est supérieure à la dimension fractale du schiste sous arrondi classe 6.3-10 qu'est aussi supérieure à celle de classe 4-6,3. Donc la classe 10-16 a plus de tendance à se fragmenter que les autres classes.

La dimension fractale est élevée lorsque la classe granulaire est grande. Cela est dû à la présence des fissures dans les gros grains ce qui engendre un taux d'écrasement plus élevé.

4. Conclusion

La méthode la plus commode qui lie la dimension fractale à la fragmentation des grains est la méthode des masses, qui prend en compte la distribution granulaire et la masse des grains de chaque diamètre.

Le calcul de la dimension fractale par la méthode des masses nous donne une vision générale sur le concept de la fractalité et son mode de calcul. D'après les échantillons choisis de (Grès ; calcaire ; Schiste), nous avons remarqué que la dimension fractale augmente toujours après les essais, et cela pour tous les types de matériaux utilisés.

Dans notre cas, le matériau grès a une dimension fractale plus importante que pour les deux matériaux schiste et calcaire. Lors du calcul de la dimension fractale de fragmentation *DFR* après les essais, le matériau grès et schiste sont plus fractals que le calcaire, car leur dimension fractale de fragmentation est plus importante.

La dimension fractale varie non seulement en fonction du matériau utilisé mais aussi en fonction de la classe granulaire de l'échantillon.

Pour la méthode des masses, la dimension fractale calculée est appelée dimension fractale de fragmentation, cette méthode nous donne une idée générale sur la distribution de la grandeur des grains du sol et du procédé de fragmentation. La valeur élevée de cette dimension indique que l'échantillon est fractal ou a une plus grande quantité de particules fines. Cette méthode dépend des paramètres suivants : type de matériau utilisé, la granulométrie et la masse de l'échantillon.

CONCLUSION GENERALE

Le but principal de ce travail est l'étude expérimentale de l'influence des caractéristiques des essais routiers sur la dimension fractale des grains des différents matériaux soumis aux différents essais.

Cette étude a conduit, dans un premier temps à la réalisation d'une série d'essais qui sont : l'essai de fragmentabilité, l'essai de dégradabilité, l'essai MICRO DEVAL ainsi que l'essai LOS ANGELES et dans un deuxième temps à mettre en évidence la notion de dimension fractale des grains en fonction de formes des grains et la classe granulaire de chaque essai pour chaque matériau.

Les principaux résultats obtenus permettent de tirer les conclusions suivantes :

La dimension fractale dépend des caractéristiques mécaniques des grains c-à-dire plus la dimension fractale est grande plus les différents coefficients (MDE, LA, FR, DG) sont élevés.

Les valeurs élevées de la dimension fractale d'un matériau signifient que ce matériau est fragmentable.

Dans notre cas le matériau grés a une dimension fractale plus importante que les deux matériaux schiste et calcaire, lors du calcul de la dimension fractale de fragmentation DF_R après les essais, le matériau grés et schiste sont plus fractal que le calcaire, car leurs dimension fractale de fragmentation est plus importante.

Ce travail n'est qu'une introduction au domaine des fractales, il nécessite d'autres recherches plus approfondies, pour caractériser et cerner mieux les modèles fractals dans les sols. Pour s'ouvrir beaucoup plus sur cette notion des fractales, nous conseillons nos chercheurs de travailler sur les méthodes de box counting et surfaces périmètres pour la détermination de la dimension fractale de rugosité DR , à condition d'utiliser des techniques très avancées pour la prise d'images des échantillons, et de travailler aussi sur la méthode des masses pour la détermination de la dimension fractale de fragmentation DF_R , à condition d'utiliser différentes classes granulométriques des matériaux avant et après essai et à des chargements variables, en général ces trois méthodes ont un rapport direct avec les essais et les études géotechniques.

Bibliographie :

-**KELOUCHE .A** (2010). Influence de la dimension fractale sur le cisaillement des grains à la boîte de casa grande. Mémoire de master-2- . Université MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU.

-**YEZLI SALIHA**(2011). Influence de la dimension fractale sur les caractéristiques mécaniques des matériaux. Mémoire de Magister. Université MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU

-**BELMIHOUBE HACENE**. Influence de la dimension fractale sur la perméabilité. Université MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU.

-**ACHIR MOURAD**(2011). Caractérisation du phénomène d'écrasement par l'étude de la dimension fractale des grains.

- **BENOIT MANDELBROT** Les objets fractals, Edition : Flammarion (Poche) 1975.

-**DAHOUMANE KAHINA** (2011). Détermination du taux d'écrasement des grains à partir des caractéristiques des courbes granulométriques. Mémoire de magister Université MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU

- **JEAN FRANÇOIS GOUYET** Préface de **B MANDELBROT**, (1992) "Physique et Structures Fractales", Edition Masson, Paris.

-**BENOIT, T.** (2005). Fractales et Autosimilarité » ; Université Plaise Pascal, Prix jeune chercheur 2005

-**SEDIK REZIKA**(2011). Caractérisation de la perméabilité des matériaux à l'écrasement. Mémoire de magister. Université MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU.

- **BOUZEBOUDJA ALDJIA**(2010). Influence de la forme des grains sur les caractéristiques du cisaillement. Mémoire de master-2- . Université MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU.

-**FRANCK ELMALEH. SON NGUYEN. KHANH-DANG NGUYEN THU-LAM. ANTOINE WOITIERTPE** (2002- 2003). Introduction aux fractales Lycée La Fontaine, Paris.

-**ALEXIS MAILLOUX ; JACQUES CHENARD** (2011). Les essais qualitatifs réalisés sur les enrobés et leurs constituants, Bitume Québec, LVM.ca.

-**CLAUDE ROBERT** (2010). Les exigences du MTQ sur les granulats et le comportement des matériaux, Direction du laboratoire des chaussées, Transport Québec.

-**FRED PORTET, OLIVIER NOEL** (2011). **Sylvie NICAISE. Et Carole PORTILLO.** La classification des sols, ENTE, Etablissement d'Aix et Ecole des Mines et Douai.

-**J.F. CORTE., S.H. EDME., A. FEVRE., D. GILOPPE., J. GIROUY., H. HAVARD., J.P. JOUBERT., G. MOREL., A. PERROT., B. DE PILLOT., J.-P. PUECH., D. PUIATTI., M. SCHAEFFNER. ET B. URCEL** (Juillet 2000). Réalisation des remblais et des couches de forme, Fascicule I, Principes généraux, Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, et Centre de la Sécurité et des Techniques Routières.

-**M.PANET ; C.TOURENQ** (Juillet 1971). Les essais de granulats. Connaissances actuelles et orientation des recherches, Bull, Liaison LCPC 53, référence 994.

- **GABRYSIK. F (2007)** - « Les Granulats » - Chapitre 2, 35 pages, Edition Académie de Nancy-Metz, Strasbourg **GAYE, M.G. (1995).** www.ac-nancy-metz.fr.

-**LERAU. J (2006)** - « Cours de Géotechnique 2 » Institut national des sciences appliquées de TOULOUSE, Département de Sciences et Technologies pour l'ingénieur.

-**MELBOUCI.B, AIT AIDER.H, LAMI.MO** (décembre 2004). Etude expérimentale et comportement rhéologique des matériaux locaux dans les corps de chaussée et dans les bétons. Rapport d'activité finale du projet de recherche en technologie.

- **TOURENQ, C. et DENIS, A., (1982)** «Les essais de granulats », Rapport de recherches LPC, N° 114, juillet 1982

- **REMY THIBAUD** (2001) "Utilisation Des Fractales Pour La Génération De Reliefs Aléatoires "Revue Française de l'Institut de Recherche de l'Ecole Navale, France.

- **KIDIYO KPALMA** "Caractérisation de Textures Par L'Anisotropie De La Dimension Fractale" Revue Française de l'Institut National des Sciences Appliquées Rennes.

- **TOURENQ, C. et DENIS, A. (1982).** Les essais de granulats », Rapport de recherches LPC, N° 114, juillet 1982

-JOSIANE LAJOIE (JUN 2006). La géométrie fractale. Mémoire présenté à l'université du Québec à Trois-Rivières comme exigence partielle de la maîtrise en mathématiques et informatique appliquées.

- **FRÉDÉRIC VIVIEN**. Les fractales. Lycée pierre corneille

-Les sites d'internet

<http://www.mathcurve.com/fractals/sierpinski/sierpinski.shtml>

<http://www.mathcurve.com/fractals/peano/peano.shtml>

<http://www.mathcurve.com/fractals/peano/peanogeneralisee.shtml>

<http://books.google.com/books?q=dimension+fractale&btnG=Chercher+des+livres&hl=fr>

<http://membres.lycos.fr/lesfractales/frame.html>

<http://www.ac-nancy-metz.fr>

ANNEXES

➤ Quelques photos des grains de différentes tailles avant et après les essais de fragmentabilité

- Le gré sous angulaire : D10 mm



- Le gré sous arrondi : D10 mm



- Le gré allongé : D20 mm



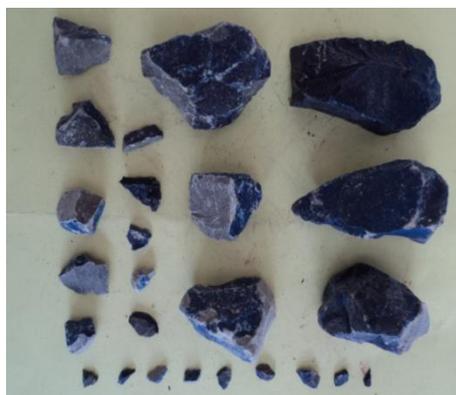
➤ **Le calcaire sous angulaire : D 12,5**



➤ **Le calcaire sous arrondi : D 20mm**



➤ **Le calcaire allongé : D 16**



➤ **Le schiste sous angulaire :**



➤ **Le schiste sous arrondi : 16 mm**



➤ **Le schiste allongé**



- Quelques photos des grains de différentes tailles avant et après les essais de dégradabilité
- Le calcaire allongé : D10mm



- Le schiste sous arrondi



- Le gré sous angulaire : D10mm



- Quelques tableaux des pourcentages des tamisâts cumulés après essai :
- Gré allongée d'essai dégradabilité :

DIAMETRE	REFUS (g)	REFUS cumulés	TAMISATS cumulés	tamisâts cumulés %
20	774,5	774,5	1225,1	61,26725345
16	637,2	1411,7	587,9	29,40088018
12,5	367,6	1779,3	220,3	11,01720344
10	179,6	1958,9	40,7	2,035407081
8	14,4	1973,3	26,3	1,315263053
6,3	2	1975,3	24,3	1,215243049
5	1,5	1976,8	22,8	1,140228046
4	1,1	1977,9	21,7	1,085217043
3,15	0,6	1978,5	21,1	1,055211042
2	0,4	1978,9	20,7	1,035207041
1,6	0,1	1979	20,6	1,030206041
1,25	0,2	1979,2	20,4	1,020204041
1	0,2	1979,4	20,2	1,01020204
0,63	0,3	1979,7	19,9	0,99519904
0,4	0,4	1980,1	19,5	0,975195039
0,315	0,7	1980,8	18,8	0,940188038
0,2	2,3	1983,1	16,5	0,825165033
0,16	4,7	1987,8	11,8	0,590118024
0,12	0,6	1988,4	11,2	0,560112022
0,08	3,6	1992	7,6	0,380076015
0	7,6	1999,6	0	0

➤ Gré sous angulaire d'essai dégradabilité

DIAMETRE	REFUS (g)	REFUS cumulés	TAMISATS cumulés	tamisâts cumulés %
20	785,3	785,3	1209,3	60,47709542
16	529,8	1315,1	679,5	33,98179636
12,5	474,9	1790	204,6	10,23204641
10	156,7	1946,7	47,9	2,395479096
8	21,2	1967,9	26,7	1,335267053
6,3	3,1	1971	23,6	1,180236047
5	0,7	1971,7	22,9	1,145229046
4	3,6	1975,3	19,3	0,965193039
3,15	0,7	1976	18,6	0,930186037
2	0,4	1976,4	18,2	0,910182036
1,6	0,1	1976,5	18,1	0,905181036
1,25	0,1	1976,6	18	0,900180036
1	0,2	1976,8	17,8	0,890178036
0,63	0,2	1977	17,6	0,880176035
0,315	0,8	1977,8	16,8	0,840168034
0,2	2,5	1980,3	14,3	0,715143029
0,16	4,1	1984,4	10,2	0,51010202
0,08	3,6	1988	6,6	0,330066013
0	6,6	1994,6	0	0

➤ Gré sous arrondi d'essai dégradabilité

DIAMETRE	REFUS (g)	REFUS cumulés	TAMISATS cumulés	tamisâts cumulés %
20	770	770	1224,6	61,24224845
16	678,1	1448,1	546,5	27,33046609
12,5	356,3	1804,4	190,2	9,51190238
10	159,8	1964,2	30,4	1,520304061
8	7,6	1971,8	22,8	1,140228046
6,3	2	1973,8	20,8	1,040208042
5	0,1	1973,9	20,7	1,035207041
4	0,6	1974,5	20,1	1,00520104
3,15	0,6	1975,1	19,5	0,975195039
2	0,1	1975,2	19,4	0,970194039
1,6	0,2	1975,4	19,2	0,960192038
1,25	0,1	1975,5	19,1	0,955191038
1	0,2	1975,7	18,9	0,945189038
0,63	0,3	1976	18,6	0,930186037
0,315	0,6	1976,6	18	0,900180036
0,2	2	1978,6	16	0,800160032
0,16	2,7	1981,3	13,3	0,665133027
0,08	3,1	1984,4	10,2	0,51010202
0	7,4	1991,8	2,8	0,140028006

➤ Gré allongée d'essai fragmentabilité

DIAMETRE	REFUS (g)	REFUS cumulés	TAMISATS cumulés	tamisats cumulés %
20	305,8	305,8	1668,3	84,50939669
16	250,8	556,6	1417,5	71,80487311
12,5	180,5	737,1	1237	62,66146598
10	146,3	883,4	1090,7	55,2504939
8	101,5	984,9	989,2	50,10891039
6,3	101,5	1086,4	887,7	44,96732688
5	61,5	1147,9	826,2	41,85198318
4	53,1	1201	773,1	39,16214984
3,15	35,6	1236,6	737,5	37,35879641
2,5	28,5	1265,1	709	35,91510055
2	20,1	1285,2	688,9	34,89691505
1,6	10,3	1295,5	678,6	34,3751583
1	28,5	1324	650,1	32,93146244
0,8	10,6	1334,6	639,5	32,39450889
0,63	16,1	1350,7	623,4	31,57894737
0,5	18,1	1368,8	605,3	30,66207386
0,4	23,7	1392,5	581,6	29,46152677
0,2	217,5	1610	364,1	18,44384783
0,1	280,2	1890,2	83,9	4,250037992
0,08	45,8	1936	38,1	1,929993415
0	38,1	1974,1	0	0

➤ Gré sous angulaire d'essai fragmentabilité

DIAMETRE	REFUS (g)	REFUS cumulés	TAMISATS cumulés	tamisats cumulés %
20	309,5	309,5	1679,7	84,4409813
16	263,6	573,1	1416,1	71,18942288
12,5	260,8	833,9	1155,3	58,07862457
10	151,4	985,3	1003,9	50,46752463
8	93	1078,3	910,9	45,7922783
6,3	96,5	1174,8	814,4	40,94108184
5	69,3	1244,1	745,1	37,45726925
4	50,2	1294,3	694,9	34,93364166
3,15	34,9	1329,2	660	33,1791675
2,5	28	1357,2	632	31,77156646
2	19,9	1377,1	612,1	30,77116429
1,6	11,2	1388,3	600,9	30,20812387
1	24,5	1412,8	576,4	28,97647295
0,8	8,5	1421,3	567,9	28,54916549
0,63	14,1	1435,4	553,8	27,84033782
0,5	16	1451,4	537,8	27,03599437
0,4	18,7	1470,1	519,1	26,09591796
0,2	170,1	1640,2	349	17,5447416
0,1	260,3	1900,5	88,7	4,459079027
0,08	51,2	1951,7	37,5	1,885179972
0	37,5	1989,2	0	0

➤ Gré sous arrondi d'essai fragmentabilité

DIAMETRE	REFUS (g)	REFUS cumulés	TAMISATS cumulés	tamisâts cumulés %
20	173,6	173,6	1810	91,24823553
16	271,4	445	1538,6	77,56604154
12,5	253,5	698,5	1285,1	64,78624723
10	164,4	862,9	1120,7	56,49828594
8	103,8	966,7	1016,9	51,26537608
6,3	97	1063,7	919,9	46,37527727
5	59	1122,7	860,9	43,40088728
4	50,4	1173,1	810,5	40,86005243
3,15	33,9	1207	776,6	39,15103852
2,5	27,6	1234,6	749	37,75962896
2	18	1252,6	731	36,85218794
1,6	8,2	1260,8	722,8	36,43879814
1	27,2	1288	695,6	35,06755394
0,8	10,3	1298,3	685,3	34,54829603
0,63	18,2	1316,5	667,1	33,63077233
0,5	21,8	1338,3	645,3	32,53176044
0,4	24,1	1362,4	621,2	31,31679774
0,2	227,7	1590,1	393,5	19,83766888
0,1	295,2	1885,3	98,3	4,955636217
0,08	60,6	1945,9	37,7	1,900584795
0	37,7	1983,6	0	0

➤ Schiste allongée essai dégradabilité

DIAMETRE	REFUS (g)	REFUS cumulés	TAMISATS cumulés	tamisâts cumulés %
20	310,9	310,9	1670,8	84,31144977
16	301,9	612,8	1368,9	69,07705505
12,5	405,7	1018,5	963,2	48,60473331
10	373,8	1392,3	589,4	29,74214059
8	267,7	1660	321,7	16,23353686
6,3	151	1811	170,7	8,61381642
5	85,7	1896,7	85	4,289246606
4	26,5	1923,2	58,5	2,9520109
3,15	11,6	1934,8	46,9	2,366654892
2,5	8,3	1943,1	38,6	1,947822577
2	7,6	1950,7	31	1,564313468
1,6	6,3	1957	24,7	1,246404602
1	5,5	1962,5	19,2	0,968865116
0,8	4,7	1967,2	14,5	0,731695009
0,63	3,4	1970,6	11,1	0,560125145
0,4	2,8	1973,4	8,3	0,418832316
0,25	2,3	1975,7	6	0,302770349
0,2	2,5	1978,2	3,5	0,176616037
0,1	2	1980,2	1,5	0,075692587
0,08	0,9	1981,1	0,6	0,030277035
0	0,6	1981,7	0	0

➤ Schiste sous arrondi dégradabilité

DIAMETRE	REFUS (g)	REFUS cumulés	TAMISATS cumulés	tamisâts cumulés %
20	202,6	202,6	1777,7	89,76922688
16	375,4	578	1402,3	70,81250316
12,5	343,9	921,9	1058,4	53,44644751
10	362,4	1284,3	696	35,14618997
8	282	1566,3	414	20,90592334
6,3	198,7	1765	215,3	10,87209009
5	102,1	1867,1	113,2	5,71630561
4	44,4	1911,5	68,8	3,474221078
3,15	26,7	1938,2	42,1	2,125940514
2,5	11	1949,2	31,1	1,570469121
2	5,8	1955	25,3	1,277584204
1,6	5,5	1960,5	19,8	0,999848508
1	5,4	1965,9	14,4	0,727162551
0,8	2,2	1968,1	12,2	0,616068272
0,63	2	1970,1	10,2	0,515073474
0,4	3,9	1974	6,3	0,318133616
0,2	3,7	1977,7	2,6	0,131293238
0	2,6	1980,3	0	0

➤ Schiste allongée essai fragmentabilité

DIAMETRE	REFUS (g)	REFUS cumulés	TAMISATS cumulés	tamisâts cumulés %
20	420,3	420,3	1560,2	78,77808634
16	410,9	831,2	1149,3	58,0308003
12,5	313,5	1144,7	835,8	42,20146428
10	179,5	1324,2	656,3	33,13809644
8	119,5	1443,7	536,8	27,1042666
6,3	91,2	1534,9	445,6	22,49936885
5	68,2	1603,1	377,4	19,05579399
4	51,9	1655	325,5	16,43524363
3,15	48,4	1703,4	277,1	13,99141631
2,5	40,5	1743,9	236,6	11,94647816
2	34,7	1778,6	201,9	10,19439535
1,6	35,6	1814,2	166,3	8,396869477
1,25	27,7	1841,9	138,6	6,99823277
1	32,7	1874,6	105,9	5,347134562
0,8	6,8	1881,4	99,1	5,003786922
0,63	12,6	1894	86,5	4,367583943
0,315	38,1	1932,1	48,4	2,443827316
0,2	16,3	1948,4	32,1	1,620802828
0,16	12,7	1961,1	19,4	0,979550619
0,12	6,7	1967,8	12,7	0,641252209
0,08	9,1	1976,9	3,6	0,18177228
0	3,6	1980,5	0	0

➤ Schiste sous angulaire d'essai fragmentabilité

DIAMETRE	REFUS (g)	REFUS cumulés	TAMISATS cumulés	tamisâts cumulés %
20	346,2	346,2	1647,2	82,63268787
16	313,6	659,8	1333,6	66,90077255
12,5	390,4	1050,2	943,2	47,31614327
10	285,5	1335,7	657,7	32,9938798
8	102,2	1437,9	555,5	27,86696097
6,3	102,4	1540,3	453,1	22,73000903
5	65,4	1605,7	387,7	19,4491823
4	59,4	1665,1	328,3	16,46934885
3,15	46,5	1711,6	281,8	14,13665095
2,5	40,5	1752,1	241,3	12,10494632
2	39,3	1791,4	202	10,13344035
1,6	38,1	1829,5	163,9	8,222133039
1,25	27,2	1856,7	136,7	6,85763018
1	33,4	1890,1	103,3	5,182100933
0,8	4	1894,1	99,3	4,981438748
0,63	11,3	1905,4	88	4,414568075
0,315	38,9	1944,3	49,1	2,463128323
0,2	17,1	1961,4	32	1,605297482
0,16	12,5	1973,9	19,5	0,978228153
0,12	3,4	1977,3	16,1	0,807665295
0,08	10,2	1987,5	5,9	0,295976723
0,04	5,9	1993,4	0	0

➤ Schiste sous arrondie Fragmentabilité

DIAMETRE	REFUS (g)	REFUS cumulés	TAMISATS cumulés	tamisâts cumulés %
20	418,24	418,24	1573,41	79,00032636
16	354,94	773,18	1218,47	61,178922
12,5	277,6	1050,78	940,87	47,24073005
10	223,65	1274,43	717,22	36,01134738
8	113,12	1387,55	604,1	30,33163457
6,3	98,35	1485,9	505,75	25,39351794
5	76,68	1562,58	429,07	21,54344388
4	62,02	1624,6	367,05	18,42944292
3,15	55,82	1680,42	311,23	15,62674165
2,5	45,53	1725,95	265,7	13,34069741
2	80,7	1806,65	185	9,288780659
1,6	34,6	1841,25	150,4	7,551527628
1	39,3	1880,55	111,1	5,578289358
0,8	6,3	1886,85	104,8	5,261968719
0,63	13,9	1900,75	90,9	4,564054929
0,315	39,3	1940,05	51,6	2,59081666
0,2	17,2	1957,25	34,4	1,727211106
0,16	14,5	1971,75	19,9	0,999171541
0,12	4	1975,75	15,9	0,79833304
0,08	5,8	1981,55	10,1	0,507117214
0,04	10,1	1991,65	0	0

➤ Schiste sous angulaire essai dégradabilité

DIAMETRE	REFUS (g)	REFUS cumulés	TAMISATS cumulés	tamisâts cumulés %
20	146,07	146,07	1825,46	92,59103336
16	426,12	572,19	1399,34	70,97736276
12,5	491,22	1063,41	908,12	46,06168813
10	384,19	1447,6	523,93	26,57479217
8	234,33	1681,93	289,6	14,68909933
6,3	154,66	1836,59	134,94	6,844430468
5	59,61	1896,2	75,33	3,820890374
4	33,35	1929,55	41,98	2,129310738
3,15	10,59	1940,14	31,39	1,592164461
2,5	6,99	1947,13	24,4	1,237617485
2	6,1	1953,23	18,3	0,928213114
1,6	3,4	1956,63	14,9	0,755758218
1	4,2	1960,83	10,7	0,5427257
0,8	1,6	1962,43	9,1	0,461570455
0,63	1,4	1963,83	7,7	0,390559616
0,315	1,2	1965,03	6,5	0,329693182
0,2	1,1	1966,13	5,4	0,273898952
0,16	2,4	1968,53	3	0,152166084
0,12	2,1	1970,63	0,9	0,045649825
0,08	0,9	1971,53	0	0

➤ Calcaire sous arrondie essai fragmentabilité

DIAMETRE	REFUS (g)	REFUS cumulés	TAMISATS cumulés	tamisâts cumulés %
20	652,4	652,4	1336,8	67,20289564
16	554,6	1207	782,2	39,32234064
12,5	393,9	1600,9	388,3	19,52041022
10	182,8	1783,7	205,5	10,33078625
8	49,7	1833,4	155,8	7,83229439
6,3	25,9	1859,3	129,9	6,530263422
5	18,6	1877,9	111,3	5,595214156
4	14,7	1892,6	96,6	4,856223607
3,15	11,7	1904,3	84,9	4,268047456
2,5	10,6	1914,9	74,3	3,735169918
2	8,7	1923,6	65,6	3,297808164
1,6	8,7	1932,3	56,9	2,860446411
1	16,6	1948,9	40,3	2,025940076
0,8	3,5	1952,4	36,8	1,849989946
0,63	5	1957,4	31,8	1,598632616
0,5	31,8	1989,2	0	0

➤ Calcaire sous angulaire essai fragmentabilité

DIAMETRE	REFUS (g)	REFUS cumulés	TAMISATS cumulés	tamisâts cumulés %
20	364,4	364,4	1631,5	82,01789664
16	584,1	948,5	1047,4	52,6543334
12,5	464	1412,5	583,4	29,32837322
10	243,2	1655,7	340,2	17,1023527
8	78,1	1733,8	262,1	13,17615122
6,3	58,7	1792,5	203,4	10,22521617
5	39,1	1831,6	164,3	8,25960185
4	26,1	1857,7	138,2	6,94751659
3,15	25,2	1882,9	113	5,680675649
2,5	20,3	1903,2	92,7	4,66016489
2	18,7	1921,9	74	3,720088478
1,6	17,7	1939,6	56,3	2,830283531
1	25,3	1964,9	31	1,558415443
0,8	8	1972,9	23	1,156243716
0,63	8,5	1981,4	14,5	0,728936256
0,5	14,5	1995,9	0	0

➤ Calcaire allongée essai fragmentabilité

DIAMETRE	REFUS (g)	REFUS cumulés	TAMISATS cumulés	tamisâts cumulés %
20	615,5	615,5	1378,9	69,31932435
16	528,1	1143,6	850,8	42,7709632
12,5	444,9	1588,5	405,9	20,40518802
10	163,7	1752,2	242,2	12,17574904
8	68,1	1820,3	174,1	8,752262216
6,3	36,2	1856,5	137,9	6,93243515
5	23,8	1880,3	114,1	5,735974261
4	22,4	1902,7	91,7	4,609893424
3,15	17,3	1920	74,4	3,740197064
2,5	16,3	1936,3	58,1	2,92077217
2	13	1949,3	45,1	2,267243113
1,6	11,9	1961,2	33,2	1,669012668
1	17,4	1978,6	15,8	0,794289161
0,8	6	1984,6	9,8	0,492660366
0,63	6,6	1991,2	3,2	0,160868691
0,5	3,2	1994,4	0	0

➤ calcaire allongée essai dégradabilité

DIAMETRE	REFUS (g)	REFUS cumulés	TAMISATS cumulés	tamisats cumulés %
20	715	715	1284,9	64,24821241
16	666	1381	618,9	30,94654733
12,5	431	1812	187,9	9,395469773
10	157	1969	30,9	1,545077254
8	26	1995	4,9	0,245012251
3,15	0,1	1995,1	4,8	0,240012001
2	0,2	1995,3	4,6	0,230011501
1	0,2	1995,5	4,4	0,220011001
0,4	0,3	1995,8	4,1	0,205010251
0,315	0,4	1996,2	3,7	0,18500925
0,2	0,3	1996,5	3,4	0,1700085
0,16	0,4	1996,9	3	0,1500075
0,125	0,6	1997,5	2,4	0,120006
0,08	0,1	1997,6	2,3	0,11500575
0,04	2,3	1999,9	0	0

Détermination de la dimension fractale pour chaque matériau et essai :

