MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU FACULTÉ DU GÉNIE DE LA CONSTRUCTION LABORATOIRE DE RECHERCHE GÉOMATERIAUX, ENVIRONNEMENT ET AMENAGEMENT (L.G.E.A) DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL



MEMOIRE DE MASTER-2- RECHERCHE

Option : Géotechnique et Environnement

Présenté par

M^{elle}: Bouzeboudja Houria

Thème

Etude de la dimension fractale des

grains en fonction de leur écrasement à

l'essai de cisaillement

Devant le jury composé de :

M ^r HAMZA Ali, Maître de conférences à l'UMMTO	Président
M ^r MELBOUCI Bachir, Professeur à l'UMMTO	Promoteur
M ^m BOUBRIT Hassiba, Maître Assistante à l'UMMTO	Examinatrice

Soutenu le : 30/06/2015

Remerciements

Ce travail de recherché a été réalisé au laboratoire géo matériaux, environnement et aménagement "L.G.E.A" de la faculté de génie de la construction de l'Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

J'exprime ma profonde gratitude et vifs remerciements à mon directeur de mémoire Monsieur MELBOUCI Bachir, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour son encadrement sa disponibilité et ses précieux conseils.

Je tiens à remercier M^r HAMZA Maître de conférences à l'UMMTO qui me fera l'honneur de présider le jury de ma soutenance.

Mes remerciements s'adressent aussi à M^m BOUBRIT Maître assistante à l'UMMTO qui a accepté d'examiner ce mémoire.

Je remercie particulièrement M^{me} BOUZEBOUDJA aldjia et M^{me} BOUZEBOUDJA ourdia pour leur soutien psychologique et pratique.

Je souhaite remercier monsieur BOUKAROUB Med Ameziane responsable du laboratoire mécanique des sols, et monsieur LACHEBI Kamel, responsable du laboratoire de recherche (LGEA) pour leur disponibilité et leur aide durant ma partie expérimentale de se travail.

J'adresse ma profonde gratitude et reconnaissance a mes chers parents a qui je dois tellement et je ne pourrai rendre assez qui m'ont soutenus pondant tout mon cursus d'études.

Je remercie tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin dans la réalisation de ce travail.

Sommaire

Liste des principales notations et indices	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1

Chapitre I : Définition et généralité sur la dimension fractale.

1-Introduction	4
2- Formulation du concept de fractal	4
3- Objet fractal ou non fractal ?	4
4-Définition d'un objet fractal	5
4-1 Caractéristiques d'un objet fractal	5
4-2 Exemples de quelques objets fractals	6
5- Classification des objets fractals	8
5-1 Fractales déterministes	8
a) Les systèmes de fonctions itérés	8
b) Fractales réalisées grâce à une suite de points	9
c) Ensembles fractals non uniformes	10
5-2- Fractals non déterministes	10
a) Objets fractals naturels	10
b) Ensembles fractals aléatoires	11
6-Notion de dimension	12
6-1 Dimension euclidienne	13
6-2 Dimension fractale	14
6-3- Définition mathématique de la dimension fractale	14
6-4-Vérification avec la dimension classique	15
7-Conclusion	15

CHAPITRE 2 : Méthodes utilisées pour le calcul de la dimension fractale.

1-Introduction	17
2- Méthodes utilisées pour le calcul de la dimension fractale d'un grain de sol	17
2-1- Méthode de comptage des Boîtes (Box Counting)	17

2-2- Méthode du diviseur	20
2-3- Méthode des lignes parallèles	22
2-4-Méthode d'area-perimeter	23
2-5- Méthodes des masses	25
3-Conclusion	25

CHAPITRE III : Etude du phénomène d'écrasement des grains.

1- Introduction	
2-Ecrasement des grains selon différents auteurs	
2-1. L'écrasement des grains selon (Bishop et Henkel, 1962)	
2-2. L'écrasement des grains selon (Ramamurtty, 1969)	
2-2-1. Rupture des aspérités	
2-2-2. Cisaillement des aspérités	
2-2-3. Rupture des angularités	
2-2-4. Fendage des grains	
2-3. L'écrasement des grains selon (Guyon et Troadec, 1994)	
2-3-1. La fracture	
2-3-2. L'écaillage (ou l'attrition)	
2-3-3. L'abrasion	
3. Effet de la croute molle	
 Type de défaillance dans la croûte molle 	
3-1Cisaillement à l'interface	
3-2 : Cisaillement localisé dans la croûte molle	
3-3 : Cisaillement généralisé dans la croûte la plus molle	
4. Les paramètres influençant la rupture des grains	
5-Conclusion	

CHAPITRE IV : Essai de cisaillement direct à la boite et appareillage.

1-Introduction	40
2-Définition et but de l'essai	40
3- Principe de l'essai	41
4- Appareillage	
5-Déroulement de l'essai	44
6-Fin de l'essai	46

7-Expression des résultats	.46
8- Inconvénients et avantages de la boite de cisaillement	.47
9-Conclusion	47

CHAPITRE V : Identification des matériaux de l'étude, de leurs classes granulaires et des formes utilisées

1-Introduction	49
2- Définitions des matériaux utilisés	. 49
2-1- Définition du calcaire	. 49
2-2-Définition du grès	. 52
3-Préparation des échantillons	. 55
✤ La forme des grains	. 55
 Taille des grains 	.56
4-Conclusion	. 60

Chapitre VI : Présentation et interprétation des résultats

1-Introduction	62
2- Présentation et interprétation des résultats	62
2-1-courbes contraintes-déformations	62
2-2-Détermination des courbes intrinsèques	71
2-3- Courbes granulométriques avant et après cisaillement	79
3- Conclusion	89

Chapitre VII : Détermination expérimental de la dimension fractale

1-Introduction)1
2-Détermination de la Dimension fractale9) 1
2-1-Détermination de la Dimension fractale par la méthode des masses9)1
2-1-1-avant écrasement)1
2-1-2-Après écrasement) 3
2-1-3-Etude de l'évolution de la dimension fractale en fonction de la contrainte normale pour le	es
matériaux grès et calcaire) 5
2-1-4-Influence de la forme des grains sur l'évolution de la dimension fractale	96
2-1-5-Influence de la classe granulaire sur l'évolution de la dimension fractale DFr	97
2-2-Détermination de la Dimension fractale par la méthode de box counting9	98
2-2-1-Etude de l'influence de contrainte sur l'évolution de la dimension	<i>)</i> 9

Annexe110
Références Bibliographique107
Conclusion générale106
3-Conclusion104
rugosité
2-2-4-Etude de l'influence de la nature de matériau sur l'évolution de la dimension fractale de
rugosité102
2-2-3-Etude de l'influence de la forme des grains sur l'évolution de la dimension fractale de
rugosité101
2-2-2-Etude de l'influence de la classe granulaire sur l'évolution de la dimension fractale de

Liste des principales notations et indices

- D : Dimension de l'objet.
- L : longueur de l'Objet.
- N : l'étalon de mesure.
- N : Nombre de fois que l'on reporte l'étalon.
- P Périmètre du grain.
- A : Surface du grain.
- $P(\lambda)$: Périmètre polygone en (mm).
- λ : l'espacement entre deux lignes parallèles.
- N : Effort normal de compression.
- T : Effort horizontal.
- σ: Contrainte normale.
- τ : Contrainte tangentielle.
- φ: angle de frottement interne du matériau.
- ΔL : déplacement horizontal.
- γ : Poids volumique total.
- γ_s : Poids volumique des grains solides.
- γ_d : Poids volumique sèche.
- m : Pente de la droite considérée.
- DFr: Dimension Fractale de fragmentation.
- M : masse totale de l'échantillon.
- MT : Masse totale des grains.
- r: taille de l'ouverture des passoires.
- rL: dimension des parti cules maximal définie par la plus grande ouverture des passoires.
- DF : Dimension fractale de rugosité d'un grain.

Liste des figures

Figure I-1 : Objet non fractal4	ł
Figure I-2 : Objet fractal	5
Figure I-3 : Exemples anciens sur la géométrie fractale6	5
Figure I-4 : Exemple d'un objet fractal6	5
Figure I-5 : Exemple d'un objet fractal naturel7	7
Figure I-6 : Quelques objets fractals constituant un milieu granulaire	7
Figure I-7 : Courbe de Von Koch	3
Figure I-8 : Etapes de construction de la courbe de Von Koch	3
Figure I-9 : Ensemble de Mandelbrot9)
Figure I-10: Ensembles de Gaston Julia9)
Figure I-11: Exemple de fractal non uniforme1	0
Figure I-12: Exemples de fractals naturels1	1
Figure I-13 : Exemple de fractals aléatoires1	2
Figure I-14 : Représentation de la carte de France à différentes échelle (Source: les objets	
fractale par Mandelbrot)1	3
Figure II-1 : a) un exemple d'un grain de sable photographié d'une surface de 31.06 mm2	
b) l'image binaire est obtenue après l'analyse d'image1	17
Figure II-2 : Application de la dimension fractale par (box-counting)1	8
Figure II-3 : Droite de la dimension fractale par la méthode des boites 1	9
Figure II-4 : Différentes étapes de maillage de l'image du grain (Illustration de la méthode de	
Box Counting)	20
Figure II-5 : (a) le grain de sable après l'analyse de l'image. Le reste des figures contient les	
polygones tracés sur grains avec une taille de mesure (b) 2 mm. (c) 1 mm et (d) 0.25mm 2	21
Figure II-6: calcul de la dimension fractale (a) Totale (b) Texturale (D1) et structurale (D2)2	22
Figure II-7 : la méthode des lignes parallèle2	23
Figure II-8 : Exemple d'application de la méthode de Surface- Périmètre	24
Figure III-1 : Déformation au niveau du contact entre deux particules sous un chargement	
Statique (D'après Bowden et Tabor, 1956)2	28
Figure III-2 : Représentation schématique du comportement de contact (D'après Bishop et	
Henkel, 1962)	29
Figure III-3 : Différents types de rupture des grains selon Ramamurthy T en 1969	30

Figure III-4 : différents modes de rupture des grains selon Guyon et Troadec, 1994
Figure III-5 : Cisaillement à l'interface
Figure III-6 : Cisaillement localisé dans la croûte molle
Figure III-7: Cisaillement généralisé dans la croûte la plus molle
Figure IV-1 : Courbe de contraintes-déformations (LCPC, 1987)40
Figure IV-2 : Courbe intrinsèque
Figure IV-3: Illustration du principe de l'essai, (Magnan, 1991)42
Figure IV-4 : La Boite de cisaillement
Figure IV-5: l'appareillage complet
Figure IV-6 : Principaux étapes du mode opératoire45
Figure IV-7 : Exemple d'un échantillon avant et après cisaillement
Figure V-1 : les échantillons du matériau calcaire utilisés pour notre étude (forme allongée)51
Figure V-2 : les échantillons du matériau grès utilisés pour cette étude (forme allongée)54
Figure V-3 : Degrès de forme des grains (d'après Krumbein W.C.1941)55
Figure V-4 : Modèle de forme des grains (d'après Powers M.C.1953)55
Figure V-5 : Les différentes formes utilisées
Figure (VI-1): Courbes contraintes-déformations du matériau grès pour la classe 3.15/8
allongée62
Figure VI-2 : Courbes contraintes-déformations du matériau grès pour la classe 5/8 allongée . 63
Figure VI-3 : Courbes contraintes-déformations du matériau grès pour la classe 3.15/5
allongée63
Figure VI-4 : Courbes contraintes-déformations du matériau grès pour la classe 3.15/8 sous
arrondie64
Figure VI-5 : Courbes contraintes-déformations du matériau grès pour la classe 5/8 sous
arrondie64
Figure VI-6 : Courbes contraintes-déformations du matériau grès pour la classe 3.15/5 sous
arrondie65
Figure VI-7 : Courbes contraintes-déformations du matériau grès pour la classe 3.15/8
angulaire
Figure VI-8 : Courbes contraintes-déformations du matériau grès pour la classe 5/8 angulaire 66
Figure VI-9: Courbes contraintes-déformations du matériau grès pour la classe 3.15/5
angulaire
Figure VI-10 : Courbes contraintes-déformations du matériau calcaire pour la classe 3.15/8
allongée67

Figure VI-11 : Courbes contraintes-déformations du matériau calcaire pour la classe 5/8
allongée67
Figure VI-12 : Courbes contraintes-déformations du matériau calcaire pour la classe 3.15/5
allongée
Figure VI-13 : Courbes contraintes-déformations du matériau calcaire pour la classe 3.15/8
sous arrondie
Figure VI-14 : Courbes contraintes-déformations du matériau calcaire pour la classe 5/8 sous
arrondie
Figure VI-15 : Courbes contraintes-déformations du matériau calcaire pour la classe 3.15/5
sous arrondie
Figure VI-16 : Courbes contraintes-déformations du matériau calcaire pour la classe 3.15/8
angulaire
Figure VI-17 : Courbes contraintes-déformations du matériau calcaire pour la classe 5/8
angulaire
Figure VI-18 : Courbes contraintes-déformations du matériau calcaire pour la classe 3.15/5
angulaire71
Figure (VI- 19) : Courbes intrinsèques du matériau grès pour les classes granulaires (3.15/8,
5/8 et 3.15/5) allongée
Figure VI-20 : Courbes intrinsèques du matériau grès pour les classes granulaires (3.15/8,
5/8 et 3.15/5) sous arrondie
Figure VI-21 : Courbes intrinsèques du matériau grès pour les classes granulaires (3.15/8, 5/8
et 3.15/5) angulaire74
Figure VI-22 : Courbes intrinsèques du matériau calcaire pour les classes granulaires (3.15/8,
5/8 et 3.15/5) allongée76
Figure VI-23 : Courbes intrinsèques du matériau calcaire pour les classes granulaires (3.15/8,
5/8 et 3.15/5) sous arrondie
Figure VI-24 : Courbes intrinsèques du matériau calcaire pour les classes granulaires (3.15/8,
5/8 et 3.15/5) angulaire
Figure VI-25 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau grès pour la
classe 3.15/8 allongée
Figure VI-26 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau grès pour la
classe 5/8 allongée
Figure VI-27 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau grès pour la
classe 3.15/5 allongée

Figure VI-28 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau grès pour la
classe 3.15/8 sous arrondie
Figure VI-29 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau grès pour la
classe 5/8 sous arrondie
Figure VI-30 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau grès pour la
classe 3.15/5 sous arrondie
Figure VI-31 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau grès pour la
classe 3.15/8 angulaire
Figure VI-32 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau grès pour la
classe 5/8 angulaire
Figure VI-33 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau grès pour la
classe 3.15/5 angulaire
Figure VI-34 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau calcaire
pour la classe 3.15/8 allongée
Figure VI-35 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau calcaire
pour la classe 5/8 allongée
Figure VI-36 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau calcaire
pour la classe 3.15/5 allongée
Figure VI-37 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau calcaire
pour la classe 3.15/8 sous arrondie
Figure VI-38 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau calcaire
pour la classe 5/8 sous arrondie
Figure VI-39 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau calcaire
pour la classe 3.15/5 sous arrondie
Figure VI-40 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau calcaire
pour la classe 3.15/8 angulaire
Figure VI-41 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau calcaire
pour la classe 5/8 angulaire
Figure VI-42 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau calcaire
pour la classe 3.15/5 mm angulaire
Figure VI- 43: grains cisaillés sous une contrainte normale de 4 bars
Figure VII-1 : Dimension fractale DFr par la méthode des masses avant écrasement (matériau
grés, classe 3.15/8)92

Figure VII-2 : Dimension fractale DFr par la méthode des masses avant écrasement (matériau
grés, classe 3.15/5 et 5/8 mm)
Figure VII-3 : Dimension fractale DF _r par la méthode des masses avant écrasement (matériau
calcaire, classe 3.15/8, 3.15/5 et 5/8 mm)93
Figure VII-4 : Dimension fractale DF _r par la méthode des masses après écrasement (matériau
grés, classe 3.15/8 angulaire)93
Figure VII-5 : Dimension fractale DF _r par la méthode des masses après écrasement (matériau
calcaire, classe 3.15/8 angulaire)94
Figure VII-6 : Evolution de la dimension fractale DFr en fonction de la contrainte normale
de cisaillement (matériaux grès et calcaire, classe 5/8 mm)95
Figure VII-7 : Evolution de la dimension fractale DFr en fonction de la contrainte normale
(classe5/8 mm)
Figure VII-8 : Evolution de la dimension fractale DFr en fonction de la forme des grains
(classe 3.15/5 mm)
Figure VII-9 : Evolution de la dimension fractale DFr des différentes classes granulaires en
fonction de la contrainte normale (grès et calcaire, forme allongée)
Figure VII-10 : Evolution de la dimension fractale DFr des différentes classes granulaires en
fonction de la contrainte normale (grès et calcaire, forme sous arrondie)
Figure VII-11 : Evolution de la dimension fractale DF en fonction de diamètres des grains
(materiau grès, classe 3.15/5 mm allongée)99
Figure VII-12: Evolution de la dimension fractale DF en fonction de diamètres des grains
(materiau calcaire, classe 3.15/5 mm allongée)
Figure VII-13: Evolution de la dimension fractale DF en fonction de diamètres des grains
(matériau grès, forme sous arrondie)100
Figure VII-14: Evolution de la dimension fractale DF en fonction de diamètres des grains
(materiau calcaire, forme sous arrondie)101
Figure VII-15: Evolution de la dimension fractale DF en fonction de diamètres des grains
(materiau grès, classe 3.15/8)
Figure VII-16: Evolution de la dimension fractale DF en fonction de diamètres des grains
(materiau calcaire, classe 5/8)
Figure VII-17: Evolution de la dimension fractale DF en fonction de diamètres des grains
(matériaux grès et calcaire, classe 3.15/8 sous arrondie)103

Liste des tableaux

Tableau V-1 : Caractéristiques physiques du matériau calcaire « Allili Hakim et Amokrane)
Djouher (Thèse Ingénieur 1999) »51	
Tableau V-2 : Caractéristiques mécaniques du matériau calcaire « Allili Hakim et Amokrane	•
Djouher (Thèse Ingénieur 1999) »51	
Tableau V-3: Compositions minéralogiques des grès numidiens « Allili Hakim et Amokrane	
Djouher (Thèse Ingénieur 1999) »54	
Tableau V-4 : Compositions minéralogiques des grès miocènes « Allili Hakim et Amokrane	
Djouher (Thèse Ingénieur 1999) »54	
Tableau V-5 : les refus des différents tamis de classe (3 ,15/5)	
Tableau V-6 : les refus des différents tamis de classe (5/8)	
Tableau V-7 : les refus des différents tamis de classe (3,15/8)	
Tableau V-8 : les refus des différents tamis de classe (3,15/5)	
Tableau V-9 : les refus des différents tamis de classe (5/8)	
Tableau V-10 : les refus des différents tamis de classe (3,15/8)	
Tableau VI-1: Détermination de l'angle de frottement des différentes formes et des	
différentes classes pour le matériau grès75	
Tableau VI-2: Détermination de l'angle de frottement des différentes formes et des	
différentes classes pour le matériau calcaire79	
Tableau VII-1: Masses cumulatives M(R <r) de="" des="" des<="" diamètres="" en="" fonction="" mt="" rapports="" td=""><td></td></r)>	
tamis r/rl du matériau grés pour la classe 3.15/8 mm91	

Introduction générale

Dans les années 70, le champ d'action des mathématiques a pris une nouvelle dimension par l'ajout de la géométrie fractale. Depuis, il a été démontré que les fractales peuvent servir de modèle pour représenter la géométrie de la nature. Cette branche de la géométrie cherche à décrire mathématiquement des objets ayant une forme complexe très rugueuse ou fragmentée. Ainsi, un point, une courbe et une surface sont respectivement de dimension topologique 0, 1 et 2.

L'utilisation de la dimension fractale dans le domaine de génie civil a apporté beaucoup de plus pour comprendre le comprendre mécanique des milieux granulaires. Il est nécessaire alors de caractériser la forme des grains à l'aide de la dimension fractale qui est un caractère qui désigne le degré d'irrégularité et de la fragmentation d'un grain. Le fondateur de cette théorie a démontré aussi que « la fractalité » d'un objet n'est autre que la perception intuitive de son irrégularité ou de sa rugosité; plus un objet est irrégulier et plus sa dimension fractale est élevée (Mandelbrot, 1983).

Du fait qu'elle apporte une vision plus claire sur les courbes irrégulière et fragmenté, est intéressant pour une nouvelle approche sur les grains cisaillés, dans notre cas pratique les contours des grains fragmentés.

Nous allons déterminer la dimension fractale des échantillons de différentes formes avant cisaillement et étudier son évolution sous différentes contraintes normales, et essayé de donner une explication sur l'aspect des grains après cisaillement à la boite de Casagrande et faire le lien entre la dimension fractale et la contrainte normale σ .

Pour mener à bien ce travail, nous l'avons divisé en deux parties :

La première partie est consacrée à la bibliographie. Elle est développée comme suit: Dans le **1^{er} chapitre**, nous présentons les généralités sur la notion d'un objet fractal, l'origine du formalisme fractal et quelques objets fractals... etc.

Le 2^{eme} chapitre regroupe plusieurs méthodes et leurs principes d'utilisation, qu'ont été développées pour calculer la dimension fractale d'un matériau granulaire

Le 3^{eme} chapitre présente quelques explications du phénomène d'écrasement ou des différents modes de rupture des grains.

Le 4^{éme} chapitre présente toutes les informations nécessaires à la compréhension de principe de fonctionnement d'essai de cisaillement. Des photos ont été prises pour les différents grains avant et après essais.

Le 5^{eme} chapitre est consacré aux définitions des matériaux étudiés et aux différentes formes de grain.

La deuxième partie est purement expérimentale développée dans **le 6^{eme} chapitre** qui est consacré à la présentation et à l'interprétation des résultats de cisaillement et **le7^{eme} chapitre** qui est consacré au calcul de la dimension fractale des grains avant et après l'essai de cisaillement avec la méthode des masses et box counting.

Une conclusion générale synthétisant l'ensemble des résultats de notre étude.



Définition et généralités sur la

dimension fractale.

1-Introduction

Apparues au XIX^e siècle, les fractales sont considérées comme des « monstres » mathématiques jusqu'au milieu du XX^e siècle. C'est en 1975, avec la parution de son illustre ouvrage, intitulé "Les Objets fractals - Forme, hasard et dimension", que le mathématicien Benoît Mandelbrot apporta une avancée significative dans le domaine de la géométrie non euclidienne. Il faut toutefois noter, que c'est dans les années 60, que Mandelbrot inventa la géométrie fractale. Au cours de ses préoccupations, figurait l'incapacité pour la géométrie classique, de modéliser et de concevoir la rugosité ou la fragmentation des objets naturels. La notion de fractale regroupe, dans un cadre géométrique unique, de nombreux travaux mathématiques antérieurs.

2- Formulation du concept de fractal

L'adjectif « fractal » a été proposé par Mandelbrot en 1975 (Mandelbrot 1975). Il provient du mot latin « fractus », du verbe « frangere » qui signifie briser, présenter des irrégularités, fragmenter à toutes les échelles ou encore fractionner à l'infini.

3- Objet fractal ou non fractal?

Un objet est dit non fractal s'il n'y a pas d'apparition de nouvelles formes chaque fois qu'on zoome une de ses parties (Fig I-1). Or dans le cas d'un objet fractal (Fig I-2), une nouvelle forme est apparue à chaque fois qu'une partie de l'objet est zoomée. Cette forme est plus au moins similaire à la totalité de l'objet lui même.



Figure I-1 : Objet non fractal.



Figure I-2 : Objet fractal.

4-Définition d'un objet fractal

Un objet fractal est une structure géométrique qui se répète, semblable à elle-même, quelle que soit l'échelle à laquelle on l'observe ; on parle alors de similitude interne. Mandelbrot le définit comme un ensemble qui présente des irrégularités à toutes ses échelles d'observation, tant au niveau macroscopique, que microscopique. Les ensembles fractals jouent un rôle central dans de très diverses théories scientifiques. Il s'agit, par exemple, de la forme des nuages ou des pépites d'or, de celle des côtes maritimes ou des hautes montagnes, de la répartition des galaxies dans l'espace ou encore de la turbulence ou du chaos. La musique, elle aussi, se trouve avoir des facettes fractales.

4-1 Caractéristiques d'un objet fractal

Un objet fractal possède au moins l'une des caractéristiques suivantes (Fisher. 1995):

- Il a des détails plus ou moins similaires à des échelles arbitrairement petites ou grandes ;
- 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-Besicovich est plus grande que sa dimension topologique, et possède une valeur fractionnaire (valeur non entière).

4-2 Exemples de quelques objets fractals



Figure I-3 : Exemples anciens sur la géométrie fractale.

Avec deux miroirs mis face à face vous pouvez aussi vous amuser à créer un objet fractal. Le miroir contient un miroir qui contient un miroir qui contient un miroir ...(fig I-4)



Figure I-4 : Exemple d'un objet fractal

La manière la plus simple d'obtenir une fractale, c'est de la trouver dans la nature. Certains végétaux comme la fougère ou le chou possèdent de splendides fractales qui n'ont pas attendu Mandelbrot pour exister. Les nuages ou les montagnes sont aussi des exemples de fractales mais ceux-là ne présentent pas d'autosimilarité.



Figure I-5 : Exemple d'un objet fractal naturel



Figure I-6 : Quelques objets fractals constituant un milieu granulaire.

L'effort réalisé par Mandelbrot, pour l'unification dans une même science, des courbes de longueur infinie et des surfaces présentant des irrégularités à toutes leurs échelles d'observation, a été et demeure, d'un très grand intérêt scientifique, comme en témoigne, l'organisation pendant plusieurs années, au Canada, du congrès sur "L'ingénieur et les fractals".

5- Classification des objets fractals

Les fractales sont définies de façon récursive ou itérative, selon la manière avec laquelle elles sont construites. Nous pouvons distinguer deux grandes catégories : les fractales déterministes et les fractales non déterministes (Falconer. 1990), (Hasting, Sugihara, 1994).

5-1 Fractales déterministes

Ce sont les fractals dont la construction ne dépend pas du hasard. Elles sont souvent construites géométriquement ou avec des méthodes numériques. Elles sont de trois types :

a) Les systèmes de fonctions itérés (IFS : Iterated Function System) : Ce type de fractals peuvent être décrites par des règles de remplacement géométriques fixes. L'ensemble de Cantor, le tapis de Sierpinsky, la courbe de Peano, le flacon de Von Koch constituent des exemples, bien connus dans le domaine, appartenant à ce type de fractal.



Figure I-7 : Courbe de Von Koch.



Figure I-8 : Etapes de construction de la courbe de Von Koch.

Les étapes de sa construction sont illustrées sur la figure (I-8). On démarre au début par un triangle équilatéral de coté *l*. Chaque coté peut être découpé en trois parties de longueur chacune (l/3). Ensuite la partie centrale de chaque coté du triangle est remplacée par deux segments ayant la même longueur (l/3). En répétant suffisamment longtemps, cette procédure pour chaque segment de nouveau objet ainsi obtenue on arrive à la forme de la figure (I-8). Notons qu'à la première itération, la longueur *l* de chaque coté du triangle est remplacée par $(\frac{4}{3}l)$; à la deuxième itération elle devient $(\frac{16}{9}) l = (\frac{4}{3})$. $(\frac{4}{3}l)$. A chaque itération la longueur est multipliée par $(\frac{4}{3})$. Au bout de la k^{ième} itération, la courbe de Von Koch a une longueur de 3. $(\frac{4}{3})^k$. Cela signifie que, la longueur de courbe de Koch tend vers l'infini pour un nombre d'itération infini.

b) Fractales réalisées grâce à une suite de points : Sont des fractales définies par une relation de récurrence pour tout les point de l'espace (tel que le plan complexe). Nous retrouvons dans cette catégorie les ensembles de Mandelbrot et celles de Julia.



Figure I-9 : Ensemble de Mandelbrot.



Figure I-10: Ensembles de Gaston Julia.

c) Ensembles fractals non uniformes : Une première extension, qui reste dans le cadre déterministe et parfaitement auto-similaire, permet de construire des ensembles fractales non uniformes, en divisant un motif de base en n sous-motifs similaires, mais en utilisant des similitudes de rapports variables r_i ($1 \le i \le n$) pour chacun des sous-motifs. Ces ensembles sont également qualifiés de multi-fractals. La figure (I-11) montre un exemple d'un ensemble fractal non uniforme.



Figure I-11: Exemple de fractal non uniforme.

5-2- Fractals non déterministes

Par opposition aux fractales déterministes, il existe des fractales liées au hasard ou à des phénomènes aléatoires (le mode de réplication fait intervenir une composante aléatoire). Elles se présentent sous deux formes :

a) Objets fractals naturels : objets aléatoires ou non déterministes, car le processus dynamique qui permet leurs création varie lui même avec le temps de façon aléatoire. Citant, les vaisseaux sanguins, le paysages fractals (les nuages, les montagnes, les flacons de neige, le chou- fleur). La figure (I-12) montre quelques exemples de fractals naturels.



Figure I-12: Exemples de fractals naturels.

b) Ensembles fractals aléatoires : Des fractales irrégulières peuvent être construites par simulation en introduisant des composantes aléatoires dans une procédure de construction élaborée au départ pour générer une fractale. Falconer (Falconer. 1990) a donné un exemple de variantes aléatoires de courbe de Von Koch dont les principes de modification aléatoire sont illustrés sur la figure ci-dessous (I.13.a). Par contre la figure (I.13.b) montre le mouvement aléatoire d'une minuscule particule en suspension, appelée mouvement Brownien.



Figure I-13 : Exemple de fractals aléatoires.

6-Notion de dimension

Pour mesurer une longueur, une surface ou un volume, une méthode usuelle consiste à recouvrir ces ensembles de pavés dont la longueur, la surface ou le volume sont pris comme unité de mesure. Le fondateur Mandelbrot s'est intéressé initialement à la côte de Bretagne précisément à son irrégularité. C'est en 1967 qu'il a publié, dans une revue scientifique un texte intitule : «combien mesure la côte de Bretagne ». Il s'est intéressé à la longueur de la côte. Mais où est l'intérêt de cette dernière aux mathématiques ? Pour comprendre les motivations de l'auteur, il faut voir le graphique ci-dessous (qui représente la carte de la France continental),



Figure I-14 : *Représentation de la carte de France à différentes échelle (Source: les objets fractale par Mandelbrot)*

Ainsi, quand l'échelle double, la longueur des côtes françaises augmentent. Ainsi sur le dessin n°6, la longueur est de 153 mm, sur le n°5 elle est de 167mm, sur le n°4 elle est de 193mm. D'une carte à l'autre l'échelle est diminuée de moitié mais on a représenté un agrandissement de chaque carte à l'échelle initiale de façon à faire apparaître la perte des détails à agrandir l'échelle de la carte. A chaque agrandissement, nous pouvons prendre en compte des détails, des anfractuosités qui n'apparaissent pas sur la carte précédente et qui vont se traduire par une augmentation la longueur totale.

Au lieu d'utiliser le processus d'une carte à différentes échelles, nous pouvons, et cela revient au même de modifier notre instrument de mesure: avec une règle d'un km de long dont nous posons les extrémités en des points du rivage (ou en des points de la frontière) nous obtiendrons une longueur moindre qu'avec une règle d'un hm ou d'un dm. Nous pouvons continuer jusqu'au cm ce qui nous oblige à contourner chaque caillou, puis jusqu'au 1 /10 de mm, ce qui nous fait mesurer les détails sur un grain de sable ... Il y a aucune raison de nous arrêter et la longueur mesurée croit indéfiniment.

6-1 Dimension euclidienne

En géométrie euclidienne on travaille avec des dimensions entières 0, 1, 2, 3,...

Exemple : La dimension d'un point est zéro (0), une ligne droite a pour support un espace de dimension un (1), un plan est un espace de dimension deux (2), un volume est inscrit dans un espace de dimension trois (3). On remarque qu'il existe un lien directe entre la dimension de l'objet étudié et son unité de mesure, un objet de dimension deux se mesure en m^2 et un objet de dimension trois en m^3 et ce qui n'est pas forcement le cas pour une courbe fractale.

6-2 Dimension fractale

La notion de longueur « exacte » des côtes n'existe pas car ces dernières sont trop irrégulières (Mandelbrot, 1975). Ce qui a poussé Benoît Mandelbrot à introduire une nouvelle dimension qu'il nomme « dimension fractale » qui permettra de mesurer cette irrégularité. Donc la dimension fractale est un nombre qui mesure le degré d'irrégularité ou de la fragmentation d'un objet, ou la mesure de la rugosité d'une surface, et cette notion de dimension fractale s'applique aux objets invariants d'échelle.

$$D = \frac{ln(Nombre \ de \ copies)}{ln(l/Rapport \ de \ Réduction)} \quad ----- I-1$$

6-3- Définition mathématique de la dimension fractale

Appelons L(l) la longueur mesurée avec un étalon de longueur l; D la dimension fractale de l'objet étudié ; AB est la taille macroscopique de l'objet, c'est-à-dire la distance entre les deux bouts de l'objet. On a alors :

Autrement dit, le nombre n d'éléments de taille l dans une fractale de taille globale L et de dimension D s'obtient avec :

$$n = \left(\frac{L}{l}\right)^D$$
 ------ I-3

d'où :

6-4-Vérification avec la dimension classique

Si on prend un carré de côté c, alors ce carré se divise en 4 carrés de longueur c/2.

Si D est la dimension fractale du carré, alors on a :

L=c et l=c/2

Selon la formule, D = ln 4/ln 2 d'où D = 2

De même, un cube de côté c se divise en 8 cubes de côté c/2. La dimension est alors égale à ln8/ln2, qui est égale à 3.

On retrouve bel et bien la dimension classique définie par Euclide.

Les Fractales présentent donc des dimensions qui ne seraient pas seulement des entiers naturels ; nous citons par exemple le cas des poussières qui représentent des ensembles discontinus de points ayant une dimension entre 0 et 1. Les courbes ou les surfaces planes (côte, mosaïque) ont une dimension entre 1 et 2. Les objets qui ont un volume (cristaux, éponges...) ont une dimension entre 2 et 3.

7-Conclusion

Une dimension fractale est une valeur non entière (1 < D < 3) contrairement aux dimensions euclidiennes (1, 2 et 3 qui désignent respectivement une ligne, un plan et un volume). Ainsi, un objet de dimension fractale D = 2 est parfaitement plan ; donc plus une surface est rugueuse et plus cette dimension D est grande.

D'une manière générale, un objet fractal est un objet qui ne peut pas être complètement décrit par la géométrie euclidienne car il comporte une infinité de détails. La dimension fractale est donc un nombre réel positif caractérisant la manière dont la masse ou la forme de l'objet est répartie dans l'espace.

Généralement, plus la dimension fractale d'un objet est élevée, plus l'objet est irrégulier. Un objet de dimension fractale comprise entre 1 et 2 est construit à partir d'une courbe à une dimension. Plus la dimension s'approche de 2 plus le fractal est irrégulier.

CHAPITRE II

Méthodes utilisées pour le calcul de la dimension fractale.

1-Introduction

Le calcul de la dimension fractale est l'une des caractéristiques principales de la géométrie fractale, elle a été utilisée entre autres dans le domaine de génie civil. Elle décrit bien l'irrégularité d'un grain du matériau granulaire. Pour le calcul de la dimension fractale, il est nécessaire de déterminer le périmètre et la surface des grains. Pour cela des techniques d'analyse d'image sont utilisées après l'utilisation d'un microscope Leica MZ-16 pour photographier les grains.

La technique d'analyse est simple, elle consiste à réaliser un seuillage de l'image grise jusqu'à un niveau raisonnable à fin d'extraire la surface du grain à partir du fond de l'image. Puis, appliquant un certain nombre d'opérations comprenant l'ouverture, fermeture, et remplissage en blancs, l'image binaire est obtenue comme une couche au-dessus de l'image grise (Fig. II-1b). Cette image binaire est utilisée pour calculer la surface du grain.



Figure II-1 : a) un exemple d'un grain de sable photographié d'une surface de 31.06 mm2 b) l'image binaire est obtenue après l'analyse d'image.

2- Méthodes utilisées pour le calcul de la dimension fractale d'un grain de sol

2-1- Méthode de comptage des Boîtes (Box Counting)

La méthode de comptage des boîtes est une méthode qui consiste à diviser l'image d'un grain en petit carré et de dimension identique (faire un maillage), ainsi le contour du grain qui passe par ces boites est compté, et on refait la même opération mais cette fois avec des boites de tailles décroissantes et ainsi de suite... Cette méthode est basée sur le principe que l'image du grain va correspondre au nombre de boites en fonction de ses tailles, et cette relation est représentée par la formule suivante :

 $N(X > x) = k x^{-DF}$ ------ II-1

x : dimension des boites
N(X>x): nombre de boites
k : constante
DF : dimension fractale (Huang et Zhan, 2002; Wang et Li, 2006)

En traçant ces valeurs ; taille des boîtes en fonction du nombre de boites dans un graphe logarithmique, la dimension fractale est obtenue suivant la pente la mieux adaptée à la ligne et peut être calculée par l'équation suivante :

DF = -*m* ------ II-2

m : la pente de la droite la mieux adapté appliqué à l'équation.

* Exemple d'application

Un exemple pour le même grain dans le paragraphe précédent est donné sur le schéma. Après la prise d'une photo du grain, on la couvre par une grille de longueur l prédéterminée. On calcule le nombre de carré entourant le périmètre du grain, et le nombre de carrés tracés en fonction de la longueur l. Ce processus sera répété pour un certain nombre de grain. La dimension fractale sera donc calculée pour chaque grain par le calcul de la pente dans un graphique logarithmique.



Figure II-2 : Application de la dimension fractale par (box-counting).



Figure II-3 : Droite de la dimension fractale par la méthode des boites.

La méthode box counting (comptage de boite) peut être utilisée aussi de cette manière : En traçant des grilles avec une certaine longueur bien déterminée en dessus de notre objet fractal. La dimension fractale (DF) sera calculée ensuite en utilisant l'équation suivante :

$$DF = \lim_{n \to \infty} \frac{\log \operatorname{Nr}(F)}{-\log r}$$
 ------II-3

Nr (F) est le nombre de case couvrant l'objet fractal et r la longueur d'un côté de la case. Répétant le processus de Nr (F), en changeant à chaque fois la longueur de du côté de la case (r), donc r se rapproche de zéro. Les valeurs de Nr (F) et r seront tracées sur un graphe logarithmique pour dériver la dimension fractale, (Tricot 1996).

Différentes étapes de maillage de l'image du grain (illustration de la méthode de Box Counting)



Figure II-4 : Différentes étapes de maillage de l'image du grain (Illustration de la méthode de Box Counting)

2-2- Méthode du diviseur

D'après Mandelbrot (1983), des lignes de même taille l sont utilisées pour former un polygone à l'intérieur des frontières d'un grain ; ainsi, le périmètre de ce polygone peut être décrit dans l'équation (*VI-3*) :

$$P(l) = nl^{1-D_R}$$
 ------ II-4

P(l): longueur totale des lignes (l) mesurées,

(l): longueur de la ligne

 D_R : dimension fractale du grain étudié.

Cette méthode est particulièrement utilisée dans des images digitalisées (numérisées en noir et blanc) avec des mesures de tailles décroissantes. Et cela en traçant la longueur du

polygone p(l) en fonction des lignes de même taille de mesure, la dimension fractale, reliée avec la pente la mieux adaptée peut être calculée par la relation suivante :

$$D_R = 1 - m$$
 ------ II - 5

* Exemple d'application

Prenant un grain simple donné dans la (Fig. II-1 a), des polygones de mesures de différentes tailles sont tracer à l'intérieur du grain (Fig. II-5 b, c, d). Tout le périmètre du grain obtenu est tracé en fonction de l'unité de mesure, afin de calculer les dimensions fractales.



Figure II-5 : (*a*) le grain de sable après l'analyse de l'image. Le reste des figures contient les polygones tracés sur grains avec une taille de mesure (b) 2 mm. (c) 1 mm et (d) 0.25mm.



Figure II-6: calcul de la dimension fractale (a) Totale (b) Texturale (D1) et structurale (D2).
2-3- Méthode des lignes parallèles (Kevin.P Hammer., 2005)

La méthode de la ligne parallèle mesure la rugosité des grains en employant une unité de mesure de longueur en fonction de toute la longueur du périmètre des particules, cette méthode a le même principe que la méthode du diviseur.

* Exemple d'application



Polygon Perimeter = 4.59mm

Polygon Perimeter = 4.70mm



2-4-Méthode d'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) :

$$c = \frac{\mathrm{P}^{1/\mathrm{DR}}}{\mathrm{A}^{0.5}} \qquad -----\mathrm{II-7}$$

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 des deux cotes dans l'équation (5), on peut obtenir l'expression suivante:
$$\frac{1}{D_R} \log P = \log(C\sqrt{A}) \qquad ----II-8$$

Faire certains arrangements nécessaires :

$$Log P = \frac{D_R}{2} (log C^2 + log A) \qquad \qquad \text{------II-9}$$

• Finalement, l'équation suivante est obtenue :

$$Log P = K + \frac{D_R}{2} (log A) \qquad -----II-10$$

Dans l'équation (II-10), la pente de la ligne d'ajustement normal de A-P est égale a 2/Dr. 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 areaperimeter 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.

* Exemple d'application



Figure II-8 : Exemple d'application de la méthode de Surface-Périmètre.

2-5- 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.

 $M \alpha L^{Df}$ ------II-11

M : masse de l'agrégat

L : taille d'un agrégat correspondant au rayon de giration et au diamètre maximal.

 α : veux dire proportionnel a

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 DFr. Cette méthode de calcul emploie la masse retenue en passoire et son diamètre correspondant. Cette équation est définie comme suite :

$$\frac{M(R < r)}{M_T} = \left(\frac{r}{r_L}\right)^{3 - DFr} \qquad -----II-12$$

Où 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;

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

DFr: dimension fractale de fragmentation.

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

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

3-Conclusion

En conclusion, il faut noter que, dans la méthode de comptage des boites (box counting), la ligne parallèle et méthode du diviseur la dimension fractale est calculée pour chaque grain, à la différence de la méthode de surface-périmètre, la dimension fractale déterminée est une valeur "commune" elle est calculée pour un ensemble de grains. En outre, à un niveau acceptable de résolution, la méthode de la ligne parallèle ou de diviseur est capable de déterminer exactement la rugosité d'un grain et cela avec l'utilisation des mesures de petites tailles.

Pour la méthode des masses, elle est calculée en utilisant l'analyse granulométrique d'un échantillon de sol,

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

CHAPITRE III

Etude du phénomène d'écrasement

des grains.

1- Introduction

Plusieurs études ont été faites par Biarez –J (1962), Marsal (1967), Vesic A-S et Clough G-W (1968), Cambou (1972), et plus récemment Kim (1995), Lade et Yamamura (1996) et Mc Domel et Bolton (1998), et Melbouci –B (2000), Ont permis de mettre en évidence le phénomène de la rupture des grains, les premières études menées ont permis de comprendre comment le phénomène de rupture des grains se manifeste et quels sont les facteurs permettant de quantifier cette rupture des grains.

L'écrasement des grains dépend de la contrainte normale de compression, de la contrainte de cisaillement, des dimensions de l'échantillon et de sa densité, de la taille et de la forme des grains. Quand les grains sont solides, durs et assez arrondis, ils peuvent reprendre de grandes contraintes ; par contre, les grains de forme anguleuse de matériaux de carrière fraichement extraits subissent la fragmentation due à la cassure des aspérités sous des contraintes moins importantes.

La rupture des grains est limitée généralement aux points de contact mais elle se peut se prolonger vers l'intérieur du grain.



Figure III-1 : Déformation au niveau du contact entre deux particules sous un chargement Statique (D'après Bowden ET Tabor, 1956)

2-Ecrasement des grains selon différents auteurs

Divers auteurs ont classé la rupture des grains selon des critères différents :

2-1. L'écrasement des grains selon (Bishop et Henkel, 1962)

Bishop et Henkel (1962) sont les premiers à mener une étude sur les contacts et l'écrasement des grains. Cette étude est basée sur la relation contrainte – déformation effectuée sur les échantillons cylindriques soumis à deux cycles de chargement et de déchargement. En se basant sur les observations faites au niveau des contacts cisaillés, ils ont démontré qu'il n'y a pas eu de glissement des grains mais un cisaillement au niveau des points de contact, en outre aucune diminution de volume n'a été observée. Le comportement de deux grains en contact sous une contrainte croissante est schématisé sur la (*Fig. III-2*).



Figure III-2 : Représentation schématique du comportement de contact (D'après Bishop et Henkel, 1962)

2-2. L'écrasement des grains selon (Ramamurtty, 1969)

La rupture des grains selon Ramamurthy est classée selon les quatre modes suivants ;



Figure III-3 : Différents types de rupture des grains selon Ramamurthy T en 1969.

2-2-1. Rupture des aspérités

La résistance de frottement entre les grains de sol dépend de leurs propriétés extérieures et des constituants minéralogiques. Selon Tabor (1956), une aspérité peut rayer une surface si sa dureté extérieure est au moins égale à (1 à 2) fois la dureté de la surface rayée. La résistance développée pendant la rayure caractérise essentiellement les propriétés élastiques du matériau.

Bridgeman (1953) a démontré qu'en utilisant des pressions hydrostatiques élevées, les matériaux fragiles subissent des déformations plastiques, mais peuvent ne pas être cassées ; par conséquent, on peut accepter les aspérités des matériaux fraîchement extraits ou désagrégés pour se déformer sous des pressions plus élevées et on peut montrer la réduction de la résistance au cisaillement sur la surface de contact due à l'écoulement du matériau [Vonkarman (1911), Griggs (1936) et Mc Henry (1948)].

La proportion du matériau écrasé est très petite puisqu'elle concerne seulement les aspérités dans les régions des efforts où le cisaillement est plus élevé. (*Figure III-3-a*).

2-2-2. Cisaillement des aspérités

La rupture des grains est rencontrée au cours du tassement, lorsque les granulats sont soumis à des hautes contraintes de compression. L'importance de la rupture dépend de la forme géométrique du grain, à savoir sa taille et sa forme en particulier, et des efforts de contacts des différents grains et également les contraintes appliquées aux points de contact (force - surface), comme elles peuvent se prolonger vers l'intérieur des grains (*Figure III-3-b*).

2-2-3. Rupture des angularités

Dans les matériaux extraits, les coins pointus des particules se cassent pendant le tassement ou cisaillement, réduisant cependant le schéma global d'angularité (F*igure III-3-c*), les surfaces et les coins nouvellement formés sont relativement plus forts. Les aspérités sur les surfaces nouvellement formées sont fortes à de basses pressions et elles peuvent se comporter différemment sous des intervalles d'effort plus élevés.

2-2-4. Fendage des grains

Cette catégorie de l'écrasement se produit quand des grains durs de sol sont soumis à des d'efforts de sens opposés à leurs points de contact. Sous un contact plus élevé, les obliquités et les aspérités des particules éprouvent les déformations élastiques. En présence des contraintes de cisaillement, certains des contacts initiaux peuvent être déchargés, quand les chargements sont reportés sur des nouveaux points de contacts (*Figure III-3-d*) ces efforts de sens opposés ont comme conséquence la fragmentation.

2-3. L'écrasement des grains selon (Guyon et Troadec, 1994)

De son côté, Guyon et Troadec (1994) ont classé la rupture des grains selon trois modes : la fracture, l'écaillage et l'abrasion (*Figure.III-4*) :

2-3-1. La fracture : un grain se casse pour en donner de nouveaux de tailles sensiblement égales et inférieures à la taille du grain original.

2-3-2. L'écaillage (ou l'attrition) : un grain se casse pour donner un grain de taille un peu inférieure et plusieurs de plus petite taille.

2-3-3. 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.



Figure III-4 : différents modes de rupture des grains selon Guyon et Troadec, 1994.

3. Effet de la croute molle

En présence de la croûte molle sur le grain, l'importance de la résistance au cisaillement dépend des propriétés du matériau, et des points de contact.

Quant les efforts de contact excèdent l'effort de fléchissement de la croûte des grains, les résidus des grains provoquent les écoulements et se comportent comme un lubrifiant plein interposé entre les surfaces de contact (Ramamurthy. T en 1969).

Type de défaillance dans la croûte molle : elles dépendent de l'importance de la pression de contact et de la force de croûte des grains, les défaillances de cisaillement peuvent avoir lieu de la manière suivante :

3-1Cisaillement à l'interface

Pendant le glissement sous de basses pressions, l'écrasement ne peut être assumé, mais prend place avec précision le long du plan séparant les surfaces initiales. Ce plan résulte de l'adhérence en raison du transfert des particules fines aux interfaces.

La zone de défaillance de cisaillement sera limitée à une région discontinue très étroite et la résistance au cisaillement sera celle de la croûte molle du grain glissant au-dessus d'elle même (*Fig.III - 5*).



Figure III-5 : Cisaillement à l'interface.

3-2 : Cisaillement localisé dans la croûte molle

Sous une pression de contact plus élevée, une couche épaisse d'un grain plus mou adhère à la surface de l'autre grain et le cisaillement a eu lieu entièrement dans le grain le plus mou.

La résistance au cisaillement sera la somme des résistances partielles d'un grain plus mou glissant sur lui-même (*Fig.III-6*).



Figure III-6 : Cisaillement localisé dans la croûte molle.

3-3 : Cisaillement généralisé dans la croûte la plus molle

Quand les effets de la transformation climatique sont limités à la croûte supérieure et ne pénètrent pas dans les grains de sol, une épaisseur limitée de croûte sera ramollie. Sous des pressions de contact élevées, la défaillance peut avoir lieu en cisaillant le grain plus mou le long de la borne séparant la croûte molle du noyau dur (*Fig.III-7*).



Figure III-7: Cisaillement généralisé dans la croûte la plus molle.

4. Les paramètres influençant la rupture des grains

Plusieurs études faites par différents auteurs, ont permis de mettre en évidence de façon claire les paramètres influençant la rupture des grains.

Les principaux paramètres susceptibles d'influencer la rupture des grains sont :

- 1) La forme des grains (arrondis ou anguleux).
- 2) La taille des grains.
- 3) La répartition granulométrique.
- 4) La présence d'eau.
- 5) L'altération naturelle des grains.
- 6) La compacité.
- 7) Le Chemin de contrainte.
- 8) L'état de déformation.

4-1-La forme des grains

La rupture des grains augmente avec leur angularité. Cette forme anguleuse obtenue par concassage favorise la concentration des contraintes (les surfaces de contacts étant très faibles) et la résistance à la rupture des grains est plus rapidement atteinte.

D'autre part, dans le cas des matériaux alluvionnaires ont une forme arrondie la rupture des grains est moins rapide.

Une bonne angularité confère au mélange granulaire une meilleure stabilité mécanique.

4-2-la taille des grains

Dans le cas des matériaux granulaires, la taille des grains est aussi un paramètre important. Des micros fissures se propagent lorsque les grains sont soumis à un chargement élevé, ce qui nous donne une cause importante de rupture des grains (Melbouci B 2002). En effet, plus la taille du grain augmente et plus la probabilité de présence des zones de faiblesse, dans celui ci augmente.

4-3-présence d'eau

Le comportement mécanique des grains est influencé par la présence d'eau. En effet, Marsal (1997) a mis en évidence l'effet de l'eau sur la réponse contrainte - déformation des matériaux granulaires. Il a effectué des tests sur des échantillons saturés en eau et des échantillons à l'état sec. Il en a déduit qu'il y a une diminution de la résistance des matériaux granulaires en présence d'eau. En outre, l'étude menée par Melbouci B (2007) sur les matériaux granulaires, montre que l'effet de l'eau a favorisé l'étalement granulométrique. En effet, l'eau a ramollie la surface superficielle des grains, ce qui a facilité leur écrasement.

4-4-Etalement granulométrique

Biarez J (1997) a montré que l'effet de l'étalement granulométrique peut s'expliquer par une meilleure distribution des forces inter-granulaires dans un milieu à granulométrie étalée. En effet, Pour obtenir une granulométrie étalée, les vides que laissent les gros gravillons en contact, peuvent être occupés par des gravillons plus petits, et les vides qui subsistent encore, peuvent être remplis par le sable, et ainsi de suite jusqu'aux éléments fins. En fait, si un mélange granulaire est riche en éléments fins et présente une discontinuité par manque de certains diamètres, ce mélange sera maniable, et se mettra facilement en place ; mais en contre partie, il manquera de stabilité et se déformera facilement. Par contre, si ce même mélange manque d'éléments fins, il sera moins maniable mais plus raide et plus sensible à la ségrégation.

4-5-Altération naturelle des grains

On appelle altérabilité la sensibilité d'une roche aux modifications du milieu qui l'entoure. La gélivité des roches est un des phénomènes important de l'altérabilité, deux facteurs essentiels interviennent : **a)** La structure du milieu poreux (importance de la porosité et de la dimension des pores) et l'état de fissuration.

b) La teneur en eau de la roche au moment où survient le gel.

La transformation de l'eau en glace se fait avec une augmentation de volume. Dans le cas où les pores seraient entièrement remplis par l'eau, les contraintes de traction exercées par la glace sur les roches peuvent dépasser largement leur limite de résistance. Pour la détermination de la sensibilité du granulat au gel, George Arquie et Claude Tourenq (1990), ont fait une étude sur l'essai Los Angeles, qui a provoqué la fragmentation des granulats dans un broyeur. Deux échantillons ont été testés, le premier étant intact et le second après avoir subi 25 cycles de gel – dégel entre 25°C et -25°C. Les auteurs ont déduit qu'il y a une diminution relative du coefficient Los – Angeles. On peut conclure que l'altérabilité a une influence directe sur la résistance des granulats.

4-6-Influence des paramètres de compacité

La rupture des grains est considérablement influencée par le paramètre de la compacité. Ce dernier est lié à la densité relative des matériaux granulaires. En effet, un matériau granulaire de faible densité initiale conduit à la rupture importante des grains qu'un matériau de forte densité relative initiale. Une faible valeur de densité nous donne un nombre de contact entre grains peu élevé et, par conséquent, une intensité de contrainte élevée, ce qui provoque l'écrasement des grains. Pour un milieu peu dense, à grain anguleux, la rupture des grains est importante au début du chargement, puis devient semblable à celui du milieu dense (Melbouci. B. 2002).

4-7-Influence du chemin des contraintes

L'intensité des contraintes appliquées est un facteur prépondérant sur le développement de l'écrasement des grains. En effet, le chemin des contraintes joue également un rôle marquant quant à la rupture des grains, Biarez -J (1997). Les études expérimentales réalisées par Melbouci B. (2002), ont montré que l'essai triaxial génère plus de rupture que l'essai oedométrique pour une même contrainte moyenne. Kim en (1995), a montré que plus la contrainte de confinement au triaxial augmente et plus la rupture des grains est importante.

Lade et Yamamuro en (1996), ont montré sur des essais drainés et non drainés que le cisaillement drainé produit plus de rupture car les contraintes effectives augmentent, mais ces mêmes contraintes effectives diminuent dans le cas d'essai non drainé.

4-8-Influence de l'état de déformation

Les études faites par Ramamurthy et Al (1974), Kim (1995) et Melbouci B (2002), ont montré que pour une même contrainte moyenne, plus la déformation axiale est élevée et plus l'écrasement des grains est significatif. Ramamurthy et Al en (1974) et Kim en (1995) ont, aussi constaté que l'écrasement des grains se poursuit après le pic des contraintes. L'amplitude des déformations à un incident notable sur l'importance du phénomène d'écrasement des grains.

5-Conclusion

La résistance et la déformation d'un matériau granulaire pendant son chargement sont affectées considérablement par le degré d'écrasement des grains. Le taux d'écrasement des grains qui se produit dans ce matériau dépend essentiellement de la granulométrie, de la contrainte appliquée, de la forme et de la taille des grains. La rupture entraîne une diminution de leur taille ce qui entraine une augmentation du pourcentage des particules fines et par conséquent une modification de la distribution granulométrique et une modification de l'état de surface des grains. Le paramètre majeur influençant la rupture des grains est l'évolution de l'étalement granulométrique.

CHAPITRE IV

Essai de cisaillement direct à la

boite et appareillage.

1-Introduction

Dans tous les problèmes de stabilité des sols (étude de fondation, ouvrage de soutènement, remblais, talus, etc...), il est nécessaire de connaitre la résistance de sol. Cette résistance est souvent difficile à déterminer, spécialement lorsqu'il s'agit d'un sol cohérent. La résistance d'un sol peut être définie par nombreux critères : résistance à la compression simple, essai CBR, essai pressiométrique, essai triaxial. Le présent mode opératoire s'applique exclusivement à l'essai de cisaillement, dit à la boite.

2-Définition et but de l'essai

Les sols sont constitués de particules indépendantes les unes des autres. Cependant, lorsqu'une force est appliquée dans le but de les déplacer, les particules du sol s'y opposent. Cette résistance, engendrée par l'arrangement des particules, porte le nom de **résistance au cisaillement**. On la définit indirectement comme étant égale à la force **T** qui doit être appliquée le long d'un plan de cisaillement pour entrainer le déplacement des particules.

Cependant, cette notion de résistance au cisaillement n'est pas toujours facile à définir, que ce soit dans un essai de laboratoire, ou dans le sol sur lequel est construit l'ouvrage. En effet, si on porte l'évolution de la contrainte de cisaillement τ en fonction de la déformation ε dans le plan de cette contrainte, on obtient le graphique suivant :



Figure IV-1 : Courbe de contraintes-déformations (LCPC, 1987).

La résistance au cisaillement peut être définie, sur ce graphique, comme étant :

- Le maximum de la contrainte de cisaillement τ max,
- La contrainte de cisaillement correspondante à une déformation très grande,

 La contrainte de cisaillement correspondante à une déformation plus ou moins arbitraire ε 1

Sauf dans des cas particuliers, on prendra comme résistance au cisaillement, le maximum de contrainte de cisaillement.

L'essai de cisaillement est destiné à évaluer les caractéristiques mécaniques d'un sol (naturel, reconstitué ou artificiel), c'est-à-dire la cohésion (**C**) et l'angle de frottement interne (φ) à partir de la courbe intrinsèque (figure IV-2). Trois types d'essais peuvent être définis suivant qu'il y a drainage ou non, consolidation ou non ; la consolidation consistant à charger l'échantillon en le drainant jusqu'à ce que la pression interstitielle se soit totalement dissipée (u =0), (LCPC, 1987).



Figure IV-2 : Courbe intrinsèque.

3- Principe de l'essai

L'essai consiste à placer un échantillon de sol représentatif d'une quantité suffisante dans la boite et soumettre la partie supérieure de l'échantillon à un effort vertical (N), résultant des poids placés sur le plateau, engendrant ainsi une contrainte normale respectivement de (100, 200,300, et 400 kPa), maintenue constante tout le long de l'essai. On applique ensuite à l'échantillon une charge horizontale T, que l'on augmente jusqu' à la rupture. Le plan de rupture se développe le long du plan horizontal imposé par le déplacement de la partie

inférieure sur la partie supérieure de la boite de cisaillement (*Fig.* IV-3). En première approximation, on peut supposer que dans le plan de séparation des deux demi-boîtes la contrainte normale et la contrainte tangentielle sont constantes (LCPC21, 1987).



Figure IV-3: Illustration du principe de l'essai, (Magnan, 1991).

L'essai est réalise en respectant les étapes suivantes:

-Régler la vitesse de la machine, de façon à imposer un déplacement relatif constant entre les demi-boîtes, (1,5mm/mn) utilisée dans nos essais.

-Mettre tous les comparateurs (déplacement horizontal et vertical) à zéro.

4- Appareillage

4-1-la boite de cisaillement ou boite de casagrande

Il existe différents modèles de boites de cisaillement, dans laquelle est mise l'éprouvette d'essai.

Une boite de cisaillement comporte essentiellement :(Figure IV-4)

- Une demi-boîte inferieure, munie d'une pierre poreuse plate, striée ou dentée,
- Une demi-boîte supérieure,
- Un piston, muni à sa base d'une pierre poreuse plate, striée ou dentée, glissant librement

dans la demi-boîte supérieure et transmettant à l'éprouvette l'effort vertical exercé,

- Deux goupilles, solidarisant les demi-boîtes, avant l'essai.

Les dimensions intérieures des demi-boîtes couramment utilisées sont de 6 x 6 cm ou de Ø 6 cm.

La profondeur de la demi-boite inférieure est de 2cm environ.



Figure IV-4 : La Boite de cisaillement.

4-2-Les bâtis de consolidation

Lorsque la consolidation ne se fait pas sur la machine de cisaillement, les bâtis de consolidation sont de même conception que ceux de la compressibilité. Ils comportent en plus une tige support de comparateur pour la mesure des tassements des éprouvettes d'essais.

4-3. Les poids

Ce sont des disques plats fondus, permettant leur centrage et leur superposition sur le plateau de charge du levier du bâti.

Chaque bâti de consolidation doit avoir sa série propre de poids de manière à pouvoir effectuer simultanément la consolidation de différentes séries d'éprouvettes d'essai sous les contraintes normales désirées.

4-4-La machine de cisaillement à déformation contrôlée

La machine cisaille le sol à vitesse constante. Elle peut être manuelle, mais dans ce cas les essais à vitesse lente sont exclus. Elle est à moteur avec plusieurs vitesses.

Elle comporte essentiellement :(Figure IV-5)

- Un chariot porte boite entrainée horizontalement à vitesse constante entrainante lui-même la demi- boite inférieure et l'éprouvette d'essai.

- Un anneau dynamométrique, retenant la demi- boite supérieure dont les déformations indiquent les efforts tangentiels développés dans le plan de cisaillement.

-Un système de levier- étrier, appliquant sur le piston de la boite les charges normales désirées à l'aide de différents poids.



Figure IV-5 : l'appareillage complet

5-Déroulement de l'essai

Après avoir préparé l'échantillon et mis dans la boite de cisaillement (fig IV-2)

- Mettre l'ensemble sur l'appareil et appliquer sur la face supérieure de l'échantillon un effort vertical (N), résultant des poids placés sur le plateau, engendrant ainsi une contrainte normales =100, 300, 400 KPA, maintenue constante toute le long de l'essai ;

-régler la vitesse de la machine, de façon à imposer un déplacement horizontal relatif constant entre les deux demi-boîtes (1.5 mm/mn) dans notre cas ; - Mettre tous les comparateurs (déplacement horizontal, déplacement vertical et force) a zéro ;

- Actionner la machine et prendre des lectures sur les trois comparateurs simultanément, à des intervalles de temps réguliers (toutes les 15secondes).

La rupture est caractérisée par l'apparition du pic ou par l'existante d'un palier, ce qui permet d'arrêter l'essai après 4 à 5 lectures décroissantes ou stabilisées, si non, on arrête à la déformation horizontale maximale, correspondant à (1,4cm) de déplacement.

Apres avoir terminé l'essai, on convertit toutes les lectures obtenues sur les différents comparateurs en unités de calcul.



Figure IV-6-: Principaux étapes du mode opératoire.

6-Fin de l'essai

- Couper le moteur appuyant sur la touche « stop » ;
- Enlever les poids du plateau de charge ;
- Débloquer l'anneau dynamométrique ;
- Enlever la boîte de chariot de la machine ;
- Sortir l'échantillon de la boîte ;
- Prendre au besoin une photo ;
- Nettoyer les pierres poreuses ;
- Bien nettoyer les boîtes de cisaillement.

La figure (IV.6) suivante montre un exemple d'échantillon après cisaillement.



a) Avant essai

b) après essai



7-Expression des résultats :

Les lectures obtenues sur les différents comparateurs, sont converties en unités de calcul comme suit :

La section corrigée: $S_c = L(L-\Delta L) \text{ cm}^2$

Avec :

L: longueur de la boite de cisaillement, L= 60mm.

 ΔL : déplacement horizontal en mm

La contrainte normale : $\sigma = \frac{N}{S_c}$ (KPA)

Avec :

N : effort normal

La contrainte tangentielle : $\tau = \frac{T}{S_c}$ (KPA)

Avec :

T: force de cisaillement daN.

Les résultats des essais de cisaillement direct à la boite sont représentés sous forme de courbes :

- Courbe contrainte déformation $\tau = f(\varepsilon_h), \varepsilon_h = \Delta L/L$ étant la déformation horizontale
- Courbe de variation de volume $\varepsilon_{\rm V} = f(\varepsilon_{\rm h})$,

En reproduisant l'essai sur plusieurs éprouvettes, pour différentes valeurs de la contrainte normale σ , on peut construire point par point la courbe intrinsèque $\tau = f(\sigma)$, σ étant la contrainte normale appliquée.

8- Inconvénients et avantages de la boite de cisaillement

- ***** Avantages :
- Simple (la manipulation est facile) ;
- Rapide (la durée d'exécution courte) ;
- Economique (le coût n'est pas cher).

Inconvénients :

- Contraintes et déformations ne sont connues que sur le plan de rupture ;
- Non uniformité de déformation dans le sol ;
- Frottement de deux demi-boîtes ;
- Pas de contrôle de la pression interstitielle.

9-Conclusion

Malgré les difficultés rencontrées lors de la mesure et les anomalies dues aux imperfections des appareils, l'essai de cisaillement à la boite reste le plus utilisé vu sa simplicité et sa rapidité.



Identification des matériaux de l'étude,

de leurs classes granulaires et des

formes utilisées.

1-Introduction

L'utilisation des roches dans la construction existe depuis longtemps. Elle a pris une ampleur dans le domaine de génie civil et ces matériaux sont utilisés principalement sous forme de granulats. Des spécifications sont ainsi imposées selon le type d'utilisation de ces granulats. Chacune de ces propriétés peut être mesurée par des essais conventionnels définis par des normes précises. Dans ce travail, nous nous intéressons essentiellement aux grains des matériaux locaux tels que le calcaire et le grès.

2- Définitions des matériaux utilisés

2-1- Définition du calcaire

Substance minérale caractérisée par une composition chimique dans laquelle prédomine le carbonate de calcium (CaCO3), souvent d'origine organique (calcaires à foraminifères dont la craie, calcaires coquilliers), mais aussi d'origine chimique (calcite, calcaire oolithique, pisolithique, lithographique). Les roches calcaires sont inégalement résistantes, plus ou moins perméables, et susceptibles d'être attaquées par dissolution si l'eau qui les baigne est riche en gaz carbonique.

2-1-1-La composition du calcaire

Le calcaire est une **roche sédimentaire** constituée à plus de 50 % de **carbonate de calcium** (**CaCO3**) et d'un pourcentage plus faible d'argile. Le carbonate peut donner trois minéraux :

-la calcite CaCO3.

- l'aragonite, qui constitue les concrétions, a la même formule chimique que la calcite mais des cristaux agencés différemment.

- la dolomite (CaCo3), qui est enrichie en carbonate de magnésium (MgCO3).

Vue sa disponibilité dans la région, un intérêt particulier a été donné au calcaire qui, en termes de roche dure, est plus ou moins connu que le granite. Le calcaire est décrit :

- d'un point de vue hydraulique, comme un milieu poreux contenant des fractures ;
- d'un point de vue mécanique, comme une roche dure et fracturée, superposition d'une matrice saine et d'éléments joints ;

- d'un point de vue chimique, comme une roche monophasée homogène pouvant contenir dans les microfissures diverses proportions d'argile ou autres minéraux accessoires.

Ces descriptions se présentent toutes comme la superposition d'une matrice poreuse homogène carbonatée parcourue d'hétérogénéités mécaniques (fissures macro- ou microscopiques), liées à des hétérogénéités hydrauliques et chimiques.

Le calcaire gris est également un calcaire fin, induré et résistant. La teinte de ce calcaire, s'explique par le fait qu'il contienne un peu de matière organique (0,25% de carbone organique total pour ce type de calcaire). Ce calcaire contient un niveau marneux d'environ 1,5 cm d'épaisseur, plus noir, et fragile.

2-1-2-Formation

Les calcaires se forment par précipitation de carbonate de calcium à partir du bicarbonate $((CO_3)_2CaH_2)$ dissous dans l'eau; cette précipitation est favorisée par certains facteurs physico-chimiques : augmentation de la température de l'eau ou de la teneur en dioxyde de carbone, chute de la pression, etc...Ainsi, les dépôts marins calcaire ne s'effectuent actuellement que dans les régions chaudes et jusqu'à une profondeur limite au-dessous de laquelle la calcite est remise en solution.

Les calcaires issus directement de la précipitation du carbonate de calcium sont relativement rares : ce sont les stalactites, les travertins, les calcaires oolithiques formés de globules millimétrique de calcite précipitées autour d'un noyau en mouvement. Le plus souvent, les calcaires proviennent de l'accumulation sur place ou après transport, de débris d'organismes calcaires noyés dans un ciment calcaire.

2-1-3-Caractéristiques

L'analyse effectuée par le laboratoire spécialisé de l'office national de la recherche géologique et minière l'ORGM (Boumerdes 2005) sur des échantillons de roches calcaires, dans le but d'identifier les caractéristiques minéralogique et chimique du gisement, a montré que ces derniers se composent : d'oxyde de silicium SiO₂ (\approx 1.75%), fer Feo₃ (\approx 0.2%), d'oxyde de titane TiO₂ (<0.5%), d'oxyde d'alumine Al₂O₂ (\approx 0.05%), d'oxyde manganèse MnO (\approx 0.05%), d'oxyde de magnésium MgO (0.062%), d'oxyde de sodium Na₂O (<0.5%), d'oxyde de quantités

importantes de la chaux (CaO) 54% environ et de pertes a feu PAF de 43%.

Les différentes caractéristiques physiques et mécaniques du matériau calcaire sont regroupées respectivement dans les tableaux suivants : (V-1) et (V-2)

Tableau V-1 : Caractéristiques physiques du matériau calcaire « Allili Hakim et AmokraneDjouher (Thèse Ingénieur 1999) »

caractéristiques Matériau	$\gamma_{s} \ (g/cm^{3)}$	n (%)	$\gamma_d (g/cm^{3})$	e _{min}	e _{max}
Calcaire	2,698	9,37	1,42	0,901	1,206

Tableau V-2 : Caractéristiques mécaniques du matériau calcaire « Allili Hakim et AmokraneDjouher (Thèse Ingénieur 1999) »

caractéristiques Matériau	MED (%)	LA (%)	γdopt (g/cm ³)	Wopt (%)	Résistance à la compression (Mpa)
Calcaire	20	24	1,62	5,58	50-60

La figure suivante, montre les trois classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3.15/8) nécessaires pour nos essais, obtenues après concassage et tamisage du calcaire.



Classe 3,15/5Classe 5/8Classe 3,15/8Figure V-1 : les échantillons du matériau calcaire utilisés pour notre étude (forme allongée).

2-2-Définition du grès

Roche sédimentaire d'origine détritique, formée de grains agglomérés par un ciment naturel siliceux, calcaire ou ferrugineux, donnant un ensemble à la dureté et à la cohésion variable, mais généralement assez dur et compact, utilisé notamment comme matériau de construction, de pavage, comme pierre à aiguiser.

Les grès sont des sables cimentés dans lesquels la taille des grains est inferieure à 2mm. Ils sont caractérisés par la dimension des grains, leur forme, leur classement et la nature du ciment qui est en général de la silice ou du calcaire, parfois de l'argile ou des hydroxydes de fer et des éléments accessoires.

La composition chimique du grès est composée essentiellement du 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 grès rouge ou brun rougeâtre et les autres donnent un grès blanc, jaunâtre ou grisâtre. La rupture de grès est caractérisée par la fracture du ciment mais pas des grains, qui eux restent entiers.

Les grès tirent leurs appellations de liant reliant leurs grains. On peut trouver des grès siliceux si le liant est la silice, grès calcaire ou argileux s'il s'agit du calcaire ou bien de l'argile comme liant. Et des grès ferrugineux si le ciment est un hydroxyde de fer.

2-2-1-Composition minéralogique du grès

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%
- 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.

2-2-2-Formations

Les dépôts successifs de sable se retrouvent dans la stratification du grès. La cimentation des grains se fait par précipitation et cristallisation des sels dissous dans l'eau interstitielle. On nomme ce processus la « grésification ». La roche prend des couleurs différentes selon l'origine et l'histoire de ce grès.

Si les grains sont peu cimentés, le grès est particulièrement poreux ; les couches géologiques constituées de tels grès peuvent former de réservoirs d'eau, de pétrole ou de gaz.

2-2-3-Localisation du matériau grès : Sur le territoire de la wilaya de Tizi-Ouzou, les niveaux géologiques favorables au développement des grès sont les nappes de flyshs (numidien) le miocène et l'oligo-miocène kabyle. Les grès 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 grès 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 pelites. Epais de plusieurs centaines de mètres ils constituent en volume l'essentiel de la série numidienne.

Les principaux minéraux des grès numidiens donnés (O.R.G.M) de Tizi-Ouzou sont présentés dans le tableau (V-3) suivant :

Tableau	V-3: Compositions	minéralogiques	des gr	ès numidiens	«Allili	Hakim	et A	Amokrane
Djouher	(Thèse Ingénieur 19	999) »						

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂₀	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

- *Les grès miocènes* sont totalement différents de ceux du numidiens, ils sont de couleur ocreuse, friables à ciment carbonaté. Il s'agit de grès silico-argileux.

Les principaux minéraux des grès miocènes donnés (O-R-G-M) de Tizi-Ouzou sont présentés dans le tableau (V-4) suivant :

Tableau V-4 : Compositions minéralogiques des grès miocènes « Allili Hakim et AmokraneDjouher (Thèse Ingénieur 1999) »

SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	$Al_2O_3(\%)$	CaO (%)	PAF (%)
56.18 à 76.30	1.07 à 2.96	9.20 à 14.10	12.58 à 14.88	12.58 à 13.69

Ces grès peuvent trouver une utilisation dans l'industrie du bâtiment.

La figure suivante, montre les trois classes granulaires (3,15/5), (5/8) et (3.15/8) nécessaires pour nos essais, obtenues après concassage et tamisage.



Classe 3,15/5Classe 5/8Classe 3,15/8Figure V-2 : les échantillons du matériau grès utilisés pour cette étude (forme allongée).

3-Préparation des échantillons

Le concassage des roches est effectué pour la production de granulats de formes variées, cubique ou isométrique et plate allongée ou parallélépipédique essentiellement, utilisables pour les infrastructures (construction de routes, bâtiments, ponts etc...).

Il ne sont généralement pas constitués par des éléments de tailles égales mais par un ensemble de grains dont la taille variée se repartissent entre la plus petite(d) et la plus grande(D) dimensions en mm.

✤ La forme des grains

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.

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.

La figure si dessous montre les degrés de forme des grains (d'après Krumbein W.C.1941).



Figure V-3: Degrés de forme des grains (d'après Krumbein W.C.1941).



Très anguleux Anguleux Sub-anguleux Sub-arrondis Arrondis Très arrondis Figure V- 4 : 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 ».

✤ Taille des grains

Les grains présentent les tailles différentes ; de la plus petite de l'ordre du μ à des grains de l'ordre des centimètres. Dans le cas des matériaux granulaires, la taille des grains est aussi un paramètre important. En effet, la taille des grains est corrélée à l'angularité, et également corrélée à la densité de micro fissures, les plus petites étant plus résistantes que les grosses ; autrement dit c'est l'effet d'échelle, et la rupture des grains augmente leur angularité. Ceci peut être attribué à une fragilité plus grande des points de contact à faible rayon de courbure. [Biarez J 1997].

Ces micros fissures se propagent lorsque les grains sont soumis à un chargement élevé, ce qui nous donne une cause importante de rupture des grains [Melbouci B 2002]. En effet, plus la taille augmente et plus la probabilité de présence des zones de faiblesse dans le

grain augmente.

Pour notre travail de recherche, deux types de matériaux granulaires ont été utilisés (le calcaire et le grès). Pour chaque matériau, on a retenu :

- Trois formes : anguleuse, sous arrondie et allongée (figure IV-5)



Figure V-5 : Les différentes formes utilisées.

- Trois classes granulaires : (3,15/5), (5/8) et (3,15/8).

1-matériau calcaire

Tableau V-5 : les refus des différents tamis de classe (3,15/5).

Ф (mm)	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Tamisât cumulé (g)	Tamisât cumulé (%)
5	43.642	43.642	60.435	58.067
4	33.052	76.694	27.383	26.310
3.15	27.383	104.078	0	0

Ф (mm)	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Tamisât cumulé (g)	Tamisât cumulé (%)
8	43.642	43.642	60.435	58.067
6	33.052	76.694	27.383	26.310
5	27.383	104.078	0	0

 Tableau V-6 : les refus des différents tamis de classe (5/8).

 Tableau V-7 : les refus des différents tamis de classe (3.15/8)

Ф (mm)	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Tamisât cumulé (g)	Tamisât cumulé (%)
8	25.564	25.564	78.618	75.461
6	23.425	48.99	55.192	52.976
5	21.071	70.061	34.121	32.751
4	19.253	89.315	14.867	14.270
3.15	14.867	104.183	0	0

2-matériau grès

Ф (mm)	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Tamisât cumulé (g)	Tamisât cumulé (%)
5	35.191	35.191	48.732	58.067
4	26.652	61.843	22.080	26.310
3.15	22.080	83.924	0	0

 Tableau V-8 : les refus des différents tamis de classe (3,15/5)

Tableau V-9 : les refus des différents tamis de classe (5/8)

Ф (mm)	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Tamisât cumulé (g)	Tamisât cumulé (%)
8	35.191	35.191	48.732	58.067
6	26.652	61.843	22.080	26.310
5	22.080	83.924	0	0

Ф (mm)	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Tamisât cumulé (g)	Tamisât cumulé (%)
8	20.614	20.614	63.394	75.461
6	18.88	39.503	44.504	52.976
5	16.991	56.494	27.513	32.751
4	15.525	72.020	11.988	14.270
3.15	11.988	84.008	0	0

 Tableau V-10 : les refus des différents tamis de classe (3.15/8)
 \$\$

4-Conclusion

Pour les essais de laboratoire, le type du matériau, la taille et la forme d'un agrégat (anguleux, arrondis ou autres...) joue un rôle très important pour définir la dimension fractale. Plus la forme d'un grain est irrégulière plus sa dimension fractale doit être importante et elle s'approche de 2. Ceci fera l'objet de la partie expérimentale.
CHAPITRE VI

Présentation et interprétation des

résultats.

1-Introduction

Dans ce Chapitre, nous présenterons les résultats des essais de cisaillement direct appliquées aux différents matériaux locaux utilisés (le calcaire et le grès) pour des classes granulaires variables et des formes différentes.

2- Présentation et interprétation des résultats

Les résultats des échantillons soumis au cisaillement direct à la boite de Casagrande sont représentés sous forme de courbes contraintes- déformations et courbes granulométriques avant et après cisaillement, en faisant varier les paramètres suivants :

- La contrainte normale (1,3et 4 bars) ;
- La classe granulaire (3.15/5, 5/8 et 3.15/8) ;
- La forme des échantillons (angulaire, sous arrondie et allongée).

2-1-courbes contraintes-déformations

2-1-1-courbes contraintes-déformations du matériau grès

Les figures suivantes présentent les courbes $\tau = f(\Delta L)$ du matériau grès pour les 3 classes granulaires et les trois formes sous les contraintes normales 1,3 et 4 bars.



Figure VI-1 : Courbes contraintes-déformations du matériau grès pour la classe 3.15/8 allongée.



Figure VI-2 : Courbes contraintes-déformations du matériau grès pour la classe 5/8 allongée.



Figure VI-3 : Courbes contraintes-déformations du matériau grès pour la classe 3.15/5 allongée.



Figure VI-4 : Courbes contraintes-déformations du matériau grès pour la classe 3.15/8 sous arrondie.



Figure VI-5 : Courbes contraintes-déformations du matériau grès pour la classe 5/8 sous arrondie.



Figure VI-6 : Courbes contraintes-déformations du matériau grès pour la classe 3.15/5 sous arrondie.



Figure VI-7 : Courbes contraintes-déformations du matériau grès pour la classe 3.15/8 angulaire.



Figure VI-8 : Courbes contraintes-déformations du matériau grès pour la classe 5/8 angulaire.



Figure VI-9 : Courbes contraintes-déformations du matériau grès pour la classe 3.15/5 angulaire.

2-1-2-courbes contraintes-déformations du matériau calcaire

Les figures suivantes présentent les courbes $\tau = f(\Delta L)$ du matériau calcaire pour les 3 classes granulaires et les trois formes sous les contraintes normales 1, 3 et 4 bars.



Figure VI-10 : Courbes contraintes-déformations du matériau calcaire pour la classe 3.15/8 *allongée.*



Figure VI-11 : Courbes contraintes-déformations du matériau calcaire pour la classe 5/8 allongée.



Figure VI-12 : Courbes contraintes-déformations du matériau calcaire pour la classe 3.15/5 allongée.



Figure VI-13 : Courbes contraintes-déformations du matériau calcaire pour la classe 3.15/8 sous arrondie.



Figure VI-14 : Courbes contraintes-déformations du matériau calcaire pour la classe 5/8 sous arrondie.



Figure VI-15 : Courbes contraintes-déformations du matériau calcaire pour la classe 3.15/5 sous arrondie.



Figure VI-16 : Courbes contraintes-déformations du matériau calcaire pour la classe 3.15/8 angulaire.



Figure VI-17 : Courbes contraintes-déformations du matériau calcaire pour la classe 5/8 angulaire.



Figure VI-18 : Courbes contraintes-déformations du matériau calcaire pour la classe 3.15/5 angulaire.

- Les contraintes de cisaillement (τ) des matériaux étudiés (grès et calcaire) augmentent en fonction de la contrainte normale appliquée σ.
- L'application d'une contrainte normale de plus en plus importante engendre un enchevêtrement et un frottement de plus en plus important entre les grains, ce qui empêche leur déplacement horizontal les uns par rapport aux autres et seront plus susceptibles à se casser qu'à se déplacer, tout en sachant que la force nécessaire pour casser un grain est beaucoup plus importante que celle nécessaire pour le déplacer.

2-2-Détermination des courbes intrinsèques

Après avoir obtenu les maximums des déformations, on trace les courbes intrinsèques.

2-2-1-Courbes intrinsèques du matériau grès

Les figures suivantes présentent les courbes intrinsèques du matériau grès pour les 3 classes granulaires et les trois formes :



Figure VI- 19 : Courbes intrinsèques du matériau grès pour les classes granulaires (3.15/8, 5/8 et 3.15/5) allongée.



Figure VI-20 : Courbes intrinsèques du matériau grès pour les classes granulaires (3.15/8, 5/8 et 3.15/5) sous arrondie.



Figure VI-21 : *Courbes intrinsèques du matériau grès pour les classes granulaires (3.15/8, 5/8 et 3.15/5) angulaire.*

La courbe intrinsèque nous renseigne sur l'angle de frottement et la cohésion de l'échantillon étudié, et c'est l'angle que fait la droite avec l'axe horizontal. Les différents résultats de l'angle de frottement pour le matériau grès sont regroupés dans le tableau VI-1.

Tableau	VI-1 :	Détermination	de	l'angle	de	frottement	des	différentes	formes	et	des
différentes classes pour le matériau grès.											

formes	classes granulaires	Angle de frottement (°)		
	3.15/8	35.82		
allongée	5/8	33.26		
	3.15/5	28.19		
	3.15/8	13.82		
Sous arrondie	5/8	15.37		
	3.15/5	23.89		
	3.15/8	44		
angulaire	5/8	27.11		
	3.15/5	32.82		

2-2-2-Courbes intrinsèques du matériau calcaire

Les figures suivantes présentent les courbes intrinsèques du matériau calcaire pour les 3 classes granulaires et les trois formes.



Figure VI-22 : Courbes intrinsèques du matériau calcaire pour les classes granulaires (3.15/8, 5/8 et 3.15/5) allongée.



Figure VI-23 : Courbes intrinsèques du matériau calcaire pour les classes granulaires (3.15/8, 5/8 et 3.15/5) sous arrondie.



Figure VI-24 : Courbes intrinsèques du matériau calcaire pour les classes granulaires (3.15/8, 5/8 et 3.15/5) angulaire.

Pour les échantillons du matériau calcaire les angles de frottement sont regroupés dans le tableau VI-2.

formes	classes granulaires	Angle de frottement (°)		
	3.15/8	54.169		
allongée	5/8	55.499		
	3.15/5	55.315		
	3.15/8	53.64		
Sous arrondie	5/8	53.35		
	3.15/5	53.292		
	3.15/8	48.79		
angulaire	5/8	56.129		
	3.15/5	53.93		

Tableau VI-2 : Détermination de l'angle de frottement des différentes formes et desdifférentes classes pour le matériau calcaire.

✓ Interprétation

L'angle de frottement le plus élevé est celui de la forme angulaire ; pour une valeur égale à 56° pour le matériau calcaire et une valeur égale à 44° pour le matériau grès. En effet, les angularités favorisent les frottements entre les grains contrairement à la forme sous arrondie qui présente un angle de frottement faible égal à 13° pour le matériau grès, mais il reste élevé pour le matériau calcaire d'une valeur égal à 53° vu sa rugosité qui empêche le glissement entre les grains.

2-3- Courbes granulométriques avant et après cisaillement

2-3-1- Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau grès

Les figures suivantes présentent les courbes granulométriques du matériau grès pour les 3 classes granulaires et les trois formes avant et après cisaillement sous les contraintes normales 1, 3 et 4 bars.



Figure VI-25 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau grès pour la classe 3.15/8 allongée.



Figure VI-26 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau grès pour la classe 5/8 allongée.



Figure VI-27 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau grès pour la classe 3.15/5 allongée.



Figure VI-28 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau grès pour la classe 3.15/8 sous arrondie.



Figure VI-29 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau grès pour la classe 5/8 sous arrondie.



Figure VI-30 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau grès pour la classe 3.15/5 sous arrondie.



Figure VI-31 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau grès pour la classe 3.15/8 angulaire.



Figure VI-32 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau grès pour la classe 5/8 angulaire.



Figure VI-33 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau grès pour la classe 3.15/5 angulaire.

2-3-2-Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau calcaire

Les figures suivantes présentent les courbes granulométriques du matériau calcaire pour les 3 classes granulaires et les trois formes avant et après cisaillement sous les contraintes normales 1, 3 et 4 bars.



Figure VI-34 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau calcaire pour la classe 3.15/8 allongée.



Figure VI-35 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau calcaire pour la classe 5/8 allongée.



Figure VI-36 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau calcaire pour la classe 3.15/5 allongée.



Figure VI-37 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau calcaire pour la classe 3.15/8 sous arrondie.



Figure VI-38 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau calcaire pour la classe 5/8 sous arrondie.



Figure VI-39 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau calcaire pour la classe 3.15/5 sous arrondie.



Figure VI-40 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau calcaire pour la classe 3.15/8 angulaire.



Figure VI-41 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau calcaire pour la classe 5/8 angulaire.



Figure VI-42 : Courbes granulométriques avant et après cisaillement du matériau calcaire pour la classe 3.15/5 mm angulaire.

- En comparant les courbes granulométriques obtenues après cisaillement aux courbes granulométriques initiales, nous avons constaté que celles après essais sont plus étalées que celles avant essai, cela s'explique par la production des particules fines inferieures à 3.15 mm, qui sont obtenues après écrasement des grains constituant les échantillons.

- Plus la contrainte normale appliquée augmente, plus les courbes granulométriques après essais se décalent et s'étalent ; ce qui montre qu'il y a plus d'écrasement. Cet écrasement entraine une diminution de la taille des grains et une modification de la forme et la texture des grains ; donc une modification de la valeur de la dimension fractale (*figure VI- 43*).



Figure VI- 43: grains cisaillés sous une contrainte normale de 4 bars.

3- Conclusion :

Les matériaux locaux (grès et calcaire) ont été soumis à l'essai de cisaillement direct à la boite sous contraintes normales (1, 3 et 4 bars), pour les différentes classes granulaires (3.15/8 ,3.15/5 et 5/8) et les différentes formes (allongée, sous arrondie, angulaire). Les résultats de l'étude ont montré que :

- Le phénomène d'écrasement des grains est significatif pour les contraintes assez élevées.
- Un décalage des courbes granulométriques après essai (un écrasement a été observé).
- L'angle de frottement le plus élevé est celui de la forme angulaire qui présente des arrêtes vives favorisant le frottement entre les grains.
- Le calcaire, de part de sa minéralogie, est plus résistant que le grès.

CHAPITRE VII

Détermination expérimental de

la dimension fractale

1-Introduction

Dans ce Chapitre, nous présenterons les résultats des différentes mesures de la dimension fractale appliquées aux différents matériaux locaux utilisés (le calcaire et le grès) pour des classes granulaires variables et des formes différentes.

La dimension fractale a été calculée avant et après essai par application de deux méthodes (la méthode des masses et la méthode de box counting) citées dans le chapitre II, qui sont deux méthodes les plus utilisées.

2-Détermination de la dimension fractale

2-1-Détermination de la dimension fractale par la méthode des masses

Le calcul de la dimension fractale par la méthode des masses se fera en fonction de la granulométrie et du type de matériau choisie. Cette dimension fractale est appelée dimension fractale de fragmentation DFr

Nous présentons ci dessous quelques figures illustrant un exemple de la variation de la DFr avant et après essai de cisaillement. La même procédure a été suivie pour les autres classes et les autres formes. Les résultats sont présentés dans l'annexe.

2-1-1-avant écrasement

Dans ce qui suit un exemple de calcul de la dimension fractale, pour les matériaux grès et calcaire, avec la méthode des masses a été présentée.

• Détermination de la dimension fractale pour le matériau grès

a) Exemple de calcul de la dimension fractale pour la classe 3.15/8 mm

Tableau VII-1: Masses cumulatives M(R < r)/MT en fonction des rapports de diamètres des tamis r/rl du matériau grés pour la classe 3.15/8 mm.

Ø mm	Refus g	r/rL	M(R < r)/MT
8	20,614473	1	0,75461547
6,3	18,889416	0,7875	0,52976517
5	16,9911	0,625	0,32751148
4	15,525513	0,5	0,14270342
3,15	11,988351	0,39375	0



Figure VII-1 : Dimension fractale DFr par la méthode des masses avant écrasement (grès, classe 3.15/8)

b) Calcul de la dimension fractale des classes 3.15/5 mm et 5/8mm

Remarque : avant écrasement, la dimension fractale de chaque classe est la même pour toutes les formes.



Figure VII-2 : Dimension fractale DF_r par la méthode des masses avant écrasement

(grès, classe 3.15/5 et 5/8 mm)



• Détermination de la dimension fractale pour le matériau calcaire



2-1-2-Après écrasement

Le calcul de la dimension fractale sera fait pour chaque classe et chaque forme de chaque matériau en fonction de la granulométrie.



Figure VII-4 : Dimension fractale DF_r par la méthode des masses après écrasement (grès, classe 3.15/8 angulaire)





D'après les résultats, la dimension fractale DFr des deux matériaux grès et calcaire a augmenté après l'essai. Cette augmentation est la conséquence de l'écrasement des grains. Exemple : la dimension fractale du matériau grés a augmenté de *0,3049* avant écrasement à une valeur de *2.3620* après écrasement.

2-1-3-Etude de l'évolution de la dimension fractale en fonction de la contrainte normale pour les matériaux grès et calcaire



Figure VII-6 : Evolution de la dimension fractale DFr en fonction de la contrainte normale de cisaillement (grès et calcaire, classe 5/8 mm).

La *Figure (VII-6)* montre que la dimension fractale de fragmentation DFr calculée par la méthode des masses pour les matériaux grès et calcaire, classe 5/8 mm allongée et sous arrondie, augmente proportionnellement avec la contrainte normale. Ce qui nous emmène à dire que plus la contrainte appliquée est importante plus les grains se fragmentent. En outre, on remarque qu'après écrasement la *DFr* du matériau grès est plus élevée que celle du calcaire. Cette différence s'explique par le fait que le gré est un matériau fragile, rugueux et qui s'effrite facilement à cause du ciment qui lie les grains entre eux.



2-1-4-Influence de la forme des grains sur l'évolution de la dimension fractale

Figure VII-7 : Evolution de la dimension fractale DFr en fonction de la contrainte normale (classe 5/8 mm)



Figure VII-8 : Evolution de la dimension fractale DFr en fonction de la contrainte normale (classe 3.15/5 mm)
Les figures (VII-7) et (VII) présentées ci-dessus, montrent que :

La dimension fractale la plus élevée est obtenue pour la forme sous arrondie, ce qui explique que la forme sous arrondie résiste moins au cisaillement par rapport aux autres formes. Par contre, La dimension fractale la plus faible est obtenue pour la forme angulaire qui est la forme la plus résistante au cisaillement. En effet, cette forme se caractérise par un angle de frottement élevé qui empêche le déplacement des grains dans l'échantillon lors des essais. Ainsi, la résistance au cisaillement augmente avec l'angle de frottement.





Figure VII-9 : Evolution de la dimension fractale DFr des différentes classes granulaires en fonction de la contrainte normale (grès et calcaire, forme allongée)



Figure VII-10 : Evolution de la dimension fractale DFr des différentes classes granulaires en fonction de la contrainte normale (grès et calcaire, forme sous arrondie)

Les courbes d'évolution de la dimension fractale DFr des différentes classes granulaires en fonction de la contrainte normale pour les deux matériaux grès et calcaire, pour les formes sous arrondie (*figureVII-9*) et allongée (figureVII-10), montrent que :

- La dimension fractale la plus élevée après écrasement est obtenue pour la contrainte normale de 400 KPa et pour la classe 5/8 des deux matériaux. Ce qui peut être expliqué par le fait que les gros grains (5/8), présentent des aspérités et sont sujettes à s'écraser lors de cisaillement plus que les petits grains (Ramamurthy 1969).
- La dimension fractale la plus faible après écrasement est celle de la classe 3.15/8 pour les deux matériaux. Ce qui peut être expliqué par le fait que les petits grains se redistribuent dans les interstices existants ce qui provoque une faible déformation avec un faible écrasement des grains.

2-2-Détermination de la Dimension fractale par la méthode de box counting

La dimension fractale de rugosité DF a été calculée pour les différents échantillons étudiés, en utilisant le logiciel MATLAB R2009b, pour faciliter les calculs, à l'aide d'un programme

implémenté qui traite le contour d'un grain suivant le même principe que la méthode de Box Counting définie dans le chapitre II.

Les résultats obtenus de l'évolution de la dimension fractale DF de rugosité après essais sont analysés, en fonction de la contrainte de cisaillement appliquée, de la classe granulaire, de la nature du matériau, de la taille et de la dimension des grains. Les autres figures représentant la suite des résultats sont présentées dans l'annexe.

2-2-1-Etude de l'influence de la contrainte normale sur l'évolution de la dimension fractale de rugosité

Les figures ci-dessous, montrent l'évolution de la dimension fractale des grains de classe 3.15/5 mm de forme allongée après les essais de cisaillement direct, sous différentes contraintes appliquées.



Figure VII-11 : Evolution de la dimension fractale DF en fonction de la taille des grains (grès, 3.15/5 mm allongée).



Figure VII-12: Evolution de la dimension fractale DF en fonction de taille des grains (calcaire, 3.15/5 mm allongée).

Les figures montrent que la variation de la dimension fractale augmente avec l'augmentation de la contrainte normale appliquée (figure *VII-11*) et (figure *VII-12*). Donc plus la contrainte augmente, plus le taux d'écrasement augmente. En effet, les grains changent de forme et deviennent plus irréguliers et plus rugueux.





Figure VII-13: Evolution de la dimension fractale DF en fonction de la taille des grains (grès sous arrondie).



Figure VII-14: Evolution de la dimension fractale DF en fonction de la taille des grains (calcaire sous arrondie).

Les courbes d'évolution de la dimension fractale DF de rugosité des différentes classes granulaires des deux matériaux grès et calcaire, pour la forme sous arrondie (figure *VII-13*) et (figure *VII-14*), montrent que :

L'écart de la dimension fractale le plus élevé après écrasement est obtenu pour la contrainte normale de 400 kPa et pour la classe 5/8 mm des deux matériaux. Ce qui peut être expliqué par la présence des angularités ou des fissures au niveau des gros grains qui peuvent éventuellement favoriser leur écrasement plus que les petits grains (Ramamurthy 1969). Cet écrasement provoque l'augmentation de la rugosité de leurs parties surfaciques donc l'augmentation de la dimension fractale.

La dimension fractale la plus faible après écrasement est celle de la classe 3.15/5 mm pour les deux matériaux. Ce qui peut être expliqué par le fait que les petits grains s'écrasent moins donc un changement moindre de leur forme.

2-2-3-Etude de l'influence de la forme des grains sur l'évolution de la dimension fractale de rugosité



Figure VII-15: Evolution de la dimension fractale DF en fonction de la taille des grains (grès, 3.15/8 mm).



Figure VII-16: Evolution de la dimension fractale DF en fonction de la taille des grains (calcaire, 5/8 mm).

L'écart de la dimension fractale le plus élevé est obtenu pour la forme sous arrondie, cela est due au fait que la forme sous arrondie s'écrase plus que les autres formes. Par contre, l'écart de la dimension fractale le plus faible est obtenu pour la forme angulaire, ce qui signifie sa forte résistance au cisaillement donc un écrasement moindre engendrant un contour moins irrégulier.



2-2-4-Etude de l'influence de la nature du matériau sur l'évolution de la dimension fractale de rugosité

Figure VII-17: Evolution de la dimension fractale DF en fonction de la taille des grains (grès et calcaire, 3.15/8 mm sous arrondie).

✓ Interprétation des résultats

La figure (*VII-17*) montre que l'écart de la dimension fractale est plus important pour le grès que pour le calcaire. Cette différence s'explique par le fait que le grès est un matériau fragile, rugueux et qu'il s'écrase facilement.

3-Conclusion

Les résultats de calcul de la dimension fractale obtenus par la méthode des masses et par la méthode de box counting, ont montré que :

- La dimension fractale augmente après les essais de cisaillement direct, et cela pour les deux types de matériaux utilisés.
- L'augmentation de la contrainte normale appliquée fait augmenter l'écrasement des grains et influe ainsi sur la variation de la dimension fractale.
- La variation de la dimension fractale des grains est affectée par plusieurs paramètres (la dimension, la taille et la forme des grains ainsi que la contrainte appliquée...etc.).
 Ceux -ci influent significativement sur le mode de rupture des grains et conduisent par conséquent à l'augmentation des irrégularités des grains.

Conclusion générale

Le but principal de ce travail est l'étude expérimentale de l'évolution de la dimension fractale des grains en fonction de leur écrasement à l'essai de cisaillement. Cependant, le calcul de la dimension fractale à été effectué par deux méthodes :

La méthode des masses qui donne la dimension fractale de fragmentation DFr en fonction de la classe granulaire et du type de matériau choisi. La valeur élevée de cette dimension indique que l'échantillon est fractal ou a une plus grande quantité de particules fines.

La méthode de box counting donne la dimension fractale de rugosité *DR* qui indique le degré de rugosité par rapport à un échantillon de grain donné.

Les résultats obtenus après les essais de cisaillement permettent de conclure que :

- La dimension fractale augmente après les essais, et cela pour les deux types de matériaux utilisés (grès et calcaire) ;

- Tous les échantillons étudiés ont montré un écrasement appréciable sous cisaillement à contrainte normale maximale de 400 KPa, particulièrement pour la classe granulaire (5/8) et pour la forme sous arrondie.

Le phénomène d'écrasement des grains a mis en évidence l'évolution de la dimension fractale. Les grains des deux matériaux (grès et calcaire) peuvent subir l'écrasement pendant le cisaillement dont l'ampleur dépend de la résistance au cisaillement, de la taille des aspérités, de la dureté, de la forme et de la surface des grains. L'évolution de la dimension fractale donne naissance à une nouvelle structure granulaire avec de nouvelles caractéristiques géotechniques telles la compacité, la granulométrie et la résistance ...etc. qui sont différentes de la structure mère. Aussi l'évolution de cette dimension dépend de la nature minéralogique du matériau granulaire. En effet, le matériau grès présente une dimension fractale supérieure à celle du calcaire.

<u>Références Bibliographiques</u>

Achir mourad., (2011)

« Caractérisation du phénomène d'écrasement par l'étude de la dimension fractale des grains » ; Mémoire de magister de L'UMMTO, 2011.

Alili, H. et Amokrane, D., (1999)

« Comportement Mécanique des Grés » ; Mémoire d'Ingénieur de L'UMMTO, 1999.

Biarez, J., (1962)

« Contribution à l'étude des Propriétés Mécaniques des Sols et des Matériaux Pulvérulents » ;

Thèse de doctorat des sciences, Faculté des sciences de Grenoble, 1962.

Biarez, J. et Hicher, P.Y., (1997)

« Influence de la granulométrie et de son évolution par ruptures de grains sur le comportement mécanique de matériau granulaires » ; Revue française de génie civil, vol 1, N° 4, pp 607-631, 1997.

Bishop, A.Wand Henkel, D.L., (1962)

« The Measurement of Soil Properties in The Triaxial Test»; Edward Arnold publication Ltd,

London, 1962.

Bowden, F. P and Tabor, D., (1956)

«Friction and lubrication»; Methuen's Monographs on physical Subjects, Oxford 1956.

Cambou, B., (1972)

« Compressibilité d'un milieu pulvérulent : influence de la dorme et de la dimension des particules sur les propriétés mécaniques d'un milieu pulvérulent » ; Thèse de docteur de spécialité- université scientifique et médicale, Grenoble ,1972.

Dowell, G.R. et Bolton, M.D., (1998)

«On the micromechanics of crushable aggregates»; Géotechnique 48, N° 5, 1998.

Falconer k, Chichester et Wiley J., (1990)

«Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications»; 2e éd, poche, ISBN 978-0 470-84862-3, LCCN 2004271361

George Arquie et Claude Tourenq., (1990)

« granulats » ; Edition de l'école des ponts et chaussées de paris, 1990.

Guyon, E. et Troadec J.P., (1994)

« Du sac de billes au tas de sables » ; Edition Odile Jacob, Sciences, 1994.

Huang.G.H et Zhan.W.H., (2002)

«Fractal property of soil particle size distribution and its application »; Acte Pedologica Sinica, 39, 490-497, 2002.

Josiane Lajoie., (2006)

«La géométrie fractale» ; mémoire de magister de l'université du QUEBEC, juin 2006.

Kevin.P Hammer., (2005)

«Analysis Of Granular Materials In Pennsylvania Highways Fractals In Geology And Geophysics» ; Mémoire Master de science de l'Université de Pittsburgh, 2005.

Kim, M.S., (1995)

« Etude Expérimentale Du Comportement Mécanique Des Matériaux Granulaires Sous Fortes Contraintes » ; Thèse de doctorat de l'école centrale de paris, Décembre 1995.

Krumbein W.C., (1941)

«Mesuarement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles»; Journ. Sed. Petrol., 11(2) 64 – 72., 1941.

Lade P.V., Yamamuro J. A., et al., (1996)

«Significance of Particle Crushing in Granular Materials»; Journal of Geotechnical Engineering, vol. 122, N° 4, 1996, pp 3109-3116.

LCPC., (1986)

« Essai de cisaillement à la boite » ; Méthode d'essai nº 21, Février 1986.

Mandelbrot, B.B., (1983)

«The Fractal Geometry of Nature »; Free Man, New York, 1983.

Mandelbrot, B.B., (1975)

« Les objets fractales forme, hasard et dimension » ; Paris (France), Edition Flammarion, 1975.

Marsal, R.J., (1967)

« Large Scale Testing of Rock fills Materials »; journal of the soil Mechanics and Foundations Division 93(SM2), 1967.pp 27-43.

Melbouci, B., (2007)

« Etude expérimentale du comportement des grains du matériau grès à l'écrasement » ; Revue Technologique et Scientifique COST (ENSET-Oran), 2007.ISSN 1112-5187- T. N° 5 – Janvier 2007.

Ramamurthy, T., (1969)

« Crushing Phenomena in Granular Soils »; Journal of the Indian National Society of Soil Mechanics and Foundation Eng. Vol.8, 1969.

Vesic.A.C. and Clough.G.W., (1968)

«Behavior of Granular Materials under high stresses»; journal of the soil mechanics and foundations divisions, ASCE, Vol 94, pp 661-688, 1968.

Wang X, li M-H, Lui S, Lui G., (2006)

« Fractal characteristics of soils under different land-use patterns in the arid and semiarid regions of the Tibetan plateau» ;China, Geoderma, 134 (1-2), pp 56-61.

Quelques photos des grains de différentes tailles après les essais de cisaillement direct

✓ Grains du grès de 8 mm allongés avant et après essais



✓ Grains du grès de 8 mm angulaires avant et après essais



✓ Grains du grès de 6 mm sous arrondies avant et après essais



✓ Grains du calcaire de 5 mm allongé avant et après cisaillement



✓ Grains du calcaire de 4 mm angulaire avant et après cisaillement



✓ Grains du grès de 3 mm sous arrondie avant et après essais



Avant écrasement

Ecrasement sous 1bars





Nous présentons ci dessus les figures illustrant le calcul de la dimension fractale, DFr, après chaque essai de cisaillement, sous trois contraintes normales (1, 3 et 4 bars) avec la méthode des masses.



Dimension fractale du matériau grès, classe 3.15/8

Figure VII-1 : Dimension fractale DF_r par la méthode des masses après écrasement (matériau grés, classe 3.15/8 mm allongée)



Figure VII-2 : Dimension fractale DF_r par la méthode des masses après écrasement (matériau grés, classe 3.15/8 mm sous arrondie)



Dimension fractale du matériau grès, classe 3.15/5

Figure VII-3 : Dimension fractale DF_r par la méthode des masses après écrasement (matériau grés, classe 3.15/5 mm allongée)



Figure VII-4 : Dimension fractale DF_r par la méthode des masses après écrasement (matériau grés, classe 3.15/5 mm sous arrondie)



Figure VII-5 : Dimension fractale DF_r par la méthode des masses après écrasement (matériau grés, classe 3.15/5 mm angulaire)



Dimension fractale du matériau grès, classe 5/8

Figure VII-6: Dimension fractale DF_r par la méthode des masses après écrasement (matériau grés, classe 5/8 mm allongée)



Figure VII-7 : Dimension fractale DF_r par la méthode des masses après écrasement (matériau grés, classe 5/8 mm sous arrondie)



Figure VII-8 : Dimension fractale DF_r par la méthode des masses après écrasement (matériau grés, classe 5/8 mm angulaire)



Dimension fractale du matériau calcaire, classe 3.15/8

Figure VII-9 : Dimension fractale DF_r par la méthode des masses après écrasement (matériau calcaire, classe 3.15/8 mm allongée)



Figure VII-10 : Dimension fractale DF_r par la méthode des masses après écrasement (matériau calcaire, classe 3.15/8 mm sous arrondie)



Dimension fractale du matériau calcaire, classe 5/8

Figure VII-11 : Dimension fractale DF_r par la méthode des masses après écrasement (matériau calcaire, classe 3.15/5 mm allongée).



Figure VII-12 : Dimension fractale DF_r par la méthode des masses après écrasement (matériau calcaire, classe 3.15/5 mm sous arrondie)



Figure VII-13 : Dimension fractale DF_r par la méthode des masses après écrasement (matériau calcaire, classe 3.15/5 mm angulaire)





Figure VII-14: Dimension fractale DF_r par la méthode des masses après écrasement (matériau calcaire, classe 5/8 mm allongée)



Figure VII-15: Dimension fractale DF_r par la méthode des masses après écrasement (matériau calcaire, classe 5/8 mm sous arrondie)



Figure VII-16 : Dimension fractale DF_r par la méthode des masses après écrasement (matériau calcaire, classe 5/8 mm angulaire)

 Nous présentons ci dessus les figures illustrant la variation de la dimension fractale de rugosité DF, après chaque essai de cisaillement, sous trois contraintes normales (1, 3 et 4 bars) avec la méthode de box counting.

Evolution de la dimension fractale du matériau grès, classe 3.15/8

Figure VII-17 : Evolution de la dimension fractale sous les différentes contraintes normales (matériau grès, classe 3.15/8 sous arrondie)



Figure VII-18 : Evolution de la dimension fractale sous les différentes contraintes normales (matériau grès, classe 3.15/8 allongée)



Figure VII-19 : Evolution de la dimension fractale sous les différentes contraintes normales (matériau grès, classe 3.15/8 angulaire)





Figure VII-20 : Evolution de la dimension fractale sous les différentes contraintes normales (matériau grès, classe 3.15/5 sous arrondie)



Figure VII-21 : Evolution de la dimension fractale sous les différentes contraintes normales (matériau grès, classe 3.15/5 angulaire)





Figure VII-22 : Evolution de la dimension fractale sous les différentes contraintes normales (matériau grès, classe 5/8 sous arrondie)



Figure VII-23 : Evolution de la dimension fractale sous les différentes contraintes normales (matériau grès, classe 5/8 allongée)



Figure VII-24 : Evolution de la dimension fractale sous les différentes contraintes normales (matériau grès, classe 5/8 angulaire)



Evolution de la dimension fractale du matériau calcaire, classe 3.15/8

Figure VII-25 : Evolution de la dimension fractale sous les différentes contraintes normales (matériau calcaire, classe 3.15/8 sous arrondie)



Figure VII-26 : Evolution de la dimension fractale sous les différentes contraintes normales (matériau calcaire, classe 3.15/8 allongée)



Figure VII-27 : Evolution de la dimension fractale sous les différentes contraintes normales (matériau calcaire, classe 3.15/8 angulaire)





Figure VII-28 : Evolution de la dimension fractale sous les différentes contraintes normales (matériau calcaire, classe 3.15/5 sous arrondie)



Figure VII-29 : Evolution de la dimension fractale sous les différentes contraintes normales (matériau calcaire, classe 3.15/5 angulaire)





Figure VII-30 : Evolution de la dimension fractale sous les différentes contraintes normales (matériau calcaire, classe 5/8 sous arrondie)



Figure VII-31 : Evolution de la dimension fractale sous les différentes contraintes normales (matériau calcaire, classe 5/8 allongée)



Figure VII-32 : Evolution de la dimension fractale sous les différentes contraintes normales (matériau calcaire, classe 5/8 angulaire)