

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMARI 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 ACADEMIQUE

Spécialité : Génie Civil

Option : Géotechnique et Environnement

Présenté par :

M^{elle} : OUAAZ Oumessaad

Sujet :

*Etude de la dégradation des grains sous les
conditions climatiques : calcul de leur dimension
fractale*

Devant le jury d'examen suivant :

Mr HAMZA Ali, Maître de conférences à l'UMMTO.....président
Mr MELBOUCI Bachir, Professeur à l'UMMTOPromoteur
Mm BOUBRIT Hassiba, Maître Assistante A à l'UMMTO.....Examinatrice
Mm BAIDI Fawzia, Maître Assistante A à l'UMMTOExaminatrice

Année Universitaire : 2013/2014

Remerciements

Ce travail de recherche a été mené 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.

Au premier lieu, je remercie dieu de toutes puissances,

En second, mes très chers parents qui jouent le rôle principal dans de ma vie, qui m'ont encouragée pour l'aboutissement de tous mes projet et en particulier ce mémoire.

*Je tien tout d'abord à remercier vivement mon directeur de mémoire monsieur **MELBOUCI Bachir**, professeur a l'Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, d'avoir mis a ma disposition sa plein disponibilité et réuni de tout les moyens nécessaires pour la réalisation de se travail.*

*J'adresse mes vifs remerciements a monsieur **HAMZA Ali** qui est Maître de conférences à l'UMMTO, madame **BOUBRIT Hassiba** qui est Maître Assistante A a l'UMMTO et madame **BAIDI Fawzia** Maître Assistante A a l'UMMTO qui m'ont fait l'honneur d'examiner se travail, je les prie de croire a ma respectueuse reconnaissance.*

*Je souhaite remercier monsieur **BOUKAROUB M^{ed} 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.*

*Mes remerciement s'adressent a l'ensemble des membres du laboratoire LGEA, spécialement **BOUZEBODJA Aldjia**, **MEDJENOUNE Amel**, doctorantes en géotechnique et environnement et **LASHEB Micipsa** doctorant en géotechnique et environnement.*

Je remercie toute mes copines sans s'exception (surtout Souad, thafsouth et Siham) d'avoir été a mes cote durant cette année.

Mes plus vifs remerciement sont adressés également a tous mes enseignants de l'universite MOULOUD MAMMERI de TIZI-OUZOU.

Dédicace

Je dédie ce lapidaire travail:

**A mes très chers parents qui m`ont guide durant les moments les plus pénible de ce long chemin, ma mère qui a été a mes cotés et ma soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voire atteindre mes buts.*

**A mes très chers frères (NABIL, HAMZA, AMINE).*

**A mes très chères sœur (Souad, Rima ,Assia ,Imane).*

**A mon adorable neveu Islam*

** A Tous mes amis (es), mes proches et mes copines sans exception.*

**A tous les étudiants (es) de ma promotion.*

SOMMAIRE

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des principales notations et indices

Introduction générale..... 1-2

Chapitre I : généralité sur la notion de fractal

I-1) Introduction3

I-2) Définition4

I-3) Exemple de fractals naturels4

I-3-1) La fractalité des côtes4

I-3-2) Les fractales dans les végétaux5

I-3-3) Le Chou-fleur5

I-3-4) Corps humain6

I-4) Notion de dimension7

I-4-1) Dimension fractale8

I-4-2) Dimension euclidienne ou topologique8

I-4-3) Définition mathématique de la dimension fractale11

I-4-4) Vérification avec la dimension classique11

I-4-5) Dimension de Haudorff-besicovitch ou dimension de recouvrement.....12

I-4-6) Dimension de Bouligand-Minkowski.....	12
I-4-7) La saucisse de Minkowski	13
I-5) Méthodes de calcul	14
I-5-1) La Méthode des boites (Box Counting)	14
I-5-2) La Méthode des boules disjointes	14
I-5-3) La Méthode du Compas (Richardson, 1960)	15
I-5-4) Méthode des lignes parallèles	16
I-5-5) Line Divider (méthode du diviseur)	17
I-5-6) méthodes des masses.....	19
I-6) Application a la dimension fractale.....	20
I-6-1) Le flocon de Koch.....	20
I-6-2) Le triangle de Sierpinski	23
I-6-3) Le tapis de Sierpinski	24
I-6-4) Eponge de Menger	25
I-6-5) L`ensemble de Cantor	25
I-6-6) L`ensemble de Mandelbrot	26
I-6-7) L`ensemble de Julia	27
I-7) Les différents types de fractales	28

I-7-1) Fractale déterministes	28
I-7-2) Fractale non déterministes	29
I-8) Forme des grains	29
I-9) Diversités des formes de grains	30
I-10) la rugosité	31
I-11) Taille des grains	32
I-12) Ecrasement des grains selon (Guyon et Troadec ,1994)	32
I-13) Conclusion	34

Chapitre II : généralité sur les essais

II-1) introduction	35
Methode par tamisage a sec apres lavage	36
II-2-1) Principe d`essai.....	36
II-2-2) Appareillage.....	37
II-2-3) Mode opératoire	38
II-3) Essai Gel/dégel	38
II-3-1) La gélifraction	39
II-3-2) Principe d`essai.....	40
II-3-3) Appareillage.....	40

II-3-4) Déroulement d`essai.....	41
II-4) Essai de Dégradabilité	41
II-4-1) But d`essai.....	41
II-4-2) Le coefficient de dégradabilité.....	41
II-4-3) Principe d`essai	42
II-4-4) Appareillage et matériel d`essai.....	42
II-4-5) Déroulement d`essai.....	43
II-5) Essai d`altérabilité.....	43
II-5-1) Définition d`altérabilité.....	43
II-5-3) Appareillage	43
II-5-4) mode opératoire	44
II-5) conclusion	44

Chapitre III : identification des matériaux d`étude

III-1)-Introduction	45
III-2) La pegmatite.....	46
III-2-1) Localisation du matériau pegmatite.....	46
III-3) Le schiste.....	49
III-3-1) Définition des schistes.....	49

III-3-2) Les différents types de schiste.....	50
III-3-3) la composition minéralogique du schiste.....	51
III-3-4) caractéristiques physiques du schiste.....	51
III-3-5) Résultats des essais CBR et Proctor	52
III-4) Le gré.....	53
III-4-1) Définition du gré	53
III-4-2) Localisation du matériau grés.....	53
III-4-3) Composition minéralogique du gré.....	54
III-5) La marne	55
III-5-1) Définition de la marne.....	55
III-5-2) Les différents types de marnes.....	55
III-5-3) Etude géologique.....	57
III-5-4) Caractéristiques physiques et chimiques.....	58
III-5-5) Analyse minéralogique.....	59
III-5-6) Les caractéristiques mécaniques.....	60
III-6) Conclusion.....	60

Chapitre IV : déroulement des essais et calcul de la dimension fractale

IV-1) Introduction	61
Partie 1 : préparation des échantillons.....	62
IV-2) concassage des matériaux	63

IV-3) le tamisage	64
IV-4) la sélection des grains	64
IV-4-1) le schiste.....	65
IV-4-2) la marne.....	66
IV-4-3) le gré.....	67
IV-4-4) la pegmatite.....	67
IV-5) Confection des échantillons	68
IV-6) analyse granulométrique	70
IV-6-1) Le schiste	71
IV-6-2) la marne	72
IV-6-3) Le gré	73
IV-6-4) La pegmatite	74
Partie 2 : déroulement des essais et calcul de la dimension fractale.....	75
IV-7) Courbes granulométriques et calcul de la dimension fractale (méthode des masses) après essai	76
IV-7-1) Essai gel/dégel	76
IV-7-2) Essai d`altérabilité.....	90
IV-7-3) Essai de dégradabilité	103
IV-7-3-a) courbes granulométriques et dimension fractales.....	104
IV-7-3-b) - Valeurs des dimensions fractales	119
IV-8)- L`influence de la classe sur la dimension fractale	120

IV-8-1) -Essai gel/dégel	120
IV-8-1-a) -Cas de la classe 0/5	120
IV-8-1-b) Cas de la classe 5/10	124
IV-8-2)-Essai d`altérabilité.....	127
IV-8-2-a) Cas de la classe 0/5.....	127
IV-8-2-b) Cas de la classe 5/10.....	130
IV-10) Conclusion	138
IV-11) Détermination de la dimension fractale par la méthode de compactage des boites (box counting ; périmètre)	139
IV-11-1) Exemple d`application	140
IV-11-2) Essai de gel /dégel	142
IV-11-3) Essai d`Altérabilité.....	156
IV-11-4) Essai de dégradabilité	170
IV-12) comparaison des résultats obtenue	183
IV-12-1) Gel/dégel	183
IV-12-2) L`altérabilité	185
IV-12-3) Dégradabilité	186
IV-13) conclusion.....	189
IV-14) conclusion générale	190
Référence bibliographique.....	191-192
Annexes	193-220

Liste des figures

Figure I- 1: le fractale d'une cote (PAOLI B, VAUTHIER T, FRAPPIER L, KENDE M ,2003).....	5
Figure I- 2: le fractale de fougère (PAOLI B, VAUTHIER T, FRAPPIER L, KENDE M ,2003).....	5
Figure I- 3: le fractale des Choux-fleurs (PAOLI B, VAUTHIER T, FRAPPIER L, KENDE M ,2003).....	6
Figure I-4 : Modélisation fractale de neurone	6
Figure I-5 : ramification sanguine pulmonaire.....	6
Figure I-6 la faractalité de L'intestin grêle (PAOLI B, VAUTHIER T, FRAPPIER L, KENDE M ,2003).....	7
Figure I-7 : Pavages des lignes, surfaces ou volumes.....	7
Figure I-8 : Illustration du rapport entre dimensions fractale et euclidienne (Achir Mourad ,2011).....	8
Figure I-9 : Mesure par comptage des boîtes dans un espace euclidien.....	9
Figure I-10 : les 3 dimensions entières.....	10
Figure I- 11: Saucisse de Minkowski ou épaisseur d'une courbe.....	13
Figure I- 12 : Mesure de la dimension d'une courbe par la méthode des boîtes.....	14
Figure I-13 : Mesure de la dimension d'une courbe par la méthode des boules disjointes.....	15
Figure I-14 : Variation du nombre L de segment d'une ligne brisée (en fonction de la taille S de l'unité de mesure) nécessaire pour mesurer la longueur de la ligne.....	15

Figure I-15 : Mesures de la longueur d'une côte par report d'unités différentes.....	16
Figure I-16 : Méthode des lignes parallèles (Kevin P. Hammer, 2005).....	17
Figure I-17 : Frontières des grains après analyse d'images. Les figures b, c et d représentent les Polygones formés à partir de différentes tailles de mesure.....	18
Figure I-18 : Fragmentation du segment [AB] à l'itération zéro.....	20
Figure I-19 : Première itération, les segments ont pour longueur $L/3$	20
Figure I-20 : Seconde itération, les segments ont pour longueur $L/3^2 = L/9$	21
Figure I-21 : Flocon de Von Koch à la troisième itération.....	22
Figure I-22 : Illustration de la méthode du comptage de boîte.....	22
Figure I-23 : le triangle de Sierpinsky (Jacques MANDONNET 2013).....	24
Figure I-24 : Tapis de Sierpinski (SIERPINSKI Waclaw, polonais, 1882-1969).....	24
Figure I-25 : l' Eponge de Menger (Karl Menger, 1926).....	25
Figure I-26 : L'ensemble de Cantor.....	26
Figure I-27 : ensemble de Mandelbrot.....	26
Figure I-28 : l'ensemble de Julia	28
Figure I-29 : Fractales déterministes d'un milieu granulaire (Belmihoub Hacene 2013).....	28
Figure I-30 : Fractales non déterministes d'un milieu granulaire.....	29
Figure I-31 : Degré de forme des grains (d'après Krumbein W.C.1941).....	30
Figure I-32 : Différentes formes des grains.....	31

Figure I-33 : différent mode de rupture selon Guyon et Troadec 1994.....	33
Figure II-1 : résultat du tamisage (Dahoumane kahina, 2012).....	36
Figure II-2 : vibro- tamis.....	37
Figure II-3 : tamis.....	37
Figure II-4 : Le gel.....	38
Figure II-5 : le dégel.....	38
Figure II-6 : l`effet du gel dans la nature.....	39
Figure II-7 : l`effet du gel sur les chaussées (Grouques , L caniard ,1975).....	40
Figure II-8 : Effet du gel sur les roches (Caroline M).....	40
Figure II-9 : l`enceinte climatique.....	40
Figure III-1 : la pegmatite.....	46
Figures III-2 : le schiste.....	49
Figure III-3 : le gré a étudiée.....	53
Figure III-4 : le cite d`extraction de marne.....	55
Figure III-5 : la marne à étudier.....	55
Figure III-6 : l`altération de la marne (kichi 2013).....	56
Figure III-7 : Diffractogramme obtenue pour la Marne.....	59
Figure IV-1 : concassage du gré.....	63
Figure IV-2 : La tamiseuse utilisée.....	64

Figure IV-3 : Tamisage manuel.....	64
Figure IV-4 : grains sous-arrondis de schiste	65
Figure IV-5 : grains anguleux de schiste.....	65
Figure IV-6 : schiste de grains de forme allongée.....	65
Figure IV-7 : marne de forme sous arrondie.....	66
Figure IV-8 : marne de forme anguleuse.....	66
Figure IV-9 : grains de forme allongée de marne.....	66
Figure IV-10 : grés de forme sous arrondie.....	67
Figure IV-11 : grés de forme anguleuse.....	67
Figure IV-12 : Grains de pegmatite.....	67
Figure IV-13 : Eprouvette du matériau imposé.....	68
Figure IV-14 :Forme allongée de marne 10/16.....	69
Figure IV-15 :Forme allongée de marne 5/10.....	69
Figure IV-16 : marne anguleuse 0/5.....	69
Figure IV-17 : l'échantillon globale à étudier.....	69
Figure IV-18 : Courbe granulométrique initiale.....	70
Figure IV19 : Calcul de la dimension fractale du schiste avant essai.....	71
Figure IV-20 : Calcul de la dimension fractale de la marne avant essai.....	72
Figure IV-21 : Calcul de dimension fractale du gré avant essai.....	73
Figure IV- 22 : Calcul de la dimension fractale de la pegmatite avant essai.....	74

Figure IV-23: enceinte climatique.....	76
Figure IV-24: enceinte climatique à 20°C.....	76
Figure IV-25 : enceinte climatique à 0°C	76
Figure IV-26 : enceinte climatique a -10°C.....	76
Figure IV-27 : Le gel.....	77
Figure IV-28: Le dégel.....	77
Figure IV-29: L`effet du gel.....	77
Figure IV-30: Les échantillons après l`essai.....	77
Figure IV-31: Courbe granulométrique des grains de schiste de forme sous arrondie après essai gel/dégel.....	78
Figure IV-32 : Courbe granulométrique des grains de schiste de forme allongée après essai gel/dégel.....	79
Figure IV-33 : Courbe granulométrique des grains de schiste de forme anguleuse après essai gel/dégel.....	80
Figure IV-34 : Courbe granulométrique de la marne sous arrondie après essai gel/dégel.....	81
Figure IV-35 : Courbe granulométrique de la marne anguleuse après essai gel/dégel.....	82
Figure IV-36: Courbe granulométrique de la marne allongée après essai gel/dégel.....	83
Figure IV-37 : Courbe granulométrique des grains de gré de forme anguleuse après essai gel/dégel.....	84
Figure IV-38 : Courbe granulométrique des grains de gré de forme sous-arrondie après essai gel/dégel.....	85
Figure IV-39 : Courbe granulométrique de la pegmatite après essai gel/dégel.....	86
Figure IV-40 : Comparaison des courbes granulométriques des 3 formes de schiste obtenues avant et après essai.....	87

Figure IV-41: Comparaison des courbes granulométriques des 3 formes de la marne obtenues avant et après essai.....	87
Figure IV-42 : Comparaison des courbes granulométriques des 3 formes du gré obtenues avant et après essai.....	88
Figure IV-43: Comparaison des courbes granulométriques des 3 formes des 4 matériaux obtenues avant et après essai.....	88
Figure IV-44: L`enceinte climatique a 45°c.....	90
Figure IV-45 : L`enceinte climatique a 25°c.....	90
Figure IV-46 : L`enceinte climatique a 0°c	90
Figure IV-47 : L`enceinte climatique a -10°c.....	90
Figure IV-48 : Courbe granulométrique des grains de schiste de forme sous arrondie après essai d`altérabilité.....	91
Figure IV-49 : Courbe granulométrique des grains de schiste de forme allongée après essai d`altérabilité.....	92
Figure IV-50 : Courbe granulométrique des grains de schiste de forme anguleuse après essai d`altérabilité.....	93
Figure IV-51: Courbe granulométrique de la marne sous arrondie après essai d`altérabilité...	94
Figure IV-52: Courbe granulométrique de la marne anguleuse après essai d`altérabilité.....	95
Figure IV-53 : Courbe granulométrique de la marne allongée après essai d`altérabilité.....	96
Figure IV-54 : Courbe granulométrique des grains de gré anguleux après essai d`altérabilité...	97
Figure IV-55 : Courbe granulométrique des grains de gré de forme sous arrondie après essai d`altérabilité.....	98
Figure IV-56 : Courbe granulométrique des grains de pegmatite après essai d`altérabilité.....	99

Figure IV-57 : Comparaison des courbes granulométriques des 3 formes du schiste obtenues avant et après essai.....	100
Figure IV-58: Comparaison des courbes granulométriques des 3 formes de la marne obtenues avant et après essai.....	100
Figure IV-59 : Comparaison des courbes granulométriques des 3 formes du gré obtenues avant et après essai.....	101
Figure IV-60 : Comparaison des courbes granulométriques des 3 formes des 4 matériaux obtenues avant et après essai.....	101
Figure IV-61: Mouillage.....	103
Figure IV-62 : Séchage.....	103
Figure IV-63: La marne après essai.....	103
Figure IV-64: Le schiste après essai.....	103
Figure IV-65: Le gré après essai.....	103
Figure IV-66: Courbe granulométrique avant essai.....	104
Figure IV-67: Courbe granulométrique des grains de schiste de forme sous arrondie après essai de dégradabilité.....	105
Figure IV-68: Courbe granulométrique des grains de schiste de forme allongée après essai de dégradabilité.....	106
Figure IV-69 : Courbe granulométrique des grains de schiste de forme anguleuse après essai de dégradabilité.....	107

Figure IV-70 : Courbe granulométrique de la marne de forme sous arrondie après essai de dégradabilité.....	108
Figure IV-71: Courbe granulométrique de la marne de forme allongée après essai de dégradabilité.....	109
Figure IV-72: Courbe granulométrique de la marne de forme anguleuse après essai de dégradabilité.....	110
Figure IV-73: Courbe granulométrique des grains de gré de forme anguleuse après essai de dégradabilité.....	111
Figure IV-74 : Courbe granulométrique des grains de gré de forme sous arrondie après essai de dégradabilité.....	112
Figure IV-75 : Courbe granulométrique des grains de pegmatite après essai de dégradabilité.....	113
Figure IV-76: Comparaison des courbes granulométriques des 3 formes du schiste obtenues avant et après essai.....	116
Figure IV-77: Comparaison des courbes granulométriques des 3 formes de la marne obtenues avant et après essai.....	116
Figure IV-78 : Comparaison des courbes granulométriques des 3 formes du gré obtenues avant et après essai.....	117
Figure IV-79 : Comparaison des courbes granulométriques des 3 formes des 3 matériaux (gré, schiste, marne) obtenues avant et après essai.....	117
Figure IV-80: Courbe granulométrique avant essais classe 0/5.....	120
Figure IV-81 : Courbe granulométrique après essai du schiste sous arrondie classe 0/5.....	121
Figure IV-82: Courbe granulométrique après essai du schiste allongée classe 0/5.....	121
Figure IV-83: Courbe granulométrique après essai du schiste anguleux classe 0/5.....	122

Figure IV-84: Courbe granulométrique après essai de la marne sous arrondie classe 0/5.....	122
Figure IV-85: Courbe granulométrique après essai de la marne anguleuse classe 0/5.....	122
Figure IV-86: Courbe granulométrique après essai de la marne allongée classe 0/5.....	123
Figure IV-87: Comparaison des courbes granulométriques obtenues après essai des 3 formes des 2 matériaux 0/5.....	123
Figure IV-88: Courbe granulométrique avant essai de tous les matériaux de classe 5/10.....	124
Figure IV-89: Courbe granulométrique après essai de la marne allongée classe 5/10.....	125
Figure IV-90: Courbe granulométrique après essai de la marne anguleuse classe 5/10.....	125
Figure IV-91: Courbe granulométrique après essai de la marne sous arrondie classe 5/10.....	125
Figure IV-92: Courbe granulométrique après essai de schiste anguleux classe 5/10.....	126
Figure IV-93: Courbe granulométrique après essai de schiste sous arrondie classe 5/10.....	126
Figure IV-94: Courbe granulométrique après essai du schiste allongée classe 5/10.....	127
Figure IV-95: Comparaison des courbes granulométriques obtenues après essai des 3 formes des 2 matériaux 5/10.....	127
Figure IV-96: Courbe granulométrique après essai de marne anguleuse classe 0/5.....	128
Figure IV-97: Courbe granulométrique après essai de marne sous arrondie classe 0/5.....	128
Figure IV-98: Courbe granulométrique après essai de marne allongée classe 0/5.....	128
Figure IV-99: Courbe granulométrique après essai du schiste allongée classe 0/5.....	129
Figure IV-100: Courbe granulométrique après essai du schiste anguleux classe 0/5.....	129
Figure IV-101: Courbe granulométrique après essai du schiste sous arrondie classe 0/5.....	129
Figure IV-102: Comparaison des courbes granulométriques obtenues après essai des 3 formes des 2 matériaux 0/5.....	130
Figure IV-103: Courbe granulométrique après essai de marne anguleuse classe 5/10.....	130
Figure IV-104: Courbe granulométrique après essai de marne sous arrondie classe 5/10.....	131
Figure IV-105: Courbe granulométrique après essai de marne allongée classe 5/10.....	131
Figure IV-106: Courbe granulométrique après essai du schiste allongée classe 5/10.....	131
Figure IV-107: Courbe granulométrique après essai du schiste anguleux classe 5/10.....	132
Figure IV-108: Courbe granulométrique après essai du schiste sous arrondie classe 5/10.....	132

Figure IV-109: Comparaison des courbes granulométriques obtenues après essai des 3 formes des 2 matériaux 5/10.....	133
Figure IV-110: grain de marne de forme sous Arrondie 12.5mm.....	140
Figure IV-111: entourage du grain.....	140
Figure IV-112: grain sous maillage de Caro de 5mm.....	140
Figure IV-113: grain sous maillage de Caro de 2.5 mm.....	140
Figure IV-114: grain sous maillage de Caro de 1.25 mm.....	141
Figure IV-115 : courbe de tendance et calcul de la dimension fractale du grain par la méthode des boîtes.....	141
Figure IV-116 : Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains de la marne de forme sous arrondie.....	142
Figure IV-117 : Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d`essai des grains de la marne de forme sous arrondie.....	143
Figure IV-118 : Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains de la marne de forme anguleuse.....	144
Figure IV-119 : Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d`essai des grains de la marne de forme anguleuse.....	144
Figure IV-120: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains de la marne de forme allongée.....	145
Figure IV-121: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d`essai des grains de la marne de forme allongée.....	146
Figure IV-122 : Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains du schiste de forme sous arrondie.....	147

Figure IV-123: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains du schiste de forme sous arrondie.....	147
Figure IV-124 : Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains du schiste de forme anguleuse.....	148
Figure IV-125: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains du schiste de forme anguleuse.....	149
Figure IV-126: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains du schiste de forme allongée.....	150
Figure IV-127: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains du schiste de forme allongée.....	150
Figure IV-128: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains de gré de forme anguleuse.....	151
Figure IV-129: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains de gré de forme anguleuse.....	152
Figure IV-130: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains de gré de forme sous arrondie.....	153
Figure IV-131: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains de gré de forme sous arrondie.....	153
Figure IV-132: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains de la pegmatite.....	154
Figure IV-133: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains de la pegmatite.....	155
Figure IV-134: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains de la marne de forme sous arrondie.....	156

Figure IV-135: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d`essai des grains de la marne de forme sous arrondie.....	157
Figure IV-136: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains de la marne de forme anguleuse.....	158
Figure IV-137: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d`essai des grains de la marne de forme anguleuse.....	158
Figure IV-138: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains de la marne de forme allongée.....	159
Figure IV-139: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d`essai des grains de la marne de forme allongée.....	160
Figure IV-140: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains du schiste de forme sous arrondie.....	161
Figure IV-141: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d`essai des grains du schiste de forme sous arrondie.....	161
Figure IV-142: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains du schiste de forme anguleuse.....	162
Figure IV-143: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d`essai des grains du schiste de forme anguleuse.....	163
Figure IV-144: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains du schiste de forme allongée.....	164
Figure IV-145: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d`essai des grains du schiste de forme allongée.....	164
Figure IV-146: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains du gré de forme sous arrondie.....	165

Figure IV-147: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d`essai des grains du gré de forme sous arrondie.....	166
Figure IV-148: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains du gré de forme anguleuse.....	167
Figure IV-149: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d`essai des grains du gré de forme anguleuse.....	167
Figure IV-150: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains de pegmatite.....	168
Figure IV-151: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d`essai des grains de la pegmatite.....	169
Figure IV-152: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains de marne de forme sous arrondie.....	170
Figure IV-153: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d`essai des grains de marne de forme sous arrondie.....	171
Figure IV-154: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains de marne de forme anguleuse.....	172
Figure IV-155: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d`essai des grains de marne de forme anguleuse.....	172
Figure IV-156: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains de marne de forme allongée.....	173
Figure IV-157: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d`essai des grains de marne de forme allongée.....	174

Figure IV-158: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains du schiste de forme sous arrondie.....	175
Figure IV-159: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d`essai des grains du schiste de forme sous arrondie.....	175
Figure IV-160: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains du schiste de forme anguleuse.....	176
Figure IV-161: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d`essai des grains du schiste de forme anguleuse.....	177
Figure IV-162: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains du schiste de forme allongée.....	178
Figure IV-163: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d`essai des grains du schiste de forme allongée.....	178
Figure IV-164: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains du gré de forme sous arrondie.....	179
Figure IV-165: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d`essai des grains du gré de forme sous arrondie.....	180
Figure IV-166: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains du gré de forme anguleuse.....	181
Figure IV-167: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d`essai des grains du gré de forme anguleuse.....	181
Figure IV-168: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains de pegmatite.....	182
Figure IV-169: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d`essai des grains de la pegmatite.....	182

Figure IV-170: Comparaison de la dimension fractale Des 3 formes de la marne.....	183
Figure IV-171: Comparaison de la dimension fractale des 3 formes d`un grain de 16mm.....	183
Figure IV-172: Comparaison de la dimension fractale Des 3 formes du schiste.....	184
Figure IV-173: Comparaison de la dimension fractale des 3 formes d`un grain de schiste de 16mm.....	184
Figure IV-174: Comparaison de la dimension fractale Des 2formes du gré.....	184
Figure IV-175: Comparaison de la dimension fractale des 2 formes d`un grain du gré de 16mm.....	184
Figure IV-176: Comparaison de la dimension fractale Des 3formes de la marne.....	185
Figure IV-177: Comparaison de la dimension fractale des3 formes d`un grain de marne de 16mm.....	185
Figure IV-178: Comparaison de la dimension fractale Des 3formes de schiste.....	185
Figure IV-179: Comparaison de la dimension fractale des3 formes d`un grain de schiste de 16mm.....	185
Figure IV-180: Comparaison de la dimension fractale Des 2formes de gré.....	186
Figure IV-181: Comparaison de la dimension fractale des 2 formes d`un grain gré de 16mm.....	186
Figure IV-182: Comparaison de la dimension fractale Des 3formes de marne.....	186
Figure IV-183: Comparaison de la dimension fractale des 3 formes d`un grain de marne de 16mm	186
Figure IV-184: Comparaison de la dimension fractale Des 3formes de schiste.....	187

Figure IV-185: Comparaison de la dimension fractale des 3 formes d'un grain de schiste de 16mm.....187

Figure IV-186: Comparaison de la dimension fractale Des 2 formes de gré.....187

Figure IV-187: Comparaison de la dimension fractale des 2 formes d'un grain de gré de 16mm.....187

Liste des tableaux

Tableau II-1 : le programme imposée pour l`essai d`altérabilité.....	44
Tableau III-1 : Caractéristiques d`identification du matériau pegmatite (Melbouci 2004).....	47
Tableau III-2 : caractéristiques de l`essai Proctor.....	48
Tableau III-3 : les différents composants minéralogiques du schiste.....	51
Tableau III-4 : les valeurs des caractéristiques physique du schiste.....	52
Tableau III-5 : résultats des essais Proctor et CBR.....	52
Tableau III-6 : compositions minéralogiques des grès numidiens.....	54
Tableau III-7) : caractéristiques physique et chimique de la marne.....	58
Tableau III-8) : résultat obtenue à partir du Diffractogramme.....	59
Tableau III-9) : les caractéristiques mécaniques de la marne.....	60
Tableau IV-1 : Pourcentage des tamisât cumulés du schiste avant essai.....	71
Tableau IV-2 : Pourcentage des tamisât cumulés de la marne avant essai.....	72
Tableau IV-3 : Pourcentage des tamisât cumulés du gré avant essai.....	73
Tableau IV-4 : Pourcentage des tamisât cumulés de la pegmatite avant essai.....	74
Tableau IV-5 : Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 des grains de schiste de forme sous arrondie après essai.....	78
Tableau IV-6 : Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 des grains de schiste de forme allongée après essai.....	79

Tableau IV-7 : Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 des grains de schiste de forme anguleuse après essai.....	80
Tableau IV-8 : Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 de la marne sous-arrondie après essai.....	81
Tableau IV-9: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 de la marne anguleuse après essai.....	82
Tableau IV-10: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 de la marne allongée après essai.....	83
Tableau IV-11: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 des grains de gré de forme anguleuse après essai.....	84
Tableau IV-12: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 des grains de gré de forme sous-arrondie après essai.....	85
Tableau IV-13: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 des grains de pegmatite après essai.....	86
Tableau IV-14: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 des grains de schiste de forme sous-arrondie après essai.....	91
Tableau IV-15: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 des grains de schiste de forme allongée après essai.....	92
Tableau IV-16: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 des grains de schiste de forme anguleuse après essai.....	93
Tableau IV-17: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 de la marne sous-arrondie après essai.....	94
Tableau IV-18: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 de la marne anguleuse après essai.....	95
Tableau IV-19: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 de la marne allongée après essai.....	96
Tableau IV-20: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 dues grains de gré de forme anguleuse après essai.....	97

Tableau IV-21: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 des grains de gré de forme sous arrondie après essai.....	98
Tableau IV-22: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 des grains de pegmatite après essai.....	99
Tableau IV-23 : Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 10/20 des matériaux avant essai.....	104
Tableau IV-24: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/20 des grains de schiste de forme sous arrondie après essai.....	105
Tableau IV-25: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/20 des grains de schiste de forme allongée après essai.....	106
Tableau IV-26: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/20 des grains de schiste de forme anguleuse après essai.....	107
Tableau IV-27: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/20 de la marne de forme sous arrondie après essai.....	108
Tableau IV-28: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/20 de la marne de forme allongée après essai.....	109
Tableau IV-29: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/20 de la marne de forme anguleuse après essai.....	110
Tableau IV-30: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/20 des grains de gré de forme anguleuse après essai.....	111
Tableau IV-31: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/20 des grains de gré de forme sous arrondie après essai.....	112
Tableau IV-32: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/20 des grains de pegmatite après essai.....	113
Tableau IV-33 : Résultats de la dimension fractale des matériaux avant et après chaque essai.....	119

Tableau IV-34 : valeurs des dimensions fractales avant et après essai des différents matériaux étudiés de classe 0/5.....	133
Tableau IV- 35: valeurs des dimensions fractales avant et après essai des différents matériaux étudiés de classe 5/10.....	134
Tableau IV-36: nombre de Caro calculée des maillages des Carreaux.....	141
Tableau IV-37 : Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites de la marne sous arrondie.....	142
Tableau IV-38 : Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites de la marne anguleuse.....	143
Tableau IV-39: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites de la marne allongée.....	145
Tableau IV-40: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites du schiste sous arrondie.....	146
Tableau IV-41: valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites du schiste anguleux.....	148
Tableau IV-42: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites du schiste allongée.....	149
Tableau IV-43: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites du gré anguleux.....	151
Tableau IV-44: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites du gré sous arrondie.....	152
Tableau IV-45: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites de la pegmatite	154

Tableau IV-46: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites de la marne sous arrondie.....	156
Tableau IV-47: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites de la marne anguleuse.....	157
Tableau IV-48: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites de la marne allongée.....	159
Tableau IV-49: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites du schiste sous arrondie	160
Tableau IV-50: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites du schiste anguleux	162
Tableau IV-51: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites du schiste allongée.....	163
Tableau IV-52: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites du gré sous arrondie	165
Tableau IV-53: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites du gré anguleux.....	166
Tableau IV-54: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites de la pegmatite.....	168
Tableau IV-55: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites de la marne sous arrondie.....	170
Tableau IV-56: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites de la marne anguleuse.....	171
Tableau IV-57: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites de la marne allongée.....	173

Tableau IV-58: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites du schiste sous arrondie.....	174
Tableau IV-59: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites du schiste anguleux.....	176
Tableau IV-60: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites du schiste allongée.....	177
Tableau IV-61: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites du gré sous arrondie.....	179
Tableau IV-62: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites du gré anguleux.....	180
Tableau IV-63: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites de la pegmatite	182

Liste des principales notations et indices

DF: Dimension Fractale.

M : masse totale de l'échantillon.

M_T : Masse totale des grains.

r ; taille de l'ouverture des passoires.

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

M(R<r) : masse des grains d'un diamètre considéré.

D_G : le coefficient de Dégradabilité du matériau.

W: Teneur en eau naturelle.

W_l: Teneur en limite liquidité.

W_p : Teneur en limite de plasticité.

I_p : Indice de plasticité.

I_c : Indice de consistance.

γ : Poids volumique total .

γ_w: Poids volumique de l'eau .

γ_s: Poids volumique des grains solides .

γ_h: Poids humide .

γ_d: Poids volumique sèche .

γ_{sat} : Poids volumique saturé .

e: Indice des vides.

S_r : Degré de saturation.

n : Porosité.

ρ : Masse volumique total.

ρ_s: Masse volumique des grains solide .

ρ_h: Masse volumique humide .

ρ_d : Masse volumique sèche .

W_{opt} : Teneur en eau optimale de l'essai Proctor.

$\rho_{d\ opt}$: Masse volumique optimale .

I_{GBR} : Indice CBR par immersion.

C' : Cohésion effective.

ϕ' : Angle de frottement interne effective.

C_c : Indice de compression.

C_g, C_s : Indices de gonflement .

Introduction général

Les matériaux granulaires sont universellement répandus dans la nature et entre dans de nombreux domaines de l'activité humaine ; ils sont omniprésents sous bien des formes et des tailles différentes dans notre environnement.

L'essentiel des matériaux exploités en génie civil sont d'origine alluvionnaire qui sont des ressources limitées, dans le but de mettre en place des solutions de remplacement en diversifiant les origines et de s'orienter vers les gisements de roches massives (roches magmatiques ou métamorphiques) qui existent en Algérie à grande échelle surtout dans la région de Tizi-Ouzou.

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

L'altération des roches est un processus géologique majeur qui est introduit par la nature. Le but de notre étude est de montrer l'influence de cette dernière sur la dégradation des roches en effectuant une série d'essai (gel/dégel, altérabilité et dégradabilité).

Les résultats de notre recherche seront basés sur le calcul de la dimension fractale qui est une notion généralisée de la dimension euclidienne qui permet d'évaluer la forme, la nature, et la taille des grains .

Le mémoire est subdivisé en quatre chapitres:

Le chapitre I est consacré à définir la dimension fractale, Les différentes caractéristiques d'un objet fractal, les méthodes utilisées pour calculer la dimension fractale, ainsi que des applications sur différents modèles mathématiques.

Le chapitre II englobe des généralités sur les différents essais réalisés au laboratoire, leur mode opératoire et l'importance de ces essais.

Le chapitre III regroupe toutes les caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux utilisés dans cette étude (la marne, le schiste, le gré et la pegmatite). Trois formes ont été choisies (sous-arrondie, anguleuse, allongée). Les différents poids volumiques, le degré de saturation et la teneur en eau, ainsi que les résultats de Proctor et CBR ont été déterminés.

Le chapitre IV qui est divisé en 2 parties : la 1 ère partie présente les différentes étapes de préparation des échantillons d'étude et la 2 eme présente le déroulement des essais et les différents résultats avant et après essais obtenus où la dimension fractale a été calculée par 2 méthodes (méthode des masses, méthode des boites). Une interprétation des résultats et une conclusion générale ont finalisé ce chapitre.

A decorative purple border that resembles a scroll, with rounded corners and a small grey-shaded area at the top-left and bottom-left corners.

**Chapitre I:
Généralités sur la notion
fractale**

I-1) Introduction

La structure du sol peut être décrite comme un assemblage d'éléments de tailles diverses séparés par un système complexe de fissures et de fractures, ce qui représente l'état de surface extérieure d'un sol ou un milieu granulaire ; cela peut être introduit ou expliqué par la notion de fractale qui regroupe dans un cadre géométrique unique de nombreux travaux mathématiques antérieures.

Le mot "fractale" vient du latin "fractus" qui signifie "brisé". En effet, un fractal est un objet géométrique «infiniment morcelé» dont des détails sont observables à une échelle arbitrairement choisie. Cette notion a commencée à la fin du XIXe siècle par des mathématiciens comme cantor, peano,...le terme " fractale" a été introduit par un polytechnicien français **Benoît Mandelbrot** (1924 ; 2010), Ses premières recherches datent de 1964 où il emploie le terme de **self-similar** lors d'une étude réalisée chez *IBM*. Mais c'est en 1975 qu'il expose ses travaux et donne le nom de "fractal" dans son ouvrage « **Les objets fractals** ».

Plusieurs définitions et plusieurs méthodes ont été utilisées pour la dimension fractale dans des domaines différents au cours de son développement. Dans ce présent chapitre, on va exposer les principales et les plus courantes définitions et lois de la dimension fractale.

C`est quoi le fractale ?

I-2) Définition

Selon " **Benoit Mandelbrot**", un objet fractal est une « figure géométrique ou un objet naturel qui Combine les caractéristiques suivantes :

- a)- ses parties ont la même forme ou structure que le tout, à ceci près qu'elles sont à une échelle différente et peuvent être légèrement déformées [*propriété d'autosimilarité*]
- b)- sa forme est, soit extrêmement irrégulière, soit extrêmement interrompue ou fragmentée, quelle que soit l'échelle d'examen.
- c)- il contient des 'éléments distinctifs' dont les échelles sont très variées et couvrent une très large gamme. »Ainsi, une fractale serait un objet mathématique se caractérisant par son irrégularité et son autosimilarité.

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

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

I-3) Exemple de fractals naturels

I-3-1) La fractalité des côtes

Lorsque nous regardons une côte, nous voyons qu'elle n'est jamais strictement "plate " mais qu'elle est composée de caps et baies donnant un aspect craquelé à celle-ci, ce qui explique la fractalité de cette dernière (figure I-1).

Toutes ces baies et caps sont eux même constitués d'autres baies et caps plus petits encore. Et ainsi de suite, je serai tentée de dire jusqu'à l'infini mais dans la nature nous ne pouvons pas parler d'infini.



Figure I- 1: le fractale d'une cote (PAOLI B, VAUTHIER T, FRAPPIER L, KENDE M ,2003)

I-3-2) Les fractales dans les végétaux

De nombreux objets naturels ressemblent à des fractales. Comme le chou ou la fougère. Mais ces objets naturels ne sont pas de vraies fractales, puisque leur complexité n'est pas infinie. La complexité s'arrête au niveau de l'atome, et non au niveau de l'infiniment petit. De même, elle ne s'étend pas dans l'infiniment grand.

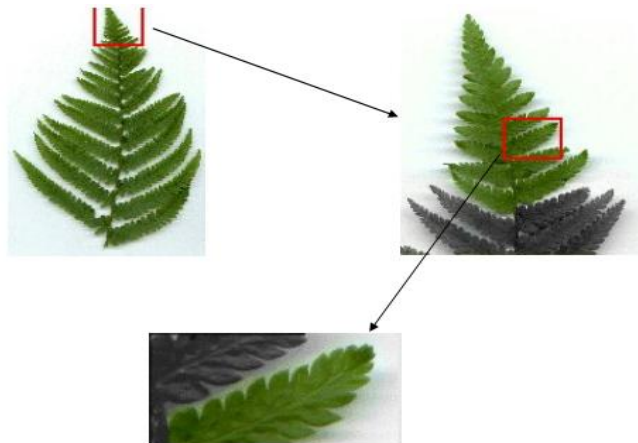


Figure I- 2: le fractale de fougère (PAOLI B, VAUTHIER T, FRAPPIER L, KENDE M ,2003)

I-3-3) Le Chou-fleur

Le chou-fleur a une forme remarquable. Grossièrement, il se présente comme une section de sphère entourée de feuilles. Si on regarde de près la surface du chou-fleur, on remarque que celle-ci est constituée de cônes qui se juxtaposent de manière enroulée en spirale, formant ainsi des volutes qui constituent elles-mêmes des cônes similaires aux premiers, mais d'échelle plus grande.

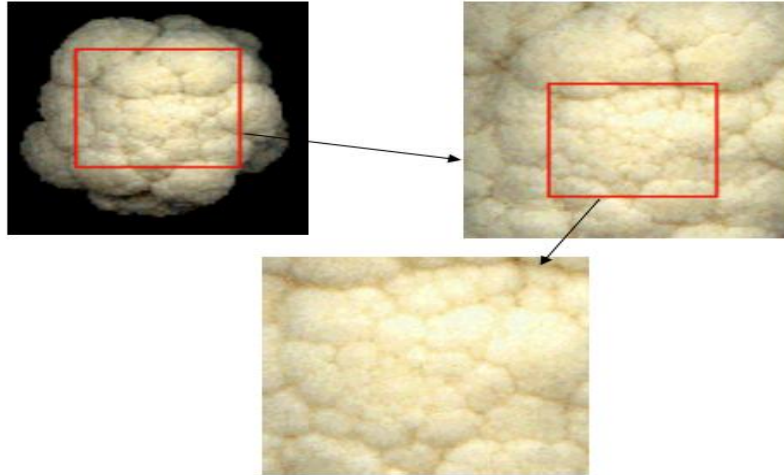


Figure I- 3: le fractale des Choux-fleurs (PAOLI B, VAUTHIER T, FRAPPIER L, KENDE M ,2003)

I-3-4) Corps humain

On entend par structure fractale dans la nature des motifs particuliers dont la reproduction récursive génère une auto-similarité entre les différentes échelles d'observation. Ces structures occupent pour un volume fini un espace maximal, sans interférence entre les éléments du motif de la fractale. Dans le corps humain, on découvre régulièrement de nouvelles preuves montrant que notre organisme est fractal. Le premier organe identifié comme tel fut le système pulmonaire. Cette organisation permet principalement de pousser les capacités d'échanges à leur maximum en intégrant une surface la plus grande possible dans un volume faible.

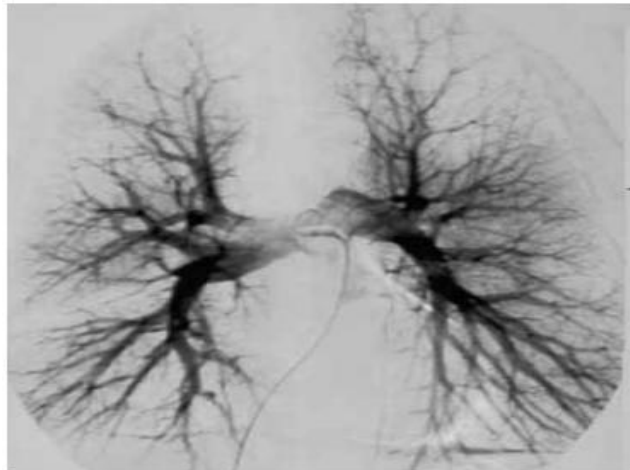
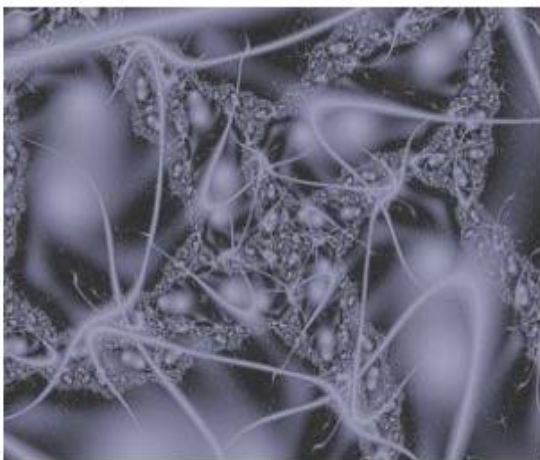


Figure I-4 Modélisation fractale de neurone **Figure I-5 :** ramification sanguine pulmonaire

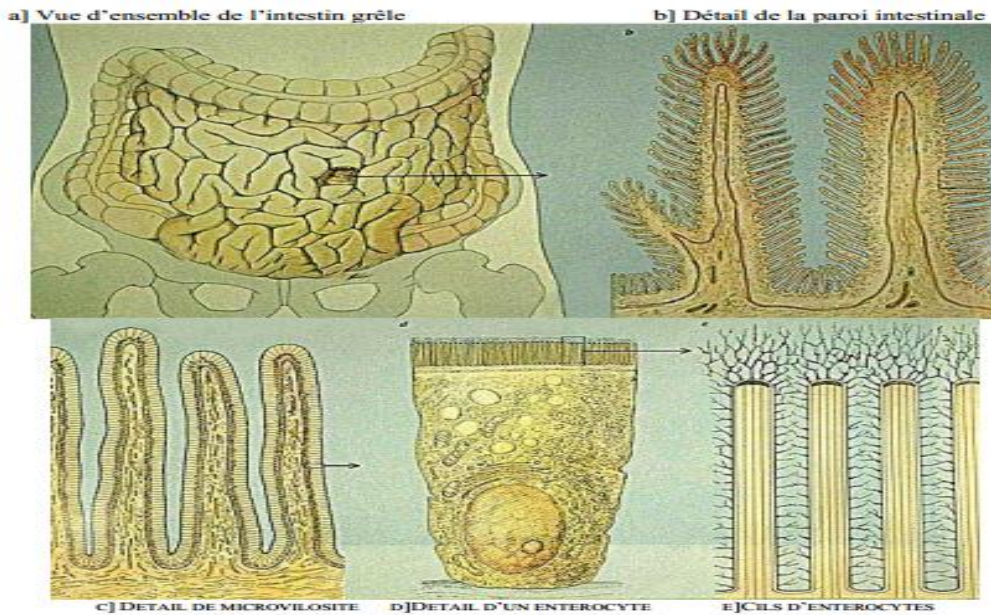


Figure I-6 la fractalité de L'intestin grêle (PAOLI B, VAUTHIER T, FRAPPIER L, KENDE M ,2003)

I-4) 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.

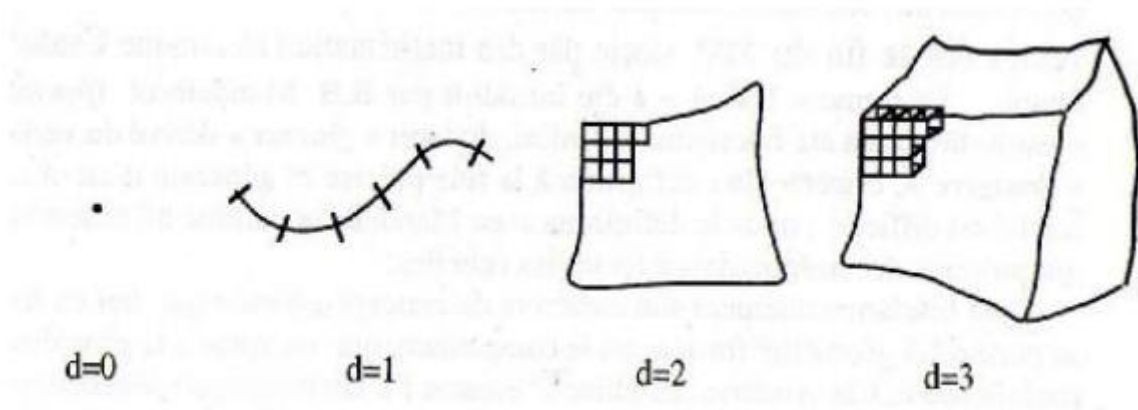


Figure I-7 : Pavages des lignes, surfaces ou volumes

I-4-1) Dimension fractale

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 est appliquée aux objets invariants d'échelle.

Pour introduire beaucoup plus sur la notion de la dimension fractale, il est indispensable de parler d'abord de la dimension euclidienne.

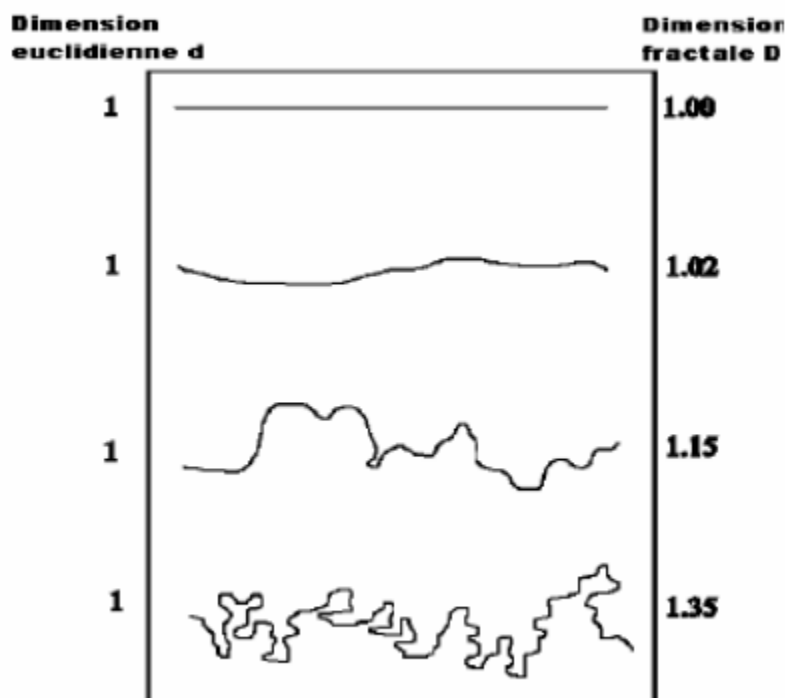


Figure I-8 Illustration du rapport entre dimensions fractale et euclidienne (Achir Mourad ,2011)

I-4-2) Dimension euclidienne ou topologique

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 n'est pas forcément le cas pour une courbe fractale.

Ces différents espaces obéissent à une loi, dite de mesure par comptage de boîtes (box counting), qui est de la forme :

$$p(\varepsilon) = \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \right)^D$$

----- (Équation I-1)

$p(\varepsilon)$: nombre d'éléments de longueur ε , nécessaires pour diviser l'élément de longueur ε_0 .

ε_0 : longueur total de l'élément.

ε : longueur de l'élément divisé.

D : dimension du support de l'espace dans lequel est inscrit l'élément de taille ε_0 .

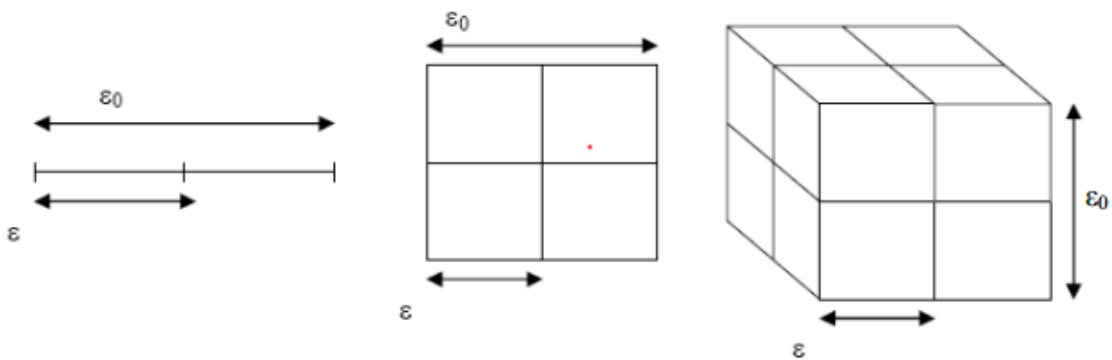


Figure I-9 : Mesure par comptage des boîtes dans un espace euclidien.

Si $D = 1$, le support de ε_0 est une droite, $p(\varepsilon)$ est le nombre de segments, de longueur ε , nécessaires pour diviser le segment de longueur ε_0 .

Si $D = 2$, l'élément (un carré) de côté ε_0 a pour support un plan. $p(\varepsilon)$ est le nombre de carrés, de côté ε , nécessaires pour diviser le carré de côté ε_0 .

Si $D = 3$, l'élément (un cube) de côté ε_0 a pour support un espace de dimension 3. $p(\varepsilon)$ est le nombre de cubes, de côté ε , nécessaires pour diviser le cube de côté ε_0 .

$$a- D = 1 ; p(\varepsilon) = \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \right) = 2$$

$$b- D = 2 ; p(\varepsilon) = \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \right)^2 = 4$$

$$c- D = 3 ; p(\varepsilon) = \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \right)^3 = 8$$

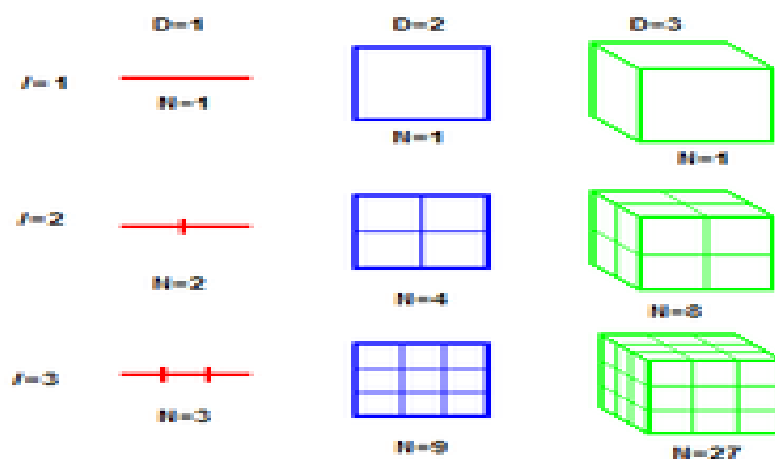


Figure I-10 : les 3 dimensions entières

I-4-3) 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 :

$$L(l) = \left(\frac{AB}{l} \right)^D \quad \text{----- (Équation I-2)}$$

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

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

D`ou

$$D = \frac{\ln n}{\ln \frac{L}{l}} \quad \text{----- (équation I-4)}$$

I-4-4) 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 :

$$n = \frac{c^2}{\left(\frac{c}{2}\right)^2} = 4$$

----- (équation I-5)

$L = c$ 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 $\ln 8 / \ln 2$, qui est égale à 3.

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

I-4-5) Dimension de Haudorff-besicovitch ou dimension de recouvrement

Une première approche pour mesurer la dimension d'un objet E consiste à suivre la méthode usuelle de pavage de l'objet par des pavés (appartenant à l'espace dans lequel l'objet est plongé) de mesure $\mu = \varepsilon^{d(\varepsilon)}$ ou $d(E)$ est la dimension de l'objet. Mais lorsque $d(E)$ est a priori inconnu, une solution consiste à faire des essais en prenant des unités de mesure $\mu = \varepsilon^\alpha$ avec un exposant α indéterminé.

Considérons par exemple un carré ($d=2$) de côté L , et recouvrons le de pavés de côté ε , la mesure est donnée par $M = N\mu$, ou N est le nombre de pavés, C'est-à-dire $N = (L/\varepsilon)^d$, ainsi

$$M = N \varepsilon^\alpha = (L/\varepsilon)^d \varepsilon^\alpha = L^d \varepsilon^{\alpha-d}$$

----- (équation I-6)

I-4-6) Dimension de Bouligand-Minkowski

On peut également définir une dimension dite de Bouligand-Minkowski,

Que l'on note $\Delta(E)$ et voici quelques méthodes permettant de calculer $\Delta(E)$

I-4-7) La saucisse de Minkowski

Soit E un ensemble plongé dans un espace euclidien de dimension d (précisément E est une partie bornée de \mathbb{R}^d). Soit maintenant $E(\varepsilon)$ l'ensemble des points de \mathbb{R}^d distants de moins de ε de E .

$E(\varepsilon)$ définit une saucisse de Minkowski, on l'appelle aussi épaisseur ou dilatation de E comme en analyse d'image. On peut la définir comme la réunion

$$E(\varepsilon) = \bigcup_{x \in E} B_\varepsilon(x) \quad \text{----- (équation I-7)}$$

$B_\varepsilon(x)$ est une boule de l'espace euclidien à d dimensions, centrée en x et de rayon ε . On calcule

$$\Delta(E) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left(d - \frac{\log \text{Vol}_d(E(\varepsilon))}{\log \varepsilon} \right) \quad \text{----- (équation I-8)}$$

Où Vol_d représente simplement le volume en dimension d (par exemple, longueur, surface ou volume usuel). Si la limite existe, $\Delta(E)$ est par définition la dimension de Bouligand Minkowski.

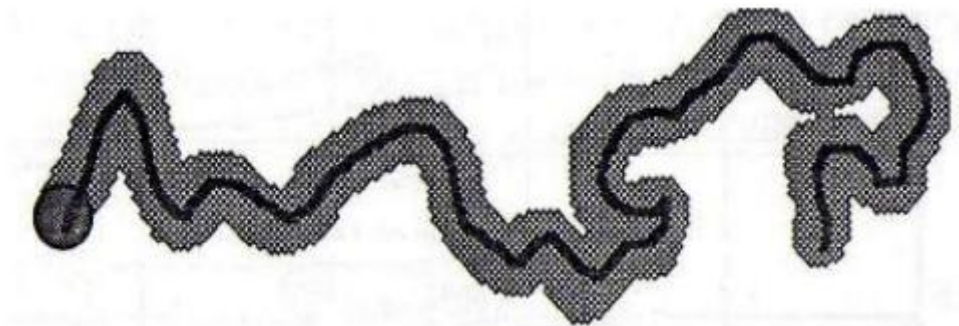


Figure I- 11: Saucisse de Minkowski ou épaisseur d'une courbe

I-5) Méthodes de calcul

I-5-1) La Méthode des boîtes (Box Counting)

La méthode de Box Counting est l'une des méthodes les plus intéressantes et les plus utilisés pour de nombreuses structures fractales,

Soit $N(\varepsilon)$ le nombre de pavés de côté ε recouvrant E :

$$\Delta(E) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} (\log N(\varepsilon) / -\log \varepsilon) \quad \text{----- (équation I-9)}$$

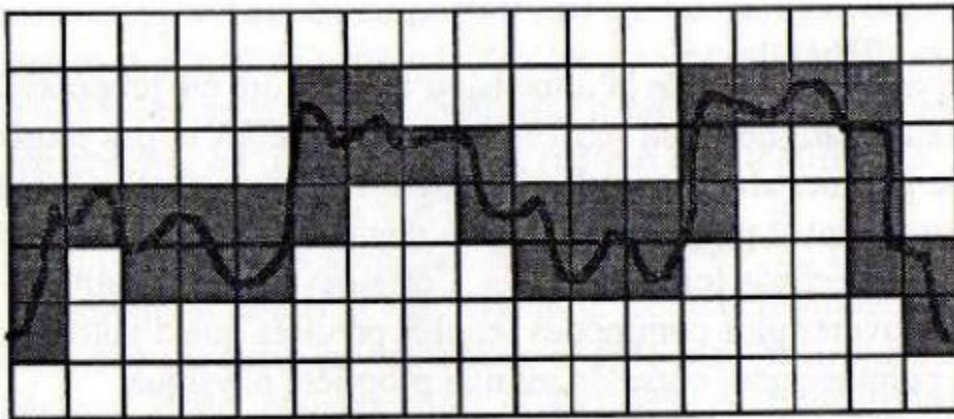


Figure I- 12 : Mesure de la dimension d'une courbe par la méthode des boîtes

La méthode des boîtes est couramment utilisée en particulier pour les structures auto-affines.

I-5-2) La Méthode des boules disjointes

Soit $N(\varepsilon)$ le nombre maximum de boules disjointes de rayon ε centrées sur l'ensemble E : alors,

$$\Delta(E) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} (\log N(\varepsilon) / |\log \varepsilon|) \quad \text{----- (équation I-10)}$$

Cette méthode est peu utilisée en pratique.



Figure I-13 : Mesure de la dimension d'une courbe par la méthode des boules disjointes

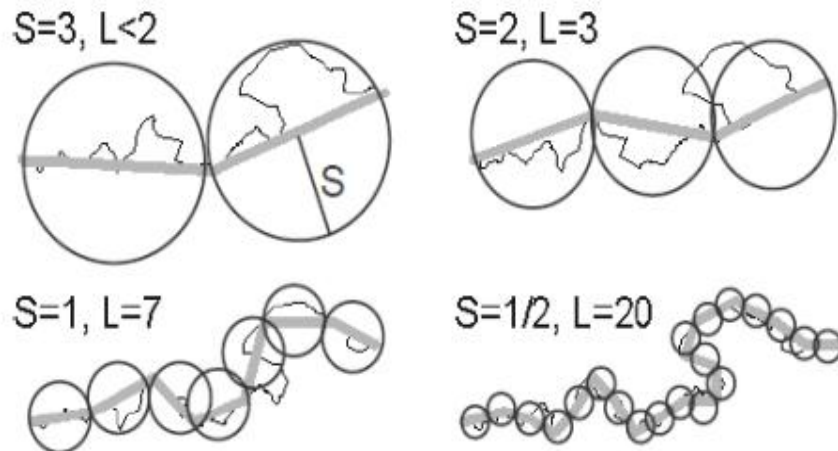


Figure I-14 : Variation du nombre L de segment d'une ligne brisée (en fonction de la taille S de l'unité de mesure) nécessaire pour mesurer la longueur de la ligne

I-5-3) La Méthode du Compas (Richardson, 1960)

L'idée de la définition de cette méthode est fondée sur le recouvrement par un ruban de longueur ε . Soit $N(\varepsilon)$ le nombre de pas de longueur ε nécessaire pour parcourir E :

$$\Delta(E) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} (\log N(\varepsilon) / |\log \varepsilon|)$$

----- (équation I-11)

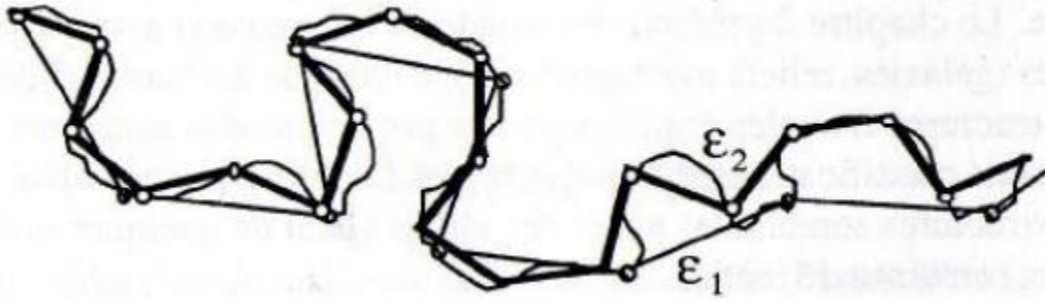


Figure I-15 : Mesures de la longueur d'une côte par report d'unités différentes

Pour un étalon de mesure ϵ_1 , on retrouve une longueur $N_1 \epsilon_1$ mais un étalon de mesure plus petit ϵ_2 donne une nouvelle valeur plus grande.

$$L(\epsilon_1) = N_1 \epsilon_1 \quad \text{----- (équation I-12)}$$

$$L(\epsilon_2) = N_2 \epsilon_2 \neq L(\epsilon_1) \quad \text{----- (équation I-13)}$$

Et ceci sur une échelle allant de plusieurs dizaines de kilomètres à quelques mètres, L. F. Richardson étudia en 1961, les variations de longueur approchée $L(\epsilon)$ de diverses côtes et constata d'une manière générale que, dans un large domaine de valeurs de ϵ , la longueur variait pratiquement suivant une loi de puissance ² en ϵ .

$$L(\epsilon) = N(\epsilon) \epsilon^\alpha \quad \text{----- (équation I-14)}$$

α . (Alpha) désigne varie comme

I-5-4) Méthode des lignes parallèles

La mesure de la dimension fractale par la méthode des lignes parallèles consiste à superposer la photo du grain sur un ensemble de lignes parallèles à espacement constant, et joindre à l'aide d'un segment de droite les points d'intersections du contour du grain avec ces lignes. On fait la mesure du périmètre ainsi obtenu $P(l)$. En diminuant de plus en plus le pas entre les lignes, on se rapproche au fur à mesure du contour réel du grain (figure 2). (Melbouci Bachir, Yezli Saliha, 2012).

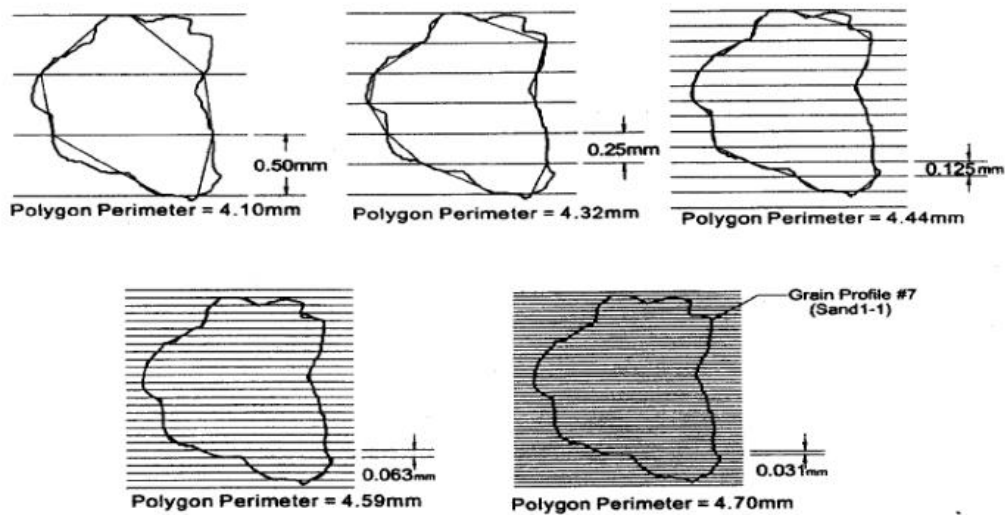


Figure I-16 : Méthode des lignes parallèles (Kevin P. Hammer, 2005)

I-5-5) Line Divider (méthode du diviseur)

Selon Mandelbrot (1983), des segments d'une même dimension (l) sont utilisés pour former un polygone à l'intérieur des frontières d'un grain (figure I-17); ainsi, le périmètre de ce polygone peut être décrit comme suit :

$$P(l) = n \cdot l^{1-DR}$$

----- (équation I-15)

Dans cette équation, $P(l)$ est la longueur totale des lignes d'une longueur (l), DR est la dimension fractale du grain étudié. En traçant à l'aide la longueur du polygone en fonction de l'unité de mesure, la dimension fractale est alors liée à la pente m par ($DR=1-m$).

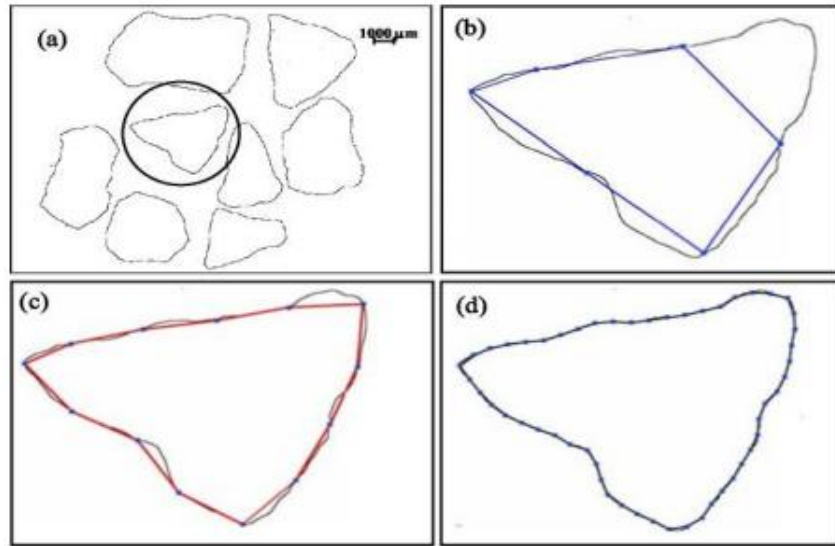


Figure I-17: Frontières des grains après analyse d'images. Les figures b, c et d représentent les Polygones formés à partir de différentes tailles de mesure.

I -5-6) méthodes des masses

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

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

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

$$\left(\frac{M(R < r)}{M_t} \right) * \left(\frac{r^{3DF_R}}{r_L} \right) \quad \text{----- (équation I-16)}$$

$M(R < r)$: masse cumulative des particules avec la taille R plus petite qu'un comparatif donnée de classer.

M_t = masse totale des particules.

r = taille de l'ouverture des passoires.

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

DF_R = dimension fractale de fragmentation.

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

$$DF_R = 3 - m \quad \text{----- (équation I-17)}$$

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

I-6) Application a la dimension fractale

I-6-1) Le flocon de Koch

La courbe de von Koch a été décrite et démontrée en 1906 par le Mathématicien Suédois Helge von Koch (1870-1924) (6). Elle est définie comme quatre copies d'elle même trois fois plus petites. Sa dimension fractale s'exprime selon la dimension de Hausdorff-Besicovitch, elle est $D=1,269$ (Coralie AYACHE, 2013/2014).

L'algorithme de Von Koch est régi selon le principe de récursivité. Un segment horizontal $[AB]$ de longueur L (c'est l'itération zéro (figure : I-18) est divisé en trois segments de même longueur. Le segment central représente la base d'un triangle équilatérale, une fois le triangle formé, cette base sera supprimée. Le segment $[AB]$ a donc subi quatre transformations, chacune transformant $[AB]$ en quatre segments de longueur identique $L/3$. Ces dernières permettent l'obtention d'une « courbe » composée de quatre segments allant de A à B : C'est la première itération (figure : I-19). L'angle formé par les deux nouveaux segments $[CD]$ et $[DE]$ est égale à $\pi/3$.



Figure I-18 : Fragmentation du segment $[AB]$ à l'itération zéro.



Figure I-19 : Première itération, les segments ont pour longueur $L/3$.

Selon le principe de récursivité, il faut appliquer les mêmes transformations aux quatre segments, de longueur $L/3$, obtenus à la première itération : c'est la seconde itération (figure : I-20). Tous les segments de cette nouvelle figure mesurent $L/3^2$ soit $L/9$. Puis à la troisième itération, tous les segments auront pour longueur $L/3^3$ soit $L/27$. Dans le cas général de cette récurrence, à la n ième itération, tous les segments auront une même longueur $L/3^n$.

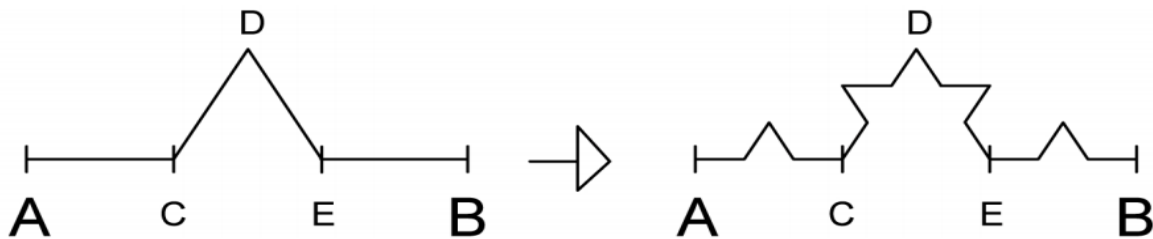


Figure I-20: Seconde itération, les segments ont pour longueur $L/3^2 = L/9$

Le flocon de Koch est la somme de 3 segments $[AB]$ par rotation d'un angle égale a $-\pi/3$ d'après le cercle trigonométrique.

Lorsque l'on reproduit indéfiniment les quatre transformations, la « courbe » de Von Koch correspond, à la limite des « courbes » obtenues. Cependant, le flocon délimite une surface finie (figure : I-21).

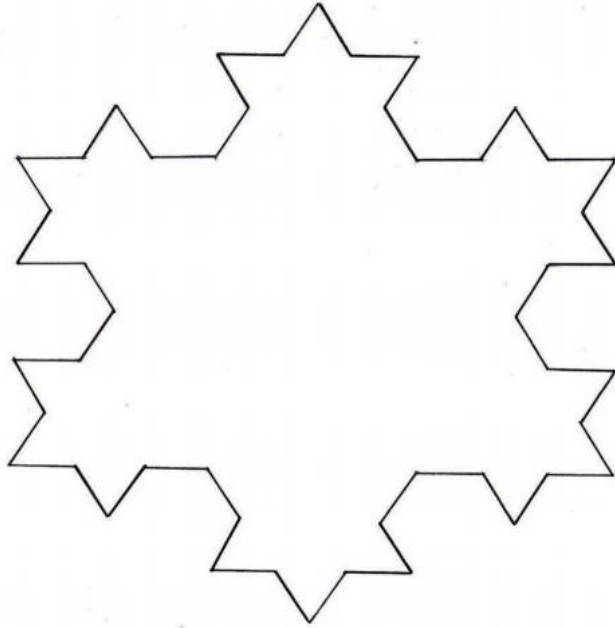


Figure I-21 : Flocon de Von Koch à la troisième itération.

Calcul de la dimension fractale du flocon de Von Koch par la méthode de compactage des boîtes

Le carré initial a des cotés de longueur L . En faisant des pas 3 fois plus petits, c'est à dire en divisant ce carré en neuf carrés de même surface, le nombre de pas à faire est 3^D fois plus grand, où D est la dimension de l'objet fractal: le flocon de Koch.

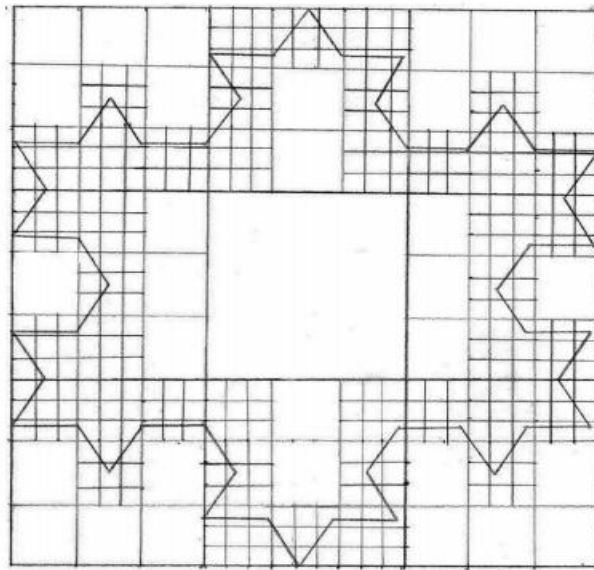


Figure I-22 : Illustration de la méthode du comptage de boîte.

Le carré initial a des cotés de longueur L . En faisant des pas 3 fois plus petits, c'est à dire en divisant ce carré en neuf carrés de même surface, le nombre de pas à faire est 3^D fois plus grand, où D est la dimension de l'objet fractal: le flocon de Koch

Or nous avons vu précédemment que notre « courbe » se composait de 4 segments, chacun de longueur $1/3$ si on considère $L=1$. Donc en faisant des pas 3 fois plus petits, on doit en faire 4 fois plus. On peut donc écrire la relation :

$$4=3$$

$$D$$

$$\leftrightarrow \ln(4)=\ln(3$$

$$D$$

$$)$$

$$\leftrightarrow \ln(4)=D \times \ln(3)$$

$$\leftrightarrow D=\ln(4)/\ln(3)$$

$$\leftrightarrow D=1,2618595$$

La dimension D est une grandeur irrationnelle.

I-6-2) Le triangle de Sierpinski

La construction est très simple à comprendre : on part d'un triangle équilatérale que l'on divise en 4 triangle équilatéraux. On enlève le triangle central et on effectue la même opération sur les triangles conservés. L'ensemble obtenu, connu sous le nom de triangle de Sierpinski, a pour dimension fractale $\log_3/2$.

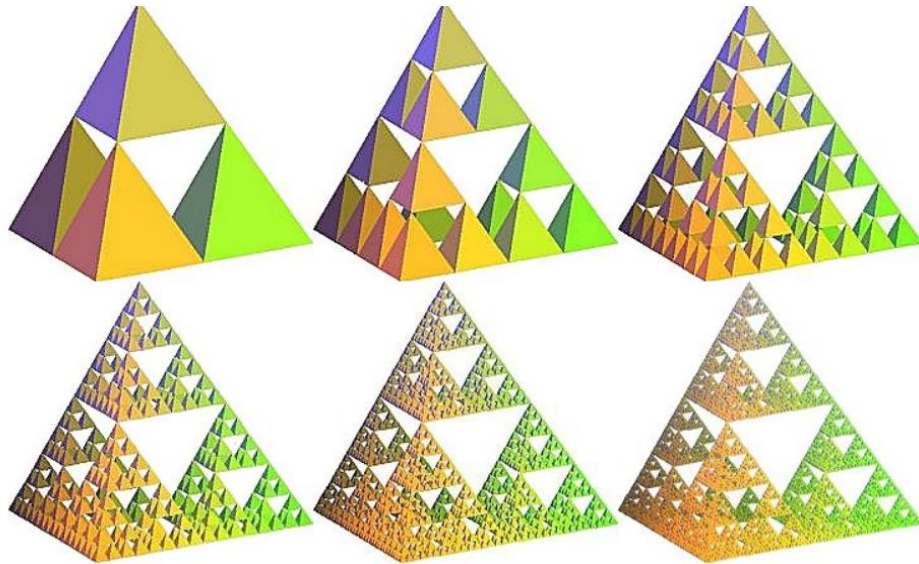


Figure I-23 : le triangle de Sierpinsky (Jacques MANDONNET 2013)

I-6-3) Le tapis de Sierpinski

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

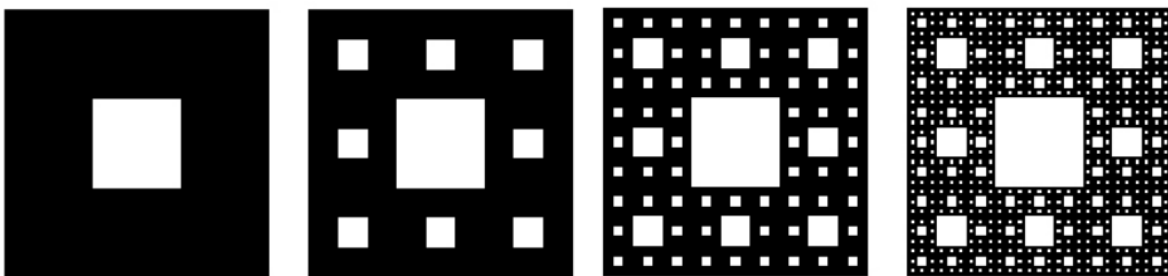


Figure I-24 : Tapis de Sierpinski (SIERPINSKI Waclaw, polonais, 1882-1969)

I-6-4) Eponge de Menger

L'**éponge de Menger**, parfois appelée **éponge de Menger-Sierpinski**, est un solide fractal. Il s'agit de l'extension dans une troisième dimension de l'ensemble de Cantor et du tapis de Sierpinski (on enlève les cubes de la même façon que le tapis de Sierpinski). Elle fut décrite pour la première fois par le mathématicien autrichien Karl Menger en 1926.

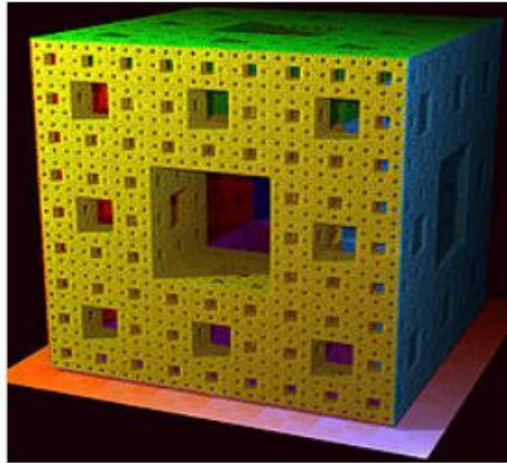


Figure I-25 : L' Eponge de Menger (Karl Menger, 1926)

I-6-5) L'ensemble de Cantor

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

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

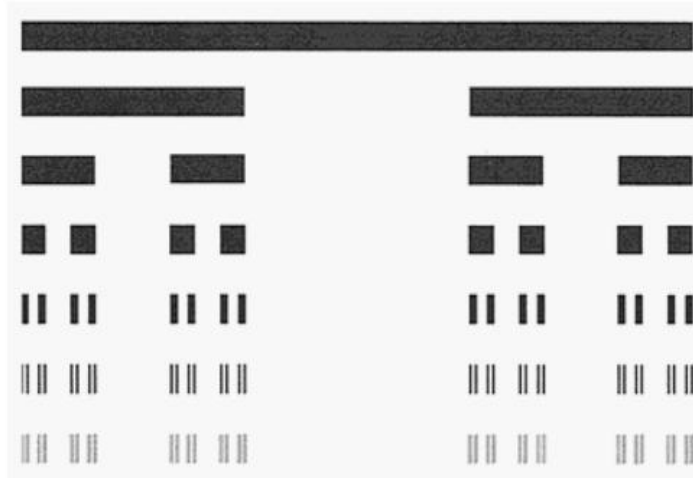


Figure I-26 : L`ensemble de Cantor

I-6-6) L`ensemble de Mandelbrot

L`ensemble de Mandelbrot est à l`origine d`une très belle collection d`image connue sous le nom d`ensemble de Julia .qui a été défini à partir de l`équation de récurrence :

$Z_{n+1}=Z_n^2+C$ en prenant $Z_0=0$ et en faisant varier la valeur de C.

Le centre en noir (œuf de Mandelbrot) représente l`espace où la suite converge. Les couleurs indiquent les courbes de niveau .c`est à dire la vitesse de convergence de la fonction.

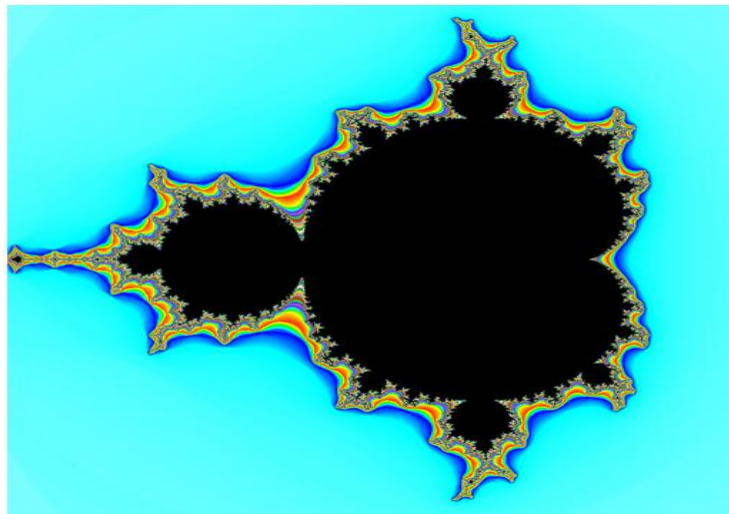


Figure I-27 : ensemble de Mandelbrot

I-6-7) L'ensemble de Julia

La définition de cet ensemble est proche de celle l'ensemble de Mandelbrot qui est quant à lui unique tandis qu'il existe un ensemble de Julia pour chaque nombre complexe c choisi pour effectuer les calculs. L'ensemble de Julia « rempli » correspondant à une constante complexe $c \in \mathbb{C}$ est l'ensemble J_c des nombres complexes m tels que la suite des modules des termes de la suite (z_n) définie par

$$\begin{cases} z_{n+1} = z_n^2 + c \\ z_0 = m \end{cases} \quad \text{Soit bornée}$$

On admettra que si cette suite n'est pas bornée, alors la suite des modules tend vers l'infini :

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} |z_n| = +\infty$$

Les ensembles de Julia forment une infinité d'ensembles de nombres complexes...

Les propriétés de l'ensemble de Julia ne sont pas strictement auto-similaires, elles sont parfois connexes, mais pas toujours. Il existe donc des fractales de Julia continues tandis que d'autres sont fragmentées.

§ Il n'y a pas de dimension fractale commune aux ensembles de Julia.

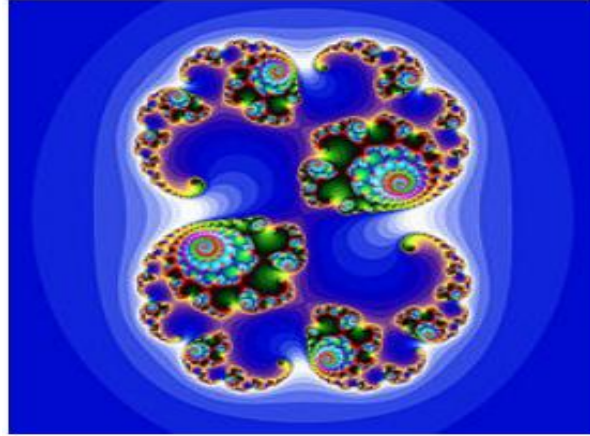


Figure I-28 : l'ensemble de Julia

I-7) Les différents types de fractales

I-7-1) Fractale déterministes

On parle des fractales déterministes lorsque les grains résultant d'une agrégation ou de la fragmentation d'un milieu granulaire ayant presque la même forme (c'est un cas rare) ou le mode de réplification ne fait pas intervenir de composante aléatoire.



Figure I-29 : Fractales déterministes d'un milieu granulaire (Belmihoub Hacene 2013)

I-7-2) Fractale non déterministes

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

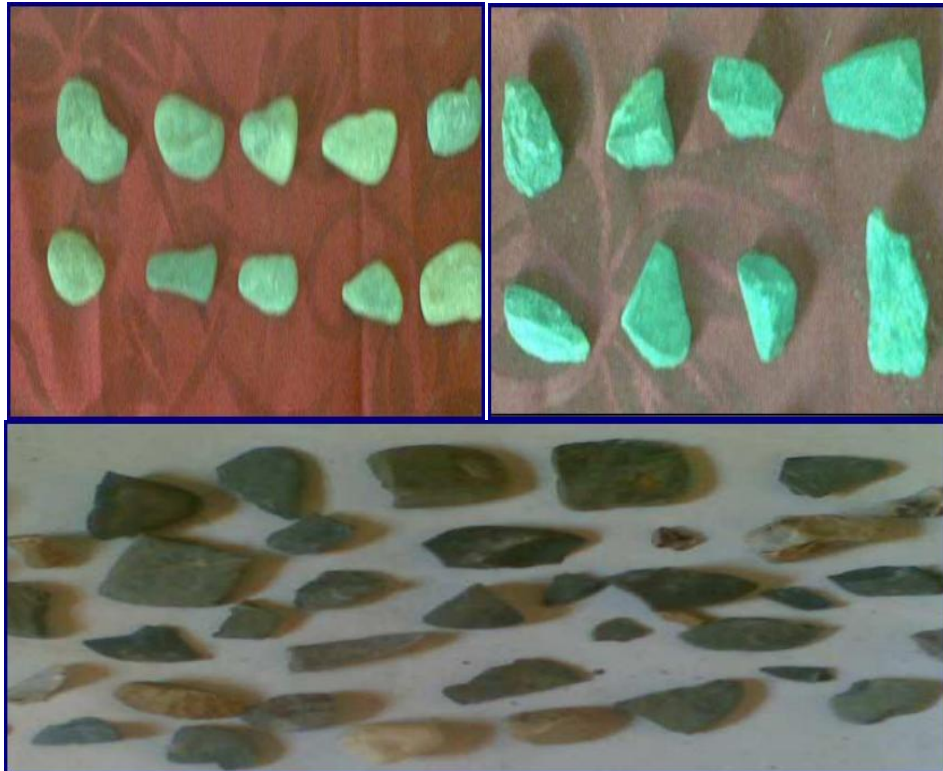


Figure I-30 : Fractales non déterministes d'un milieu granulaire.

I-8) Forme des grains

La forme des grains est aussi 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.

I-9) Diversités des formes de grains

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

Pour notre travail de recherche ; les caractéristiques importantes liées à la forme des grains sont la minéralogie et la granulométrie. A partir de la figure IV-1 pour l'arrondissement, et la figure IV-2 pour l'angularité.

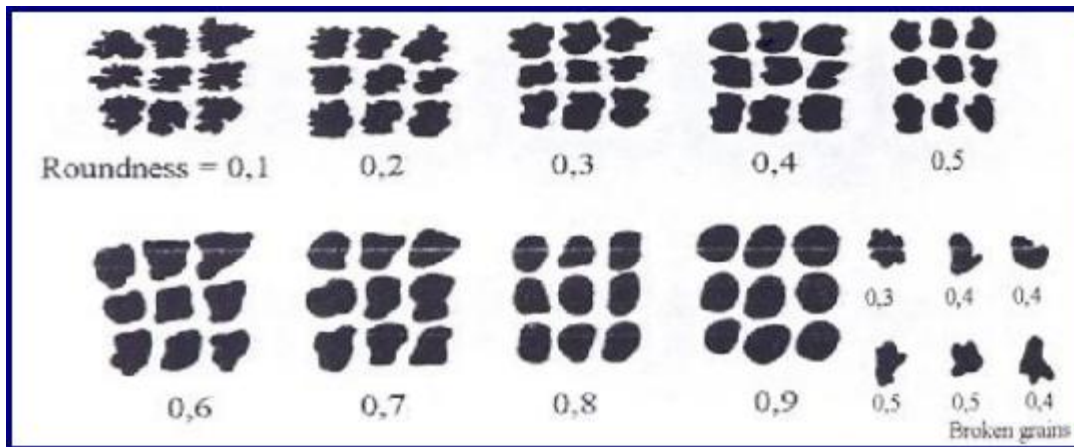


Figure I-31: Degré de forme des grains (d'après Krumbein W.C.1941).

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

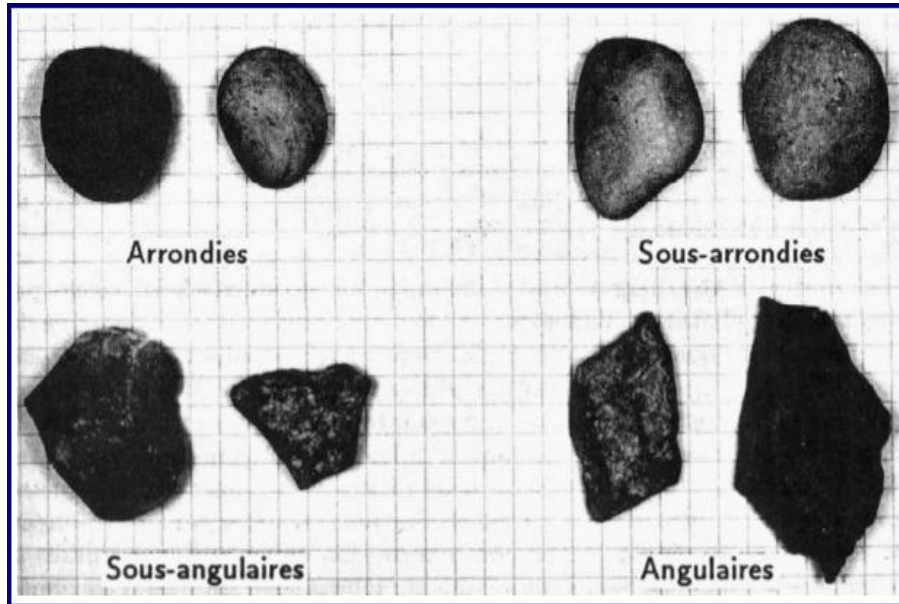


Figure I-32 : Différentes formes des grains.

I-10) la rugosité

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

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

I-11) Taille des grains

Les grains présentent les tailles différentes ; de la plus petite de l'ordre des mètres 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 micro 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 n'augmente et plus la probabilité de présence des zones de faiblesse dans le grain augmentent.

I-12) Ecrasement des grains selon (Guyon et Troadec ,1994)

On distingue 3 modes de rupture selon Guyon et Troadec 1994.

A) L'abrasion

Le résultat est un grain ayant sensiblement la même taille que l'originale et plusieurs particules très fines.

B) L'écaillage (ou l'attrition)

Le grain se casse pour donner un gros grain et plusieurs de petites tailles

C) La fracture

Le grain se casse pour en donner de nouveau de taille sensiblement égale et inférieure à la taille du grain original.

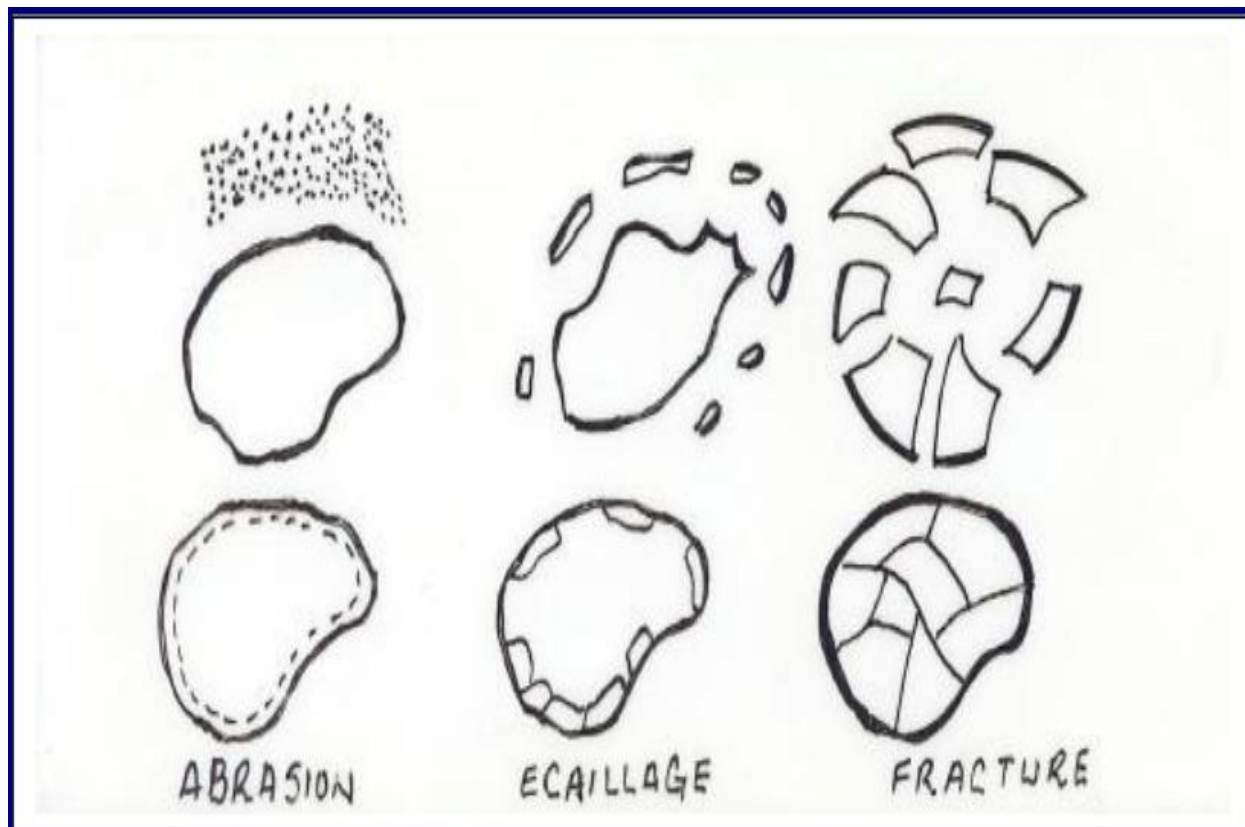


Figure I-33 : différent mode de rupture selon Guyon et Troadec 1994

I-13) Conclusion

La géométrie fractale a été développée pour décrire et quantifier des objets mathématiques, comme les ensembles de Cantor, la courbe de Koch ou le tapis de Sierpinski, dont l'autosimilarité enlève toute signification aux mesures habituelles de longueur, de surface ou de volume : le résultat de ces mesures dépend de l'échelle à laquelle travaille l'observateur, Cette nouvelle géométrie fournit des notions applicables aux formes naturelles, à condition de procéder à quelques aménagements, et avec beaucoup de précautions : il faut envisager des caractéristiques moyennes, et travailler dans une gamme limitée d'échelles (aux petites et aux grandes échelles), des circonvolutions ou des lacunes, sans contraintes physiques intrinsèques pour les arrêter et les ramener à une réalité plus euclidienne. En effet ce concept a permis d'expliquer des formes qui semblaient d'autant plus inexplicables qu'elles n'étaient régies par aucune loi (à la différence des exemples précédents.).

La dimension fractale est une valeur non entière ($1 < D < 3$) indique une forme géométrique simple lorsqu'elle est proche de 1 et une forme complexe lorsqu'elle est proche de 2.





Chapitre II:
Généralités sur les essais

II-1) introduction

Une bonne reconnaissance du sol nécessite une campagne suffisante composée d'essais in situ et de laboratoire. Dans les conditions d'exploitation, les matériaux rocheux se dégradent sous l'effet de différents processus d'altération. Cette dégradation est lente et peut se manifester par une perte de performances mécaniques et/ou d'évolution des propriétés physiques de la roche. Par ailleurs les principaux mécanismes qui interviennent dans l'altération des roches sont connus. On distingue : (i) les mécanismes physico-chimiques tels que la dissolution, l'hydrolyse, l'hydratation, l'échange d'ions, l'oxydation, etc ; (ii) les mécanismes physiques qui sont principalement la dilatation et la contraction des minéraux, le gel-dégel de l'eau et la cristallisation des sels. Les variations de température et l'action de l'eau constituent les deux principaux facteurs à l'origine de ces processus de dégradation (mokhfi takarli –wiliam prince, (2007)).

Pour cela on tient à représenter l'effet de la nature par les 3 essais suivants :

*Gel /dégel

*Altérabilité

*Dégradabilité

II-2) Le Tamisage

Méthode par tamisage a sec apres lavage (norme P94-056)

L'analyse granulométrique par tamisage, au moyen de tamis à maille carrée de dimension inférieure ou égale à 100 mm, s'applique aux sols, aux matériaux rocheux après extraction et aux sous produits industriels utilisés dans le domaine du bâtiment et du génie civil, dans la mesure où les sollicitations provoquées par le processus d'essai ne modifient pas leur structures. (Norme P94-056)

II-2-1) Principe d'essai

L'essai consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau, au moyen d'une série de tamis et à peser successivement le refus sur chaque tamis. La masse des refus cumulés sur chaque tamis rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon constitue le tamisât cumulé.

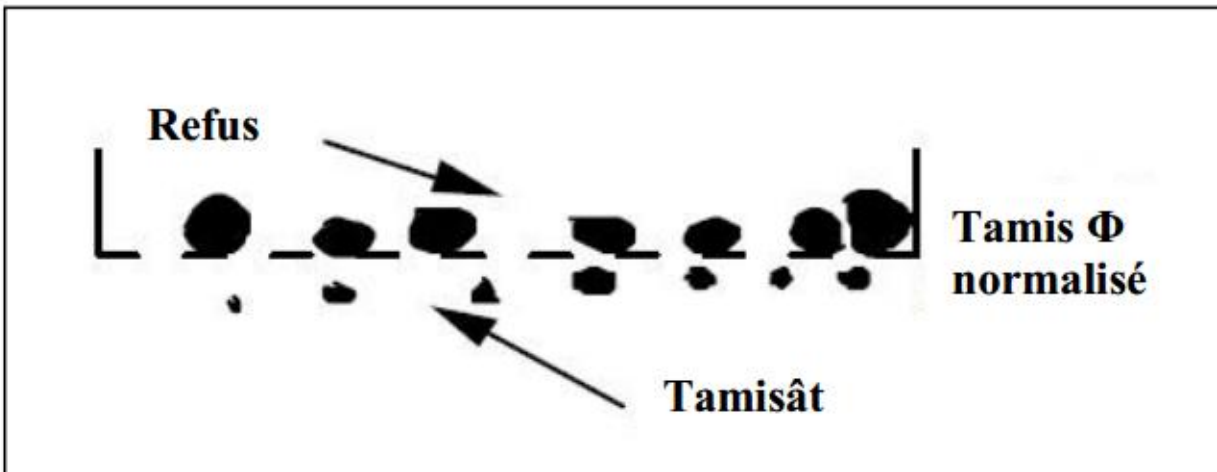


Figure II-1 : résultat du tamisage (Dahoumane kahina, 2012)

II-2-2) Appareillage

L'appareillage est constitué par :

- Un dispositif de lavage avec un arroseur.
- Un jeu de tamis emboîtable à maille carrée
- Les tamis sont disposés de la dimension la plus grande vers la plus petite.
- Couvercle et fond de tamis.
- Récipient en matériau non altérable, brosse, pinceau.
- Une balance.
- Etuve : enceinte thermique à température réglable
De 50 °c à 105°c. (Norme P94-056)



Figure II-2: vibro- tamis

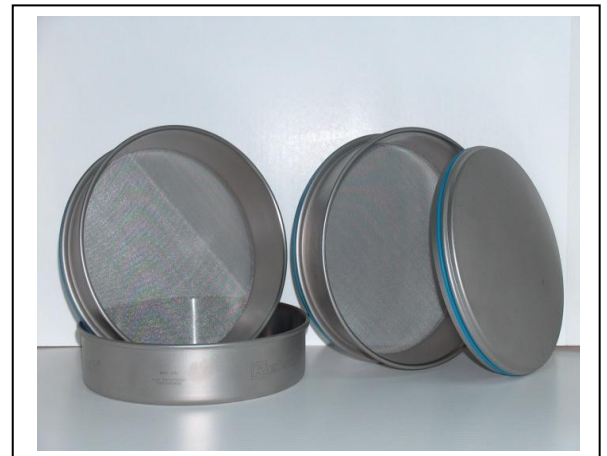


Figure II-3: tamis

II-2-3) Mode opératoire

- Sécher l'échantillon à 105°C pour les sols insensibles et à 50°C pour ceux sensibles.
- Verser une masse du matériau sèche au sommet de la colonne de tamis d'ouverture de maille décroissante du haut ver le bas.
- A l'aide d'un vibro-tamis, on vibre la colonne pendant 10 a 15 min pour avoir réalisé un bon tamisage.
- Verser les tamis vers un récipient en utilisant la brosse et le pinceau afin de ne laisser aucune particule au niveau du tamis.
- Peser le refus de chaque tamis et réaliser la courbe granulométrique.

II-3) Essai Gel/dégel (norme NF-EN 1367-1)



Figure II-4: Le gel



figure II-5: le dégel

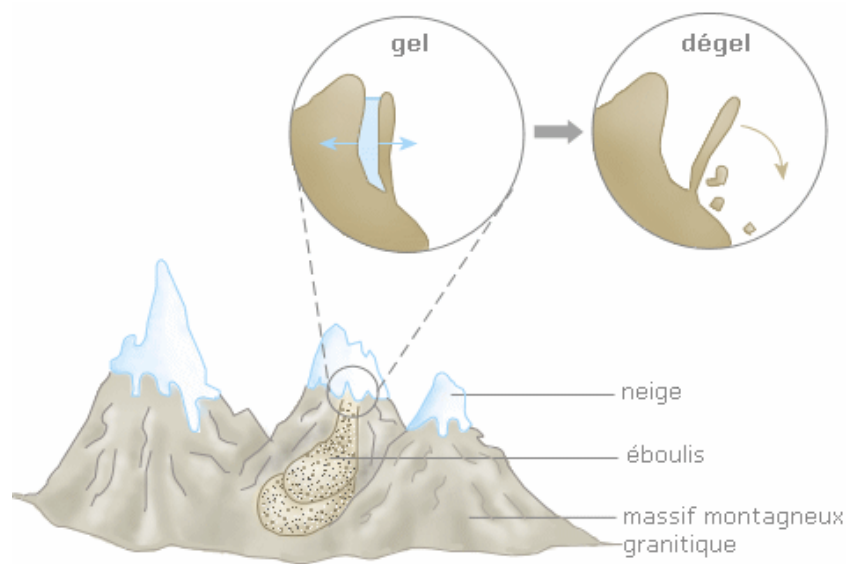


Figure II-6 : l'effet du gel dans la nature

Cet essai nous permet d'avoir une idée sur la résistance du granulat lorsqu'il est soumis à des cycles gel/dégel. Le gel crée des contraintes dans les granulats qui peuvent provoquer leur rupture.

II-3-1) La gélifraction

- La gélifraction est un phénomène qui se traduit par la rupture des grains ou des liaisons intergranulaires sous l'action des contraintes thermiques et/ou des forces développées par la **congélation** de l'eau et son accroissement de volume.
- La notion de « **gélivité** » est en général associée aux essais de gélifraction des roches. (Caroline Mauduite)



Figure II-7 : l'effet du gel sur les chaussées

(Grouques , L caniard ,1975)



Figure II-8: Effet du gel sur les roches

(Caroline M)

II-3-2) Principe d'essai

Après avoir imbibé les échantillons à la pression atmosphérique, ils sont soumis à 10 cycles gel/dégel. Chaque cycle comporte un refroidissement à $-17,5\text{ °C}$ et un dégel à une température de 20 °C . On examine les granulats après chaque cycle et on évalue le changement de leur dimension fractale.

II-3-3) Appareillage

Les éléments constituant l'appareillage sont :

- étuve ventilée (105 ± 5) °C
- balance de précision à $\pm 0,1\text{ gr}$
- tares
- enceinte climatique
- eau distillée



Figure II-9 : l'enceinte climatique

II-3-4) Déroutement d`essai

-Bien laver les 4 échantillons de roche et les sécher à l`étuve (pour éliminer les particules adhérentes)

-Imbiber les échantillons dans l`eau distillée à 20°C pendant 24h à l`enceinte climatique.

- **Dans le cas du gel**, on abaisse la température de 20°C à 0°C en (150±30) min et maintenir à 0°C pendant (210±30) min. Puis on continue à abaisser la température de 0°C à (-17,5±2,5) °C en (180±30) et maintenir à -17,5 pendant au moins 240 min
- **Dans le cas du dégel**, on laisse les échantillons dans l`eau à (20±3) °C pendant 10h maximum
- Chaque cycle **gel/dégel** prend **24h**
- On refait le tamisage après l`essai et on trace la nouvelle courbe granulométrique.

II-4) Essai de Dégradabilité (norme NF P 94-067)

II-4-1) But d`essai

La détermination du coefficient de dégradabilité des matériaux rocheux.

II-4-2) Le coefficient de dégradabilité

C`est un paramètre représentatif du comportement de certains matériaux rocheux se traduisant par une évolution continue de leurs caractéristiques géotechniques (granularité, argilosité, plasticité,...). C`est aussi un des paramètres d`identification retenue dans la classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d`infrastructure routière. Sa détermination est en particulier nécessaire pour préciser le classement des roches argileuses telles que (marnes, argilites, schiste sédimentaire).

II-4-3) Principe d'essai

L'essai consiste à déterminer la réduction de D_{10} d'un échantillon, de granularité d/D donnée, soumis à quatre cycles imbibition/séchage conventionnels.

Cette réduction s'exprime par le rapport :

$$D_G = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant le 1 er cycle}}{D_{10} \text{ du matériau après le 4 eme cycle}}$$

D_G : le coefficient de Dégradabilité du matériau

II-4-4) Appareillage et matériel d'essai

Les éléments constituant l'appareillage sont :

- Colonne de tamis 10-12,5-16-20
- Etuve réglable (105°C)
- Bacs métalliques de différentes dimensions
- Balance portée 5000gr, précision ± 1 mg.

II-4-5) Déroulement d`essai

- Préparer des échantillons de classe 10/20
- Préparation et poids des échantillons de chaque type de roche (selon le pourcentage de la courbe granulométrique imposée)
- Répartir chaque échantillon dans un bac métallique
- Imbiber les échantillons pendant $8h \pm 1h$
- Sécher à l`étuve pendant $16h \pm 1h$ (avant chaque séchage procéder au siphonage de l`eau restant dans le bac en évitant l`entraînement des particules fines.
- Appliquer le cycle imbibition/séchage pendant 4 jours.

II-5) Essai d`altérabilité

II-5-1) Définition d`altérabilité

C`est l`ensemble des modifications chimiques et physiques qui affectent les sédiments et les roches exposées à l`atmosphère, à l`hydrosphère et à la biosphère.

II-5-2) But d`essai

C`est d`étudier l`influence du changement de température et d`humidité sur la dégradation des grains.

II-5-3) Appareillage

L`appareillage est constitué par :

- Etuve ventilée (105 ± 5) °c
- Tares
- Enceinte climatique
- Eau distillée

- Balance portée 50000 mg, précision ± 1 mg

II-5-4) mode opératoire

- concassée et tamiser les matériaux après le lavage et étuvage

- faire les peser correspondante a chaque diamètres

- mettre à l'enceinte climatique selon le programme suivant :

Tableau II-1 : le programme imposée pour l'essai d'altérabilité

	3 jours	3 jours	2 jours	4 jours
températures	45°C	26°C	0°C	-10°
humidité	30%	40%	50%	80%
ventilation	65%	80%	60%	90%
Etat d'échantillons	sec	sec	mi-imbibé	imbibé

II-5) conclusion

La réalisation de ces essais nous permet d'avoir une idée sur la sensibilité de nos matériaux à l'effet de la nature (atmosphère, hydrosphère et biosphère), ainsi d'apprécier la résistance des granulats sous l'effet des cycles mouillage/séchage.

A decorative purple scroll border frames the page. The top and bottom edges are horizontal, while the left and right edges are vertical. The top-left and bottom-left corners are rolled up, with the inner surface shaded in light gray.

Chapitre III:
Identification des matériaux
d`études

III-1)-Introduction

Le massif ancien de grande Kabylie est constitué d'un socle gneissique fortement métamorphique et d'une couverture schisteuse epimétamorphique (bossiere 1971) ; ces deux ensembles sont eux même recouverts en discordance par une série peu ou non métamorphique (bossiere et raymond1972). Cette couverture est constituée essentiellement d'un ensemble de sericitoschistes et de chloritoschistes présentant des passées gréseuses.

La partie supérieure du socle est formée d'une masse de quartzite à biotite présentant deux schistosités bien marquées. La partie inférieure est représentée par des gneiss fins à plagioclase, biotite et sillimanite (bossiere et gromov,1973).

L'existence des pegmatites dans la région est signalée pour la 1ere fois par Ficheur en 1899. L'étude détaillée de ces pegmatites du socle de grande Kabylie est entreprise 1951 par Thiebaut qui lie leur mode de mise en place à une phase métasomatique postérieure au métamorphisme. D'après Bossière et Gromov (1973), les pegmatites sont situées de façon préférentielle à la limite entre le socle gneissique du massif de la Kabylie et sa couverture schisteuse (Melbouci Bachir, Ait-Aider Hacene, Lami Mohand Oul Hocine ,2004).

Cette partie expérimentale a nécessité la réalisation de plusieurs séries d'essais d'identification, de compression, d'essai de cisaillement, d'altérabilité,...etc, permettant de définir les caractéristiques physiques et mécaniques, ainsi que les paramètres qui conditionnent l'utilisation de ces matériaux en géotechnique routière.

III-2) La pegmatite

III-2-1) Localisation du matériau pegmatite



Figure III-1 : la pegmatite

La pegmatite est une roche magmatique, qui fait partie de la famille des roches granitiques dont les principaux minéraux sont :

- le feldspath (kaolin)
- le mica noir (en faible quantité)
- le quartz de couleur blanc laiteux (en quantité assez importante)
- le mica blanc ou muscovite (brillant)

La pegmatite utilisée dans notre étude est une pegmatite à micas

Au niveau de la wilaya de Tizi-Ouzou, les gisements de pegmatite sont nombreux, ils se présentent comme suit :

-Les filons concordants (ou filons couches) très répandus et bien visibles, ils forment de petites crêtes (cas de Taguemounte –ne –Cherifet d'aboudid), leur puissance moyenne oscille de 10 à 50 m, leur longueur peut atteindre plusieurs centaines de mètres.

Certains filons de l'oued Sebaou ont été suivis jusqu'à 100 m de profondeur suivant le pendage.

- A Draa el Mizan, d'importants gisements ont été observés, ils se présentent soit :

*En filon pegmatitique ou selle

*En filon discordant dans le cœur d'un pli complexe

*En filon couche dans les gneiss fins

- A Tizi-Ouzou, le filon pegmatitique observé est stratiforme

- Un stock à allure concordante a été aussi observé dans la tranchée de la route longeant l'oued ksari (entre Draa –ben-khedda et Draa –el-Mizan)

-D'autres gisements aussi importants que ceux cites ci-dessus existent dans la région ; nous en citerons par exemple : celui de Sid-Ali –Bounab, celui Tizi –nterga....etc.

Les principales valeurs des caractéristiques physiques obtenues sur les matériaux pegmatites extraits au lieu dit taguemounte ne cherif située à 2 km de la commune d'Ait-Oumalou et à 30 km au Nord-Est de la wilaya de Tizi-Ouzou sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

Tableau III-1: Caractéristiques d'identification du matériau pegmatite (Melbouci 2004)

Caract	w% initiale	γ_s (gr/cm)	γ_d (gr/cm)	e	γ_d Proctor normale (gr/cm)	w _{opt} (%) Proctor normale	γ_d (gr/cm ³) Proctor modifie	w _{opt} (%) Proctor modifié	Indice CBR	CBR gonflemen t
valeurs	17.05	2.67	1.79	45.52	1.79	7.78	2	9.62	38.98	0

L'analyse minéralogique par diffraction aux rayons X (analyse quantitative) réalisée par Mr Melbouci (année 2000) a montré que le minéral dominant est le quartz et les minéraux accessoires sont : l'albite (feldspath), la muscovite et la microline.

-Tableau III-2 : caractéristiques de l'essai Proctor-

Caractéristiques	Proctor normal	Proctor modifié
$\gamma_{d\text{opt}}(\text{gr/cm}^3)$	1,78	2
$\omega_{\text{opt}}(\%)$	7,78	9,62

Les résultats d'analyse pétrographique ont montré que le minéral le plus abondant est le quartz avec un pourcentage assez élevé, le feldspath dans ce matériau est présent sous la catégorie d'albite, en outre les courbes Proctor obtenues (non représentées dans ce document) sont pratiquement aplaties, le matériau est donc très peu sensible à l'eau. Les résultats du **CBR** par ailleurs montrent que la pegmatite a une portance très favorable et un gonflement nul.

III-3) Le schiste



Figures III-2 : le schiste

III-3-1) Définition des schistes

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

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

Parmi les schistes importants figurent les micaschistes, les schistes chlorites et les talcs schistes. Généralement, le quartz est le principal minéral, la roche schisteuse la plus courante est la roche métamorphique la plus commune après le gneiss et le micaschiste.

Il se compose de mica, habituellement sous forme de biotite ou de muscovite et de quartz en quantité moindre.

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

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

III-3-2) Les différents types de schiste

a) Les schistes du métamorphisme général très faible

-schiste bitumineux

- les schistes ardoisés

b) Les schistes du métamorphisme générale faible (epizonale)

-schistes sericiteux ou satines

-schiste talqueux

-schiste chloriteux

-schiste lustres

c) Les schistes du micaschiste général plus fort (catazonal)

-les micaschistes

***Les schistes du métamorphisme de contact**

-les schistes tachetés (le cas de notre schiste à étudier) : la schistosité est en générale acquise antérieurement à l'intrusions des roches magmatiques, de couleur grise à noir à petites tâches de 0,5 à 3mm (schistes tachetés).

Schistes dans lesquels le métamorphisme de contact à basse intensité a développé des minéraux de néoformation qui se concentrent en agrégats ayant l'aspect de taches (porphyroblastes).

Le site d'extraction est situé à 4km au Nord-Est de la ville de Tizi-Ouzou sur les flancs longeant l'Oued Sébaou.

III-3-3) la composition minéralogique du schiste

Les résultats d'analyse minéralogique sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III-3 : les différents composants minéralogiques du schiste.

Texture	structure	Amphiboles (%)	Ferro-Actinote (%)	calcite	chlorite	Minéraux primaires	Minéraux secondaires
massive et compact	Hématoblaste	50-55	20-25	4-5	8-10	Amphibole Variété Hornblende En prisme allongés	Pyroxene Calcite Finement cristalline

III-3-4) caractéristiques physiques du schiste

Les caractéristiques déduites de l'essai de plasticité et de densité sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau III-4 : les valeurs des caractéristiques physique du schiste

caractères	W (%)	W _L	W _P	I _p	γ _d (gr/cm ³)	γ _h (gr/cm ³)	γ _s (gr/cm)	e	Sr (%)	n
valeurs	5.15	non mesurable	n-m	n-m	2.43	2.55	2.87	0.181	81.66	0.153

III-3-5) Résultats des essais CBR et Proctor

Les résultats de l'essai CBR et l'essai Proctor sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau III-5 : résultats des essais Proctor et CBR

Proctor modifié		Indice CBR (%)	
$(\gamma_d)_{opt}$ (gr/cm ³)	w_{opt} (%)	92% de compacité	98% de compacité
2.26	7.1	10	38

III-4) Le gré



Figure III-3 : le gré étudié

III-4-1) Définition du gré

Les principales définitions de ce matériau se résument comme suit : le matériau étudié est extrait au lieu « yakourène », situé à 70 km à l'Est du chef lieu de la wilaya de Tizi-Ouzou.

Le gré est une roche détritique, issue de la cimentation (ou diagenèse) de grain de sable. Il s'agit par conséquent d'une roche cohérente et dure constituée par l'agglomération de nombreux petits grains unis par un ciment naturel de composition variable.

III-4-2) Localisation du matériau grés

Au niveau de la wilaya de Tizi-Ouzou, les niveaux géologiques favorables au développement des grés sont les nappes de flushs (numidien) le miocène et l'oligo-miocène kabyle. Les grés numidiens sont de qualité supérieure à ceux du miocène. Les premiers affleurent essentiellement dans la partie orientale de la wilaya (Tabourth n'ait degane, Aourir, Achallam, Moknea) et sur sa bande littorale (cap Tedles, Zegzou, Ait-raouna), les seconds se développent au centre et au Sud de la wilaya (Souk-tlata, Thidoucene...)

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

III-4-3) Composition minéralogique du gré

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

- Le poids volumique varie entre 2220 et 2450 kg/m³
- La porosité entre 7,34 et 19,9%
- L'absorption d'eau entre 1,44 et 4,42%
- L'essai de compression à l'état sec entre 414 et 1516 kgf/cm²
- L'essai de compression à l'état saturé entre 302 et 975 kg.f/ cm²
- Le coefficient de ramollissement entre 0,50 et 0,78

Ces propriétés ainsi que leur capacité de se débiter en blocs, font de ces grés un matériau utilisable en construction (pierre de taille moellons).

Leurs propriétés chimiques ne sont pas homogènes aussi :

Tableau III-6 : compositions minéralogiques des grès numidiens, ` (Allili et Amokrane (1999)) ``

SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	MnO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	Paf (%)
91.57	0.10	0.04	0.15	0.10	0.02	0.01		0.01	0.29
à	a	a	a	a	a	a	0.05	a	a
98.64	1.8	3.60	0.36	1.05	0.21	0.05		0.51	1.35

Des grès quartzeux peuvent être utilisés à l'état naturel dans la sidérurgie, la fonderie et même dans la verrerie ordinaire.

III-5) La marne



Figure III-4 : le cite d'extraction de marne



Figure III-5: la marne à étudier

III-5-1) Définition de la marne

➤ **En géologie:** La Marne est définie comme étant une roche sédimentaire constituée d'un mélange de calcaire et d'un pourcentage d'argile variant entre 30 à 70 %. Elle est moins compacte que les calcaires et moins plastique que les argiles.

➤ **En géotechnique** : les marnes sont des roches relativement tendres qui présentent une résistance élevée à l'état sec mais leur comportement est différent en contact avec l'eau ; elles deviennent gonflantes et non résistantes, ce qui limite leur utilisation comme matériaux de remblais dans les travaux de génie civil et infrastructures, (*Mellal et Lamri, 2010*).

III-5-2) Les différents types de marnes

Ces différents éléments responsables de la couleur et de l'aspect permettent de définir la marne rencontrée par une appellation. On parle ainsi :

1) La couleur

- des marnes vertes du bassin de Paris,
- des marnes bleues d'Argenteuil,
- des marnes rouges de Marseille,
- des marnes bariolées du Trias lorrain

2) Les constituants remarquables

- de marnes dolomitiques,
- de marnes micacées,
- de marnes sableuses,
- de marnes glauconieuses,
- de marnes bitumineuses,
- de marnes gypseuses, etc.

3) Diagenèse des carbonates

L'étude de la sédimentologie des carbonates distingue deux types de phénomènes diagénétiques :

- Ceux qui affectent la composition minéralogique et chimique (remplacement, recristallisation, dissolution, cimentation, formation de nodules).
- Ceux qui altèrent la structure (fracturation, déformation plastique, tassement par dessiccation), (*Schmidt, 1965*).

4) L'altération des marnes



Figure III-6: L'altération de la marne (kichi 2013)

L'altération des marnes se traduit essentiellement par une dégradation de la structure de la roche en surface sous l'effet de divers mécanismes (*Buffalo et Gallart, 1989*). La couverture, le drainage, la morphologie, la stratification par rapport au pendage, et le climat agissent simultanément sur l'altération des marnes.

Cependant, le facteur le plus affluant est le drainage des nappes. On citera, parmi les paramètres d'altération :

- La détérioration des propriétés mécaniques,
- La diminution du poids volumiques sec,
- La modification des caractéristiques chimiques,
- L'apparition des fissures,
- L'évolution de la Marne (matériaux argileux),
- Le changement de couleur de l'état naturel,
- L'augmentation de la teneur en eau de saturation

III-5-3) Etude géologique

Les travaux du géologue français Daniel Raymond cité par *Mehidi (1997)*, montrent que la marne se trouve en abondance dans tout le Nord-Est de Tizi-Ouzou. En effet la carte géographique de la Grande Kabylie situe le gisement dans toute la vallée qui contourne le Djebel Sidi Belloua et Aissa Mimoun. L'étendue s'étale de Timizart Laghbar à Mekla au Sud ; de Makouda vers le Nord et en tirant vers Oulad ouaret par le Nord-Ouest.

Les marnes utilisées dans cette étude ont été prélevées au niveau de la willaya de Tizi-Ouzou sur le site de : Les Chabanes.

La marne a une couleur grise, friable et s'altère rapidement en présence d'eau et au contact d'air comme le montre la figure (III-6).

III-5-4) Caractéristiques physiques et chimiques

Les résultats des études physique et chimique sont représenté dans le tableau suivant :

Tableau III-7) : caractéristiques physique et chimique de la marne

Les caractères	La valeur	La signification
Teneur en eau naturel (w %)	5.080	—
Masse volumique des grains solides ρ_s (gr/cm ³)	2.604	—
Masse volumique humide du sol ρ_H (gr/cm ³)	2.450	—
Masse volumique du sol sec ρ_d (gr/cm ³)	2.331	> 1.8 =>dense
Indice des vides e (%)	0.1171	Marne très compacte
Degrés de saturation S_r (%)	11.29	1<11.29<25 => légèrement humide
W_L (%)	26.15	—
W_P (%)	20.10	—
I_P (%)	06.05	Sol peut plastique
I_C (%)	03.48	solide
VBS	02.28	Sol limoneux
Teneur en CaCO ₃ (%)	52.21	Le sol est une marne
Teneur en matière organique (%)	01.3	Sol inorganique
% < 80 μ m	84.91	-
Teneur en sulfate SO ₄ (%)	01.8	Fortement agressive
CL ⁻ (%)	trace	—

III-5-5) Analyse minéralogique

Les analyses minéralogiques sont réalisées au diffractomètre et les principaux résultats sont portés aux figures ci-dessous.

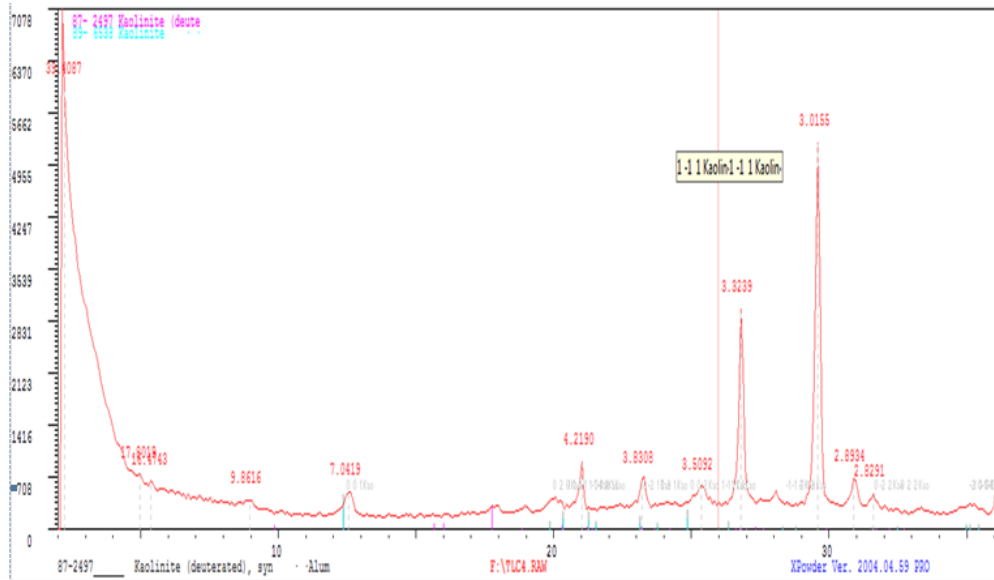


Figure III-7 : Diffractogramme obtenue pour la Marne (kichi.h,2013)

*Résultat

A partir du diffractogramme on obtient les résultats suivant :

Tableau III-8) : résultat obtenue à partir du Diffractogramme

Kaolinite	Muscovite	Interstratifiées Illite/Montmorillonite	Illite/Potassique
présence	absence	absence	absence

III-5-6) Les caractéristiques mécaniques

Les résultats des essais mécaniques sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III-9) : les caractéristiques mécaniques de la marne

Wopt (%)	ρd opt (g/cm³)	Gonflement G (%)	CBRimm (%)	La cohésion	Angle de frottement φ' (°)	Cc	Cg

				C'(KPa)			
12,7	1,968	0,155	4,472	6.21	37.7	0,0729	0,0177

III-6) Conclusion

Un sol se caractérise par la nature et les propriétés de ses particules et par son état.

- La nature du sol est définie par sa granularité, sa plasticité (ou son équivalent de sable), la nature de ses particules (minéraux, matières organiques).
- L'état du sol est défini par l'indice des vides (ou la teneur en eau) pour les sols saturés et par l'indice des vides et le degré de saturation (ou la teneur en eau) pour les sols non saturés. Il s'apprécie également en valeur relative par l'indice de consistance pour les sols cohérents (ou fins) et l'indice de densité pour les sols pulvérulents (ou grenus).

La région de tizi-ouzu dispose de plusieurs gisement des matériaux (gré, schiste, marne, pegmatite) situées en surface et près des routes nationales, ce qui rend leur exploitation facile et a moindre cout .ces matériaux disposent des principaux minéraux qui sont la silice, le quartz, le feldspath et les micas.

Dans notre recherche la forme des grains (sous arrondi, anguleux et allongée) la taille, et leur nature joue un rôle très important vue que la dimension fractale devient importante quand un grain présente une rugosité ou des irrégularités dans sa surface, cela sera déduit dans la partie expérimentale.



Chapitre IV:

**Déroulement des essais et calcul de
la dimension fractale**

IV-1) Introduction

Un milieu granulaire est composé d'un ensemble de grains de différentes formes (sous-arrondie, anguleuse et allongée) et de différentes tailles (16, 14, 12.5,...mm). La courbe granulométrique est représentée pour tous les échantillons à étudier de différentes formes des grains et de différentes classes dans le but de montrer l'influence de la forme et de la classe dans la dégradation des grains en terme de dimension fractale.

Le calcul de la dimension fractale se fera par deux méthodes : méthode des masses qui prend en compte la distribution granulaire et la masse des grains de chaque diamètre (courbe granulométrique), méthode des boîtes (box counting) qui prend en considération les changements surfacique et périmétrique au niveau du grain.

Ces essais ont été réalisés au laboratoire de recherche L.E.G.A de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Partie 1

Préparation des échantillons

IV-2) concassage des matériaux

Les matériaux utilisés ont été extraits sous forme de blocs de grande dimension. Ces derniers sont concassés à l'aide d'un marteau pour les grands diamètres et d'un concasseur à mâchoire (pour les petits diamètres inférieurs à 5 mm).



-Figure IV-1- : concassage du gré

IV-3) le tamisage

Le tamisage est fait dans le but de séparer les différents diamètres des grains pour constituer les classes désirées à étudier selon les normes des essais choisis (dégradabilité 10/20, altérabilité et gel /dégel 0/16).



-Figure IV-2 : La tamiseuse utilisée.



-Figure IV-3 : Tamisage manuel.

IV-4) la sélection des grains

Les grains obtenues après concassage et tamisage sont indépendants et sont de forme irrégulière. La sélection des différentes formes est faite manuellement à l'œil nu.

Dans cette étude, 3 formes ont été adoptées pour le cas du schiste et de la marne, 2 formes pour le cas du gré (vue la difficulté d'avoir une quantité suffisante pour les grains de forme allongée) et une seule forme dans le cas de la pegmatite (figures N° : IV-4 à IV-12).

IV-4-1) le schiste



Figure IV-4 : grains sous-arrondis de schiste



Figure IV-5 : grains anguleux de schiste



Figure IV-6 : schiste de grains de forme allongée

IV-4-2) la marne



Figure IV-7 : marne de forme sous arrondie



Figure IV-8 : marne de forme anguleuse



Figure IV-9 : grains de forme allongée de marne

IV-4-3) le gré



Figure IV-10 : grés de forme sous arrondie **Figure IV-11** : grés de forme anguleuse

IV-4-4) la pegmatite



Figure IV-12 : Grains de pegmatite

IV-5) Confection des échantillons

- On impose une éprouvette de matériaux pour l'essai gel/ dégel et l'essai d'altérabilité.
- On pèse le poids de chaque matériau qui sera la masse totale de l'échantillon.



Figure IV-13 : Eprouvette du matériau imposé



Figure IV-14:Forme allongée de marne 10/16



Figure IV-15:Forme allongée de marne 5/10



Figure IV-16 : marne anguleuse 0/5



Figure IV-17 : l'échantillon globale à étudier

IV-6) analyse granulométrique

La courbe granulométrique prise en compte est représentée sur la figure IV- 18 ci-dessous :

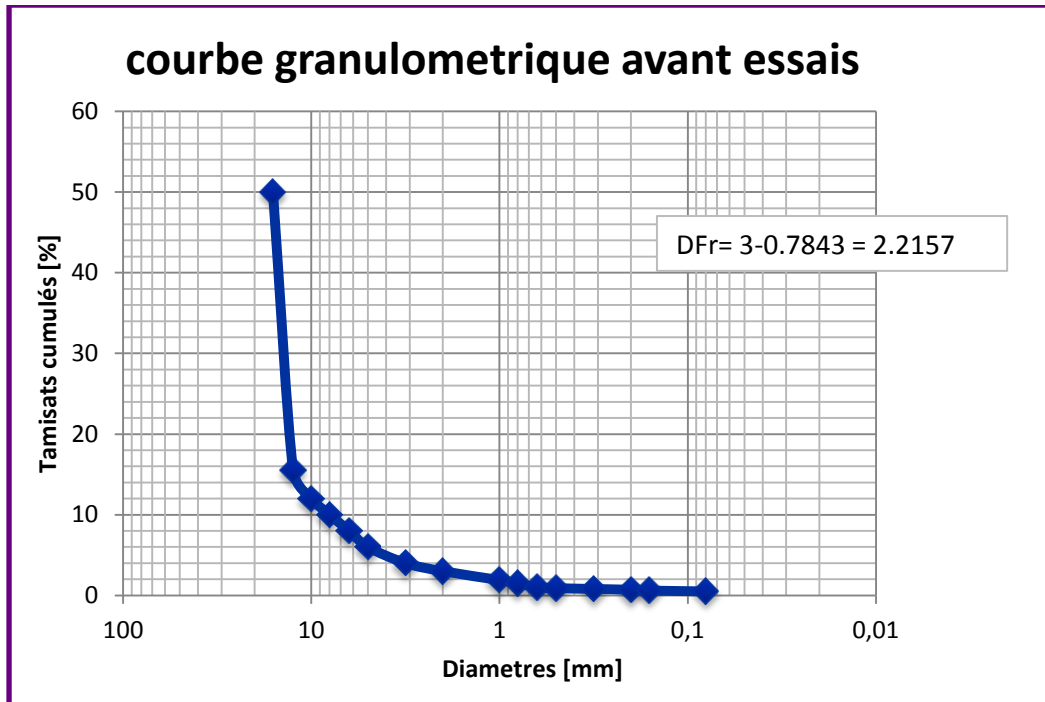


Figure IV-18: Courbe granulométrique initiale.

A partir des pourcentages des tamisats cumulés de cette courbe, les différentes masses à peser pour chaque diamètre du matériau ont été déterminées.

IV-6-1) Le schiste : MT=291,226 gr

L`analyse granulométrique de la fraction granulaire 0/16 pour les 3 forme de schiste avant essai a été imposée tel suite :

Tableau IV-1: Pourcentage des tamisât cumulés du schiste avant essai.

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
16	145.595	145.595	145.631	50	01.00	00.500
12.5	100.46	246.055	45.171	15.5	0.78125	00.155
10	10.191	256.246	34.98	12	00.625	00.120
8	05.823	262.069	29.157	10	00.500	00.100
6.3	05.823	267.892	23.334	08	00.394	00.080
5	05.823	273.715	17.511	06	00.312	00.060
3.15	05.823	279.538	11.688	04	00.196	00.040
2	02.911	282.449	08.777	03	00.125	00.030
1	03.203	285.652	05.574	1.9	00.062	00.019
0.8	01.164	286.816	04.410	1.5	00.050	00.015
0.63	01.455	288.271	02.955	01	00.039	00.010
0.5	00.300	288.571	02.655	0.9	00.031	00.009
0.315	00.300	288.871	02.355	0.8	00.020	00.008
0.2	00.300	289.171	02.055	0.7	00.012	00.007
0.16	00.300	289.471	01.755	0.6	00.010	00.006
0.08	00.300	289.771	01.455	0.5	00.005	00.004
0	01.455	291.226	00.00	00	00.00	00.00

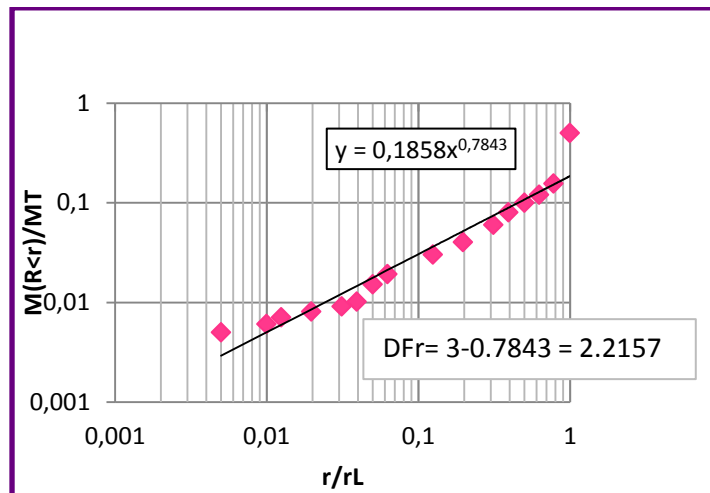


Figure IV-19 : Calcul de la dimension fractale du schiste avant essai.

IV-6-2) la Marne : $M_T=300,113$ gr

L`analyse granulométrique de la fraction granulaire 0/16 pour les 3 forme de marne avant essai a été imposée tel suit :

TABLEAU IV-2: Pourcentage des tamisât cumulés de la marne avant essai.

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
16	150.559	150.559	150.554	50	01.00	00.499
12.5	103.885	254.444	46.669	15.5	0.78125	00.155
10	10.539	264.983	36.130	12	00.625	00.119
8	06.022	271.005	30.108	10	00.500	00.099
6.3	06.022	277.027	24.086	08	00.394	00.079
5	06.022	283.049	18.064	06	00.312	00.059
3.15	06.022	289.071	12.042	04	00.196	00.039
2	03.011	292.082	09.031	03	00.125	00.029
1	03.312	295.394	05.719	1.9	00.062	00.018
0.8	01.204	296.598	04.515	1.5	00.050	00.015
0.63	01.505	298.103	03.01	01	00.039	00.009
0.5	00.301	298.404	02.709	0.9	00.031	00.008
0.315	00.301	298.705	02.408	0.8	00.020	00.007
0.2	00.301	299.006	02.107	0.7	00.012	00.006
0.16	00.301	299.307	01.806	0.6	00.010	00.005
0.08	00.301	299.608	01.505	0.5	00.005	00.004
0	01.505	301.113	00.00	00	00.00	00.00

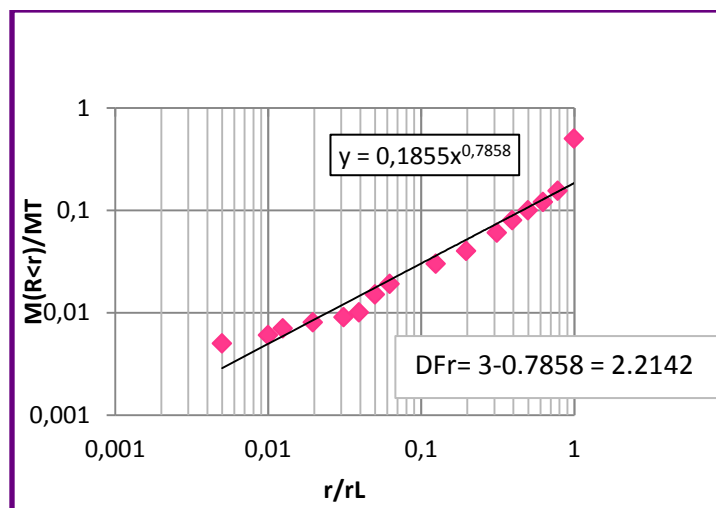


Figure IV-20 : Calcul de la dimension fractale de la marne avant essai.

IV-6-3) Le gré : $M_T=270,373$ gr

L`analyse granulométrique de la fraction granulaire 0/16 pour les 3 forme du gré avant essai a été imposée tel suit :

TABLEAU IV-3: Pourcentage des tamisât cumulés du gré avant essai.

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
16	135.733	135.733	134.64	50	01.00	00.497
12.5	93.655	229.388	40.985	15.5	0.78125	00.151
10	09.501	238.889	31.484	12	00.625	00.116
8	05.429	244.318	26.055	10	00.500	00.096
6.3	05.429	249.747	20.626	08	00.394	00.076
5	05.429	255.176	15.197	06	00.312	00.056
3.15	05.429	260.605	09.768	04	00.196	00.036
2	02.714	263.319	07.054	03	00.125	00.026
1	02.986	266.305	04.068	1.9	00.062	00.015
0.8	01.085	267.39	02.983	1.5	00.050	00.011
0.63	00.271	267.661	02.712	01	00.039	00.010
0.5	00.271	267.932	02.441	0.9	00.031	00.009
0.315	00.271	268.203	02.170	0.8	00.020	00.008
0.2	00.271	268.474	01.899	0.7	00.012	00.007
0.16	00.271	268.745	01.628	0.6	00.010	00.006
0.08	00.271	269.016	01.357	0.5	00.005	00.005
0	01.357	270.373	00.00	00	00.00	00.00

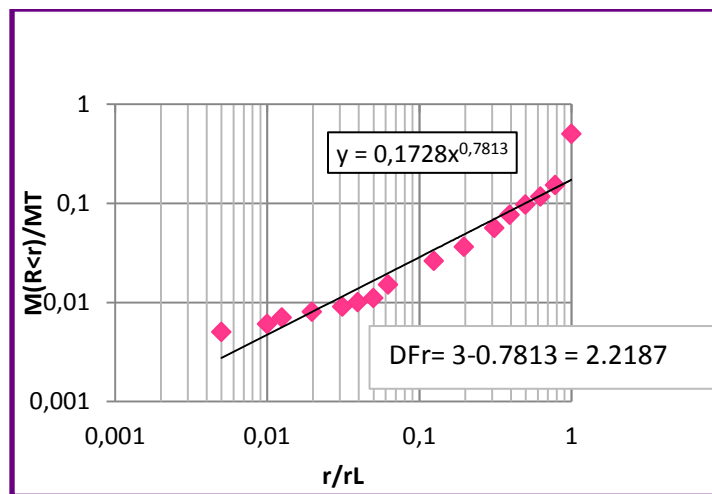


Figure IV-21 : Calcul de dimension fractale du gré avant essai.

IV-6-4) La pegmatite : $M_T=308,693$ gr

L'analyse granulométrique de la fraction granulaire 0/16 pour les 3 forme de la pegmatite avant essai a été imposée te suit:

TABLEAU IV-4: Pourcentage des tamisât cumulés de la pegmatite avant essai.

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
16	154.35	154.350	154.343	50	01.00	00.499
12.5	106.501	260.851	47.842	15.5	00.781	00.154
10	10.804	271.655	37.038	12	00.625	00.119
8	06.174	277.829	30.864	10	00.500	00.099
6.3	06.174	284.003	24.690	08	00.394	00.079
5	06.174	290.177	18.516	06	00.312	00.059
3.15	06.174	296.351	12.342	04	00.196	00.039
2	03.087	299.438	09.255	03	00.125	00.029
1	03.395	302.833	05.860	1.9	00.062	00.018
0.8	01.234	304.067	04.626	1.5	00.050	00.015
0.63	01.543	305.610	03.083	01	00.039	00.009
0.5	00.308	305.918	02.775	0.9	00.031	00.008
0.315	00.308	306.226	02.467	0.8	00.020	00.007
0.2	00.308	306.534	02.159	0.7	00.012	00.006
0.16	00.308	306.842	01.851	0.6	00.010	00.005
0.08	00.308	307.150	01.543	0.5	00.005	00.004
0	01.543	308.693	00.00	00	00.00	00.00

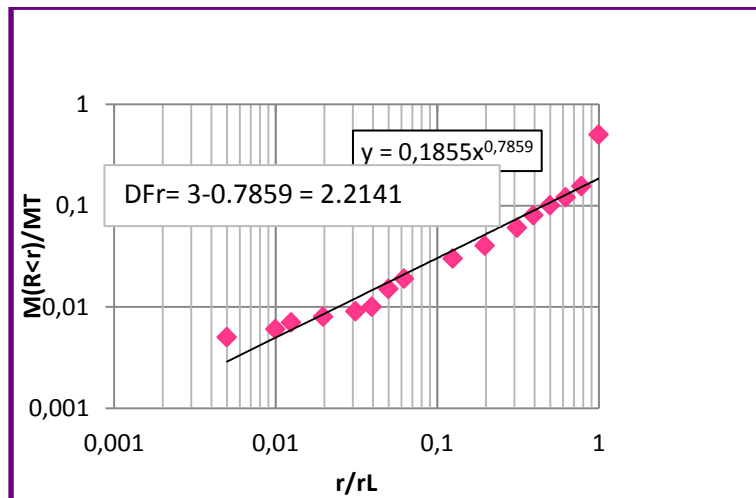


Figure IV- 22: Calcul de la dimension fractale de la pegmatite avant essai.

Partie 2

Déroulement des essais et calcul de
la dimension fractale

IV-7) Courbes granulométriques et calcul de la dimension fractale (méthode des masses) après essai

Les courbes granulométrique pour chaque niveau d'altération est déterminée et simultanément en utilisant la méthode des masses on détermine la dimension fractale.

IV-7-1) Essai gel/dégel

L'essai a été appliqué selon la norme **NF-EN 1367-1** à l'enceinte climatique du laboratoire de recherche LGEA Tizi-Ouzou.



Figure IV-23: enceinte climatique



Figure IV-24: enceinte climatique a 20°C

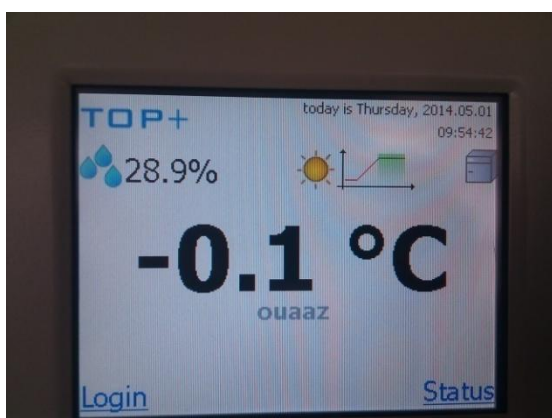


Figure IV-25 : enceinte climatique à 0°C

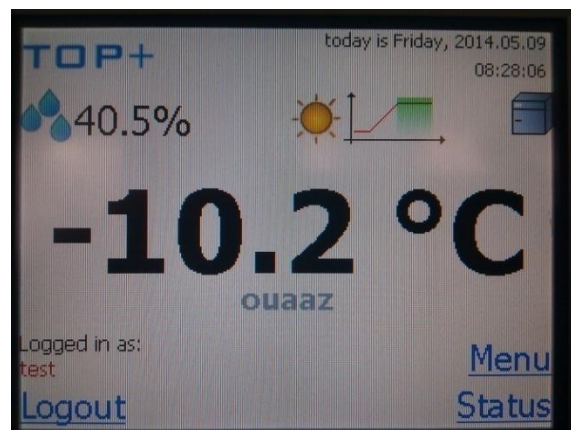


Figure IV-26 : enceinte climatique a -10°C



Figure IV-27 : Le gel



Figure IV-28: Le dégel



Figure IV-29: L`effet du gel



Figure IV-30: Les échantillons après l`essai

L'analyse granulométrique et le calcul des dimensions fractales par la méthode des masse après essai de la fraction granulaire 0/16 pour les 3 forme des 4 matériaux a donnée les résultats suivant :

Tableau IV-5 : Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 des grains de schiste de forme sous arrondie après essai.

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
16	43.131	43.131	245.112	85.0366	01.00	00.850
12.5	67.092	110.223	178.020	61.760	00.781	00.617
10	42.332	152.555	135.688	47.074	00.625	00.470
8	32.148	184.703	103.540	35.921	00.500	00.359
6.3	28.455	213.158	75.085	26.049	00.394	00.260
5	24.960	238.118	50.125	17.389	00.312	00.173
3.15	26.358	264.476	23.767	08.245	00.196	00.082
2	11.183	275.659	12.584	04.366	00.125	00.043
1	05.791	281.45	06.793	02.356	00.062	00.023
0.8	01.598	283.048	05.195	01.802	00.050	00.018
0.63	02.297	285.345	02.898	01.005	00.039	00.010
0.5	00.699	286.044	02.199	00.763	00.031	00.007
0.315	00.699	286.743	01.500	00.520	00.019	00.005
0.2	00.400	287.143	01.100	00.381	00.012	00.003
0.16	00.400	287.543	00.700	00.243	00.010	00.002
0.08	00.400	287.943	00.300	00.104	00.005	00.001
0	00.300	288.243	00.00	00.00	00.00	00.00

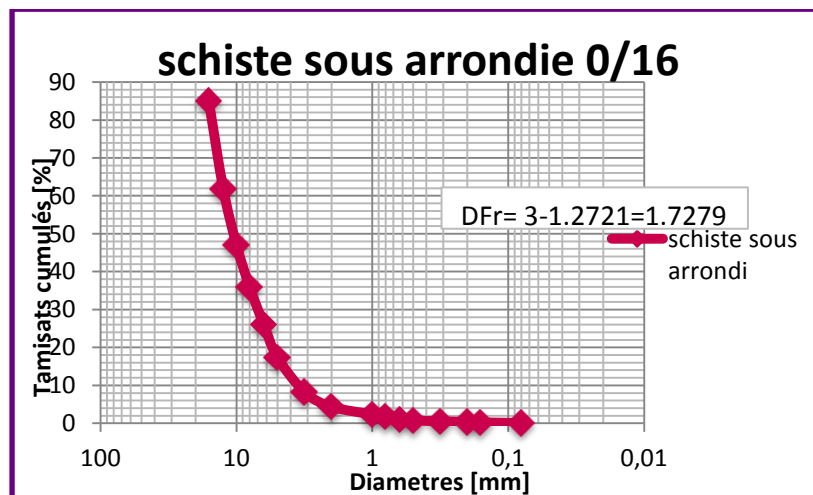


Figure IV-31: Courbe granulométrique des grains de schiste de forme sous arrondie après essai. gel/dégel

Tableau IV-6 : Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 des grains de schiste de forme allongée après essai.

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
16	39.137	039.137	248.806	86.408	01.00	00.864
12.5	66.094	105.231	182.712	63.454	00.781	00.634
10	48.023	153.254	134.689	46.776	00.625	00.467
8	32.149	185.403	102.540	35.611	00.500	00.356
6.3	26.957	212.360	075.583	26.249	00.394	00.262
5	24.861	237.221	050.722	17.615	00.312	00.176
3.15	27.755	264.976	022.967	07.976	00.196	00.079
2	10.084	275.060	012.883	04.474	00.125	00.045
1	06.291	281.351	06.592	02.289	00.062	00.023
0.8	01.498	282.849	05.094	01.769	00.050	00.017
0.63	02.297	285.146	02.797	00.971	00.039	00.009
0.5	00.799	285.945	01.998	00.694	00.031	00.007
0.315	00.699	286.644	01.299	00.451	00.019	00.004
0.2	00.499	287.143	00.800	00.277	0.0125	00.002
0.16	00.200	287.343	00.600	00.208	00.010	00.002
0.08	00.500	287.843	00.100	00.035	00.005	0.0003
0	00.100	287.943	00.00	00.00	00.00	00.00

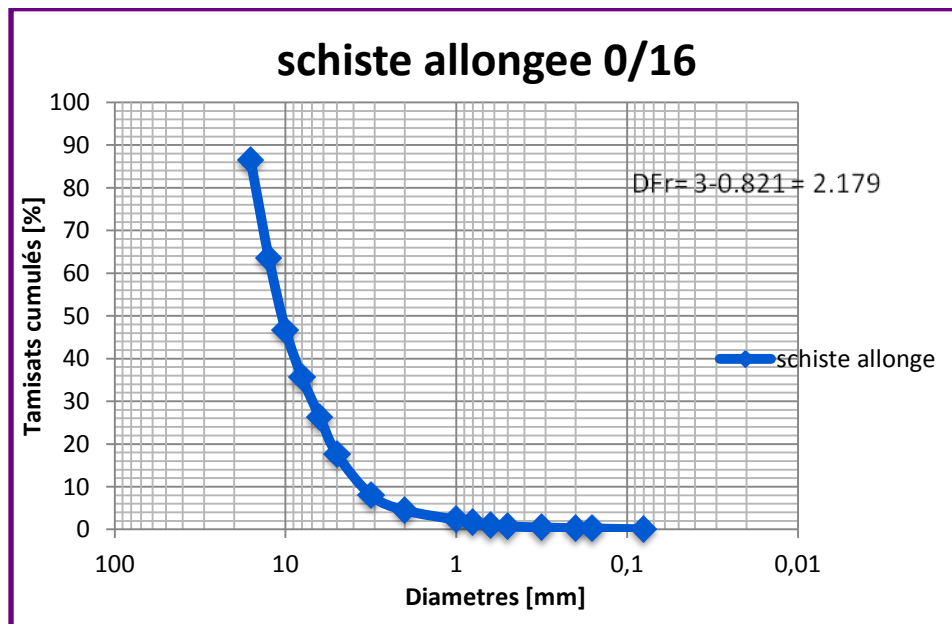


Figure IV-32 : Courbe granulométrique des grains de schiste de forme allongée après essai gel/dégel.

Tableau IV-7 : Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 des grains de schiste de forme anguleuse après essai

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
16	23.762	23.762	265.181	91.776	01.00	00.918
12.5	37.839	61.601	227.342	78.680	00.781	00.787
10	65.496	127.097	161.846	56.013	00.625	00.560
8	46.127	173.224	115.719	40.049	00.500	00.400
6.3	35.643	208.867	80.076	27.713	00.394	00.277
5	025.46	234.327	54.616	18.902	00.312	00.189
3.15	27.756	262.083	26.860	09.296	00.197	00.093
2	12.780	274.863	14.080	04.873	00.125	00.049
1	06.690	281.553	07.390	02.557	00.062	00.025
0.8	01.697	283.250	05.693	01.970	00.050	00.019
0.63	02.097	285.347	03.596	01.244	00.039	00.012
0.5	00.899	286.246	02.697	00.933	00.031	00.009
0.315	00.799	287.045	01.898	00.657	00.019	00.006
0.2	00.499	287.544	01.399	00.484	00.012	00.005
0.16	00.400	287.944	00.999	00.346	00.010	00.003
0.08	00.499	288.443	00.500	00.173	00.005	00.002
0	00.500	288.943	00.00	00.00	00.00	00.00

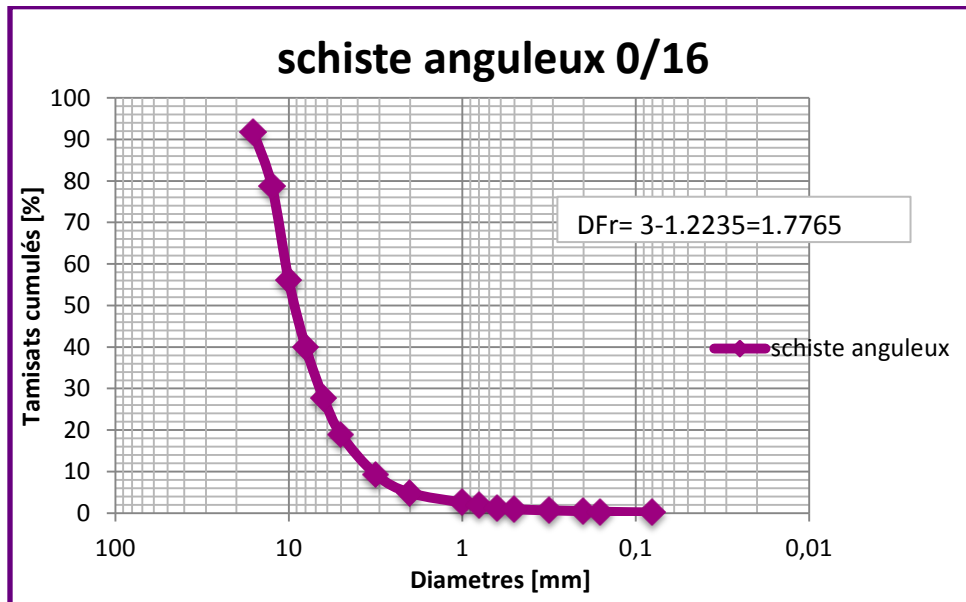


Figure IV-33 : Courbe granulométrique des grains de schiste de forme anguleuse après essai gel/dégel.

Tableau IV-8 : Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 de la marne sous-arrondie après essai

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
16	00.00	00.00	298.225	100	01.00	01.00
12.5	59.105	59.105	239.120	80.181	00.781	00.802
10	70.088	129.193	169.032	56.679	00.625	00.566
8	43.530	172.723	125.502	42.083	00.500	00.421
6.3	29.454	202.177	96.048	32.206	00.394	00.322
5	24.261	226.438	71.787	24.071	00.312	00.241
3.15	26.857	253.295	44.930	15.066	00.197	00.151
2	18.671	271.966	26.259	08.805	00.125	00.088
1	14.178	286.144	12.081	04.051	00.062	00.040
0.8	02.196	288.34	09.885	03.315	00.050	00.033
0.63	02.595	290.935	07.290	02.444	00.039	00.024
0.5	01.398	292.333	05.892	01.975	00.031	00.019
0.315	01.598	293.931	04.294	01.439	00.019	00.014
0.2	01.298	295.229	02.996	01.005	00.012	00.010
0.16	00.400	295.629	02.596	00.870	00.010	00.008
0.08	01.398	297.027	01.198	00.402	00.005	00.004
0	01.198	298.225	00.00	00.00	00.00	00.00

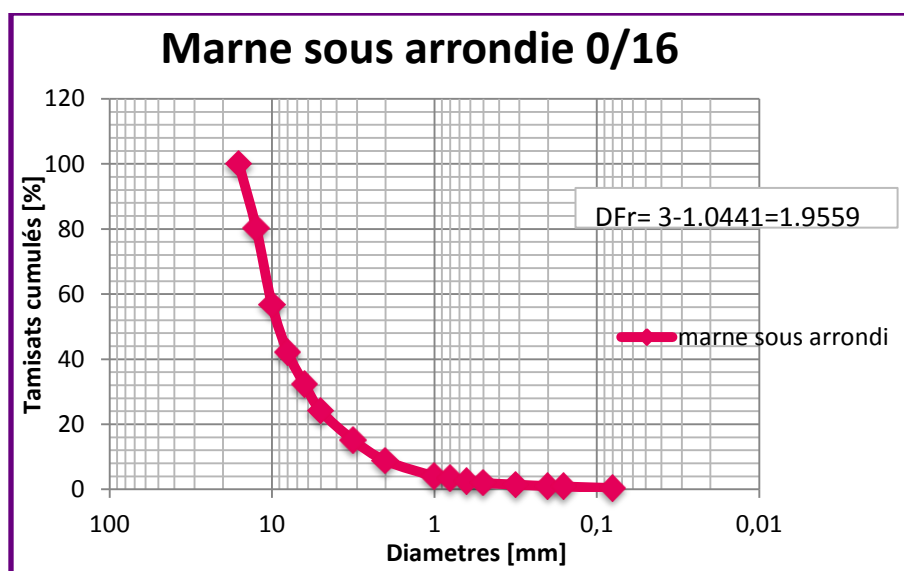


Figure IV-34 : Courbe granulométrique de la marne sous arrondie après essai gel/dégel

Tableau IV-9: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 de la marne anguleuse après essai.

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
16	07.588	07.588	291.036	97.459	01.00	00.975
12.5	39.237	46.825	251.799	84.319	00.781	00.843
10	49.521	96.346	202.278	67.737	00.625	00.677
8	48.922	145.268	153.356	51.354	00.500	00.513
6.3	39.237	184.505	114.119	38.215	00.394	00.382
5	28.056	212.561	86.063	28.819	00.312	00.288
3.15	33.745	246.306	52.318	17.519	00.197	00.175
2	21.665	267.971	30.653	10.265	00.125	00.103
1	17.472	285.443	13.181	04.414	00.062	00.044
0.8	02.796	288.239	10.385	03.477	00.050	00.035
0.63	03.095	291.334	07.290	02.441	00.0394	00.024
0.5	01.398	292.732	05.892	01.973	00.031	00.019
0.315	01.897	294.629	03.995	01.339	00.019	00.013
0.2	01.398	296.027	02.597	00.869	00.012	00.009
0.16	00.400	296.427	02.197	00.736	00.010	00.007
0.08	01.498	297.925	00.699	00.234	00.005	00.002
0	00.699	298.624	00.00	00.00	00.00	00.00

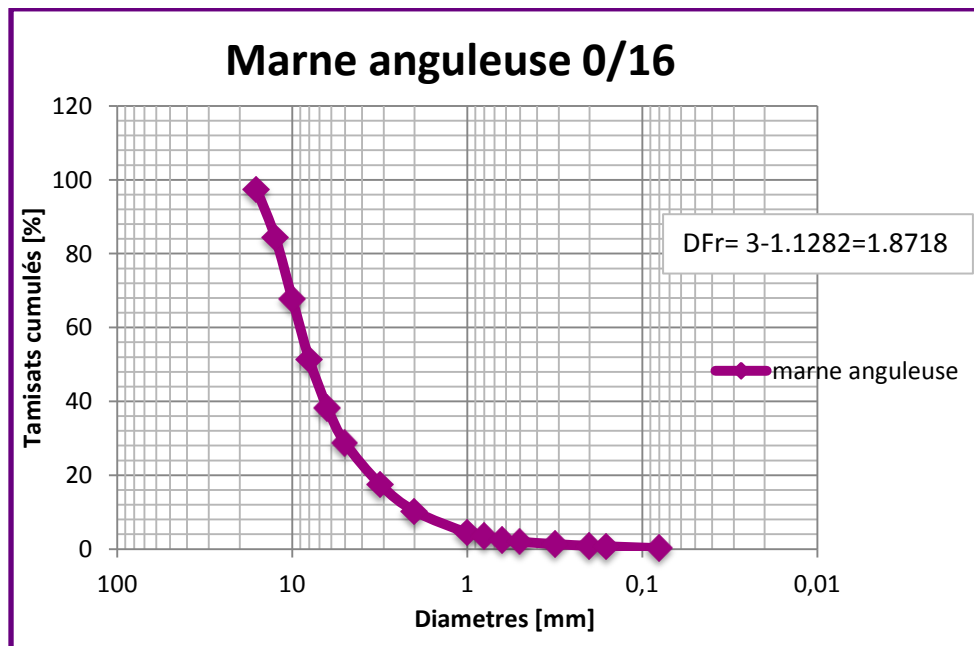


Figure IV-35 : Courbe granulométrique de la marne anguleuse après essai gel/dégel.

Tableau IV-10: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 de la marne allongée après essai.

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
16	00.00	00.00	299.426	100	01.00	01.00
12.5	51.717	51.717	247.709	82.728	00.781	00.828
10	66.893	118.610	180.816	60.387	00.625	00.605
8	46.226	164.836	134.590	44.949	00.500	00.451
6.3	44.029	208.865	90.561	30.245	00.394	00.304
5	24.261	233.126	66.300	22.142	00.312	00.224
3.15	28.454	261.580	37.846	12.639	00.197	00.129
2	16.180	277.760	21.666	07.236	00.125	00.075
1	10.683	288.443	10.983	03.668	00.062	00.039
0.8	02.296	290.739	08.687	02.901	00.050	00.031
0.63	02.696	293.435	05.991	02.001	00.039	00.022
0.5	01.298	294.733	04.693	01.567	00.031	00.019
0.315	01.897	296.630	02.796	00.934	00.019	00.012
0.2	01.198	297.828	01.598	00.534	00.012	00.008
0.16	00.400	298.228	01.198	00.400	00.010	00.007
0.08	00.100	298.328	01.098	00.366	00.005	00.004
0	01.098	299.426	00.00	00.00	00.00	00.00

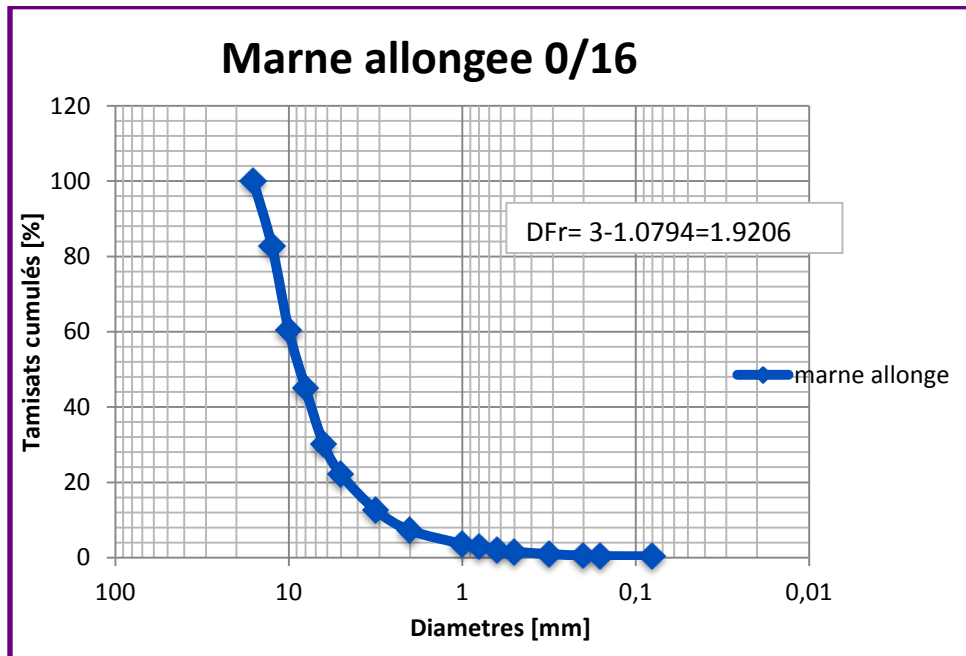


Figure IV-36: Courbe granulométrique de la marne allongée après essai gel/dégel.

Tableau IV-11: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 des grains de gré de forme anguleuse après essai.

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
16	109.824	109.824	160.343	59.349	01.00	00.596
12.5	118.910	228.734	41.433	15.336	00.781	00.158
10	09.984	238.718	31.449	11.640	00.625	00.122
8	05.491	244.209	25.958	09.608	00.500	00.101
6.3	04.592	248.801	21.366	07.908	00.394	00.084
5	06.490	255.291	14.876	05.506	00.312	00.060
3.15	06.690	261.981	08.186	03.029	00.196	00.036
2	02.796	264.777	05.390	01.995	00.125	00.025
1	02.095	266.872	03.295	01.219	00.062	00.014
0.8	00.300	267.172	02.995	01.108	00.050	00.013
0.63	00.499	267.671	02.496	00.923	00.039	00.011
0.5	00.300	267.971	02.196	00.812	00.031	00.009
0.315	00.399	268.37	01.797	00.665	00.020	00.008
0.2	00.399	268.769	01.398	00.517	00.012	00.007
0.16	00.00	268.769	01.398	00.517	00.010	00.006
0.08	00.599	269.368	00.799	00.296	00.005	00.003
0	00.799	270.167	00.00	00.00	00.00	00.00

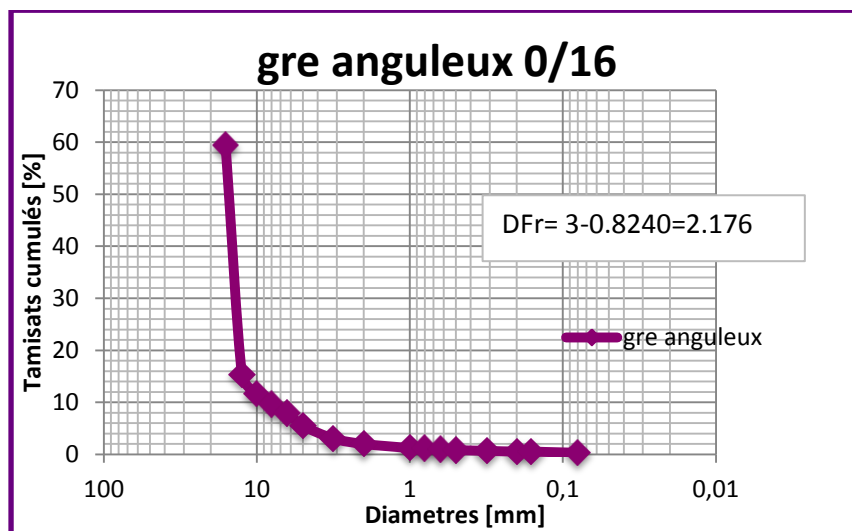


Figure IV-37 : Courbe granulométrique des grains de gré de forme anguleuse après essai gel/dégel.

Tableau IV-12: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 des grains de gré de forme sous-arrondie après essai.

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
16	121.206	121.206	148.98	55.139	01.00	00.554
12.5	104.433	225.639	44.547	16.487	00.781	00.171
10	10.084	235.723	34.463	12.755	00.625	00.134
8	06.789	242.512	27.674	10.242	00.500	00.108
6.3	06.190	248.702	21.484	07.951	00.394	00.086
5	05.890	254.592	15.594	05.771	00.312	00.064
3.15	06.100	260.692	09.494	03.514	00.196	00.041
2	02.599	263.291	06.895	02.552	00.125	00.031
1	03.200	266.491	03.695	01.367	00.062	00.018
0.8	00.699	267.19	02.996	01.109	00.050	00.015
0.63	00.899	268.089	02.097	00.776	00.039	00.012
0.5	00.300	268.389	01.797	00.665	00.031	00.011
0.315	00.399	268.788	01.398	00.517	00.019	00.009
0.2	00.499	269.287	00.899	00.332	00.012	00.007
0.16	00.200	269.487	00.699	00.258	00.010	00.006
0.08	00.599	270.086	00.100	00.037	00.005	00.004
0	00.100	270.186	00.00	00.00	00.00	00.00

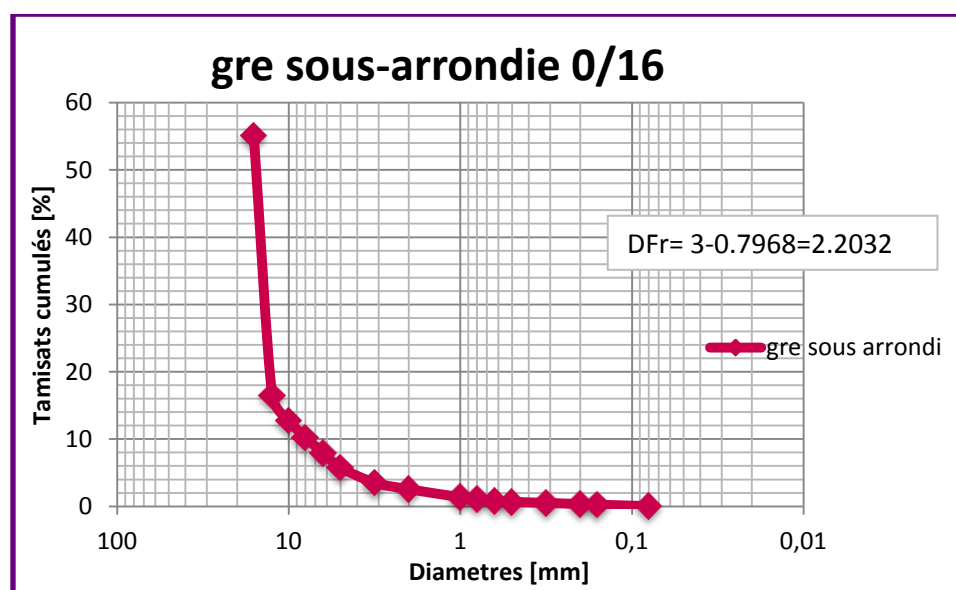


Figure IV-38 : Courbe granulométrique des grains de gré de forme sous-arrondie après essai gel/dégel.

Tableau IV-13: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 des grains de pegmatite après essai.

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
10	10.883	10.883	38.040	77.755	01.00	00.777
8	07.089	17.972	30.951	63.265	00.800	00.633
6.3	05.491	23.463	25.460	52.041	00.630	00.520
5	06.290	29.753	19.170	39.184	00.500	00.391
3.15	06.190	35.943	12.980	26.531	00.315	00.265
2	03.295	39.238	09.685	19.796	00.200	00.198
1	03.195	42.433	06.490	13.266	00.100	00.133
0.8	00.100	42.533	06.390	13.061	00.080	00.130
0.63	02.496	45.029	03.894	07.959	00.063	00.079
0.5	00.599	45.628	03.295	06.735	00.050	00.067
0.315	00.499	46.127	02.796	05.715	00.031	00.057
0.2	00.499	46.626	02.297	04.695	00.020	00.047
0.16	00.200	46.826	02.097	04.286	00.016	0.043
0.08	00.799	47.625	01.298	02.653	00.008	0.026
0	10.298	48.923	00.00	00.00	00.00	00.00

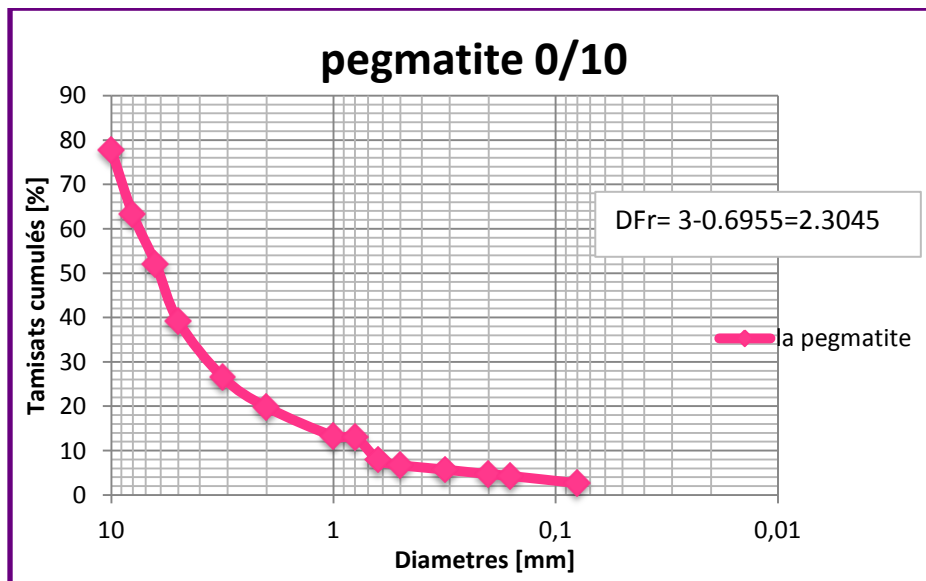


Figure IV-39 : Courbe granulométrique de la pegmatite après essai gel/dégel.

Résultats

Les résultats observés sur les 4 matériaux de différentes formes sont représentés dans les figures suivantes :

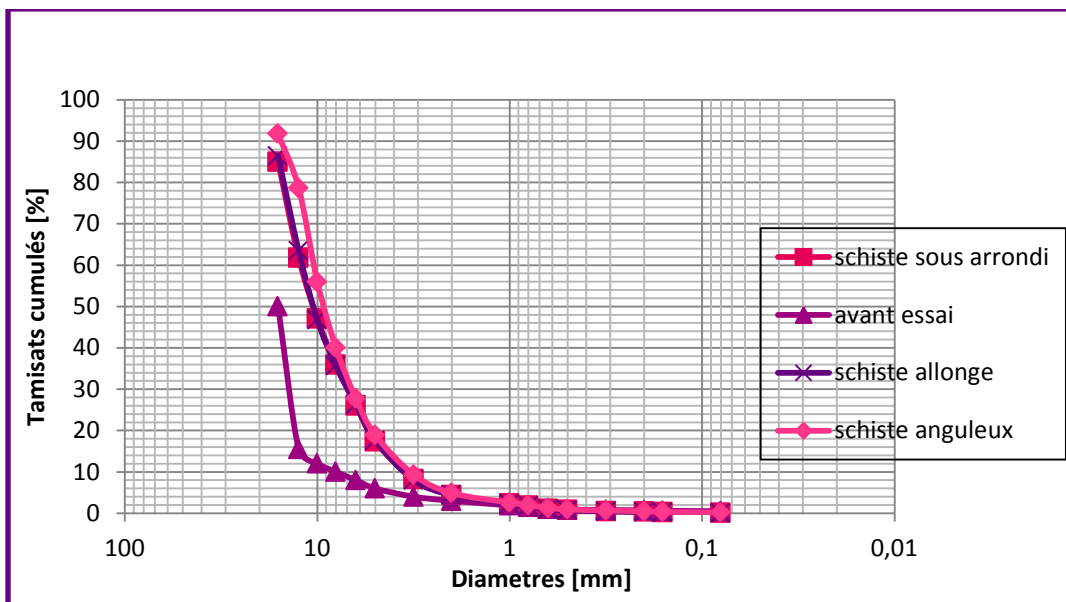


Figure IV-40 : Comparaison des courbes granulométriques des 3 formes de schiste obtenues avant et après essai.

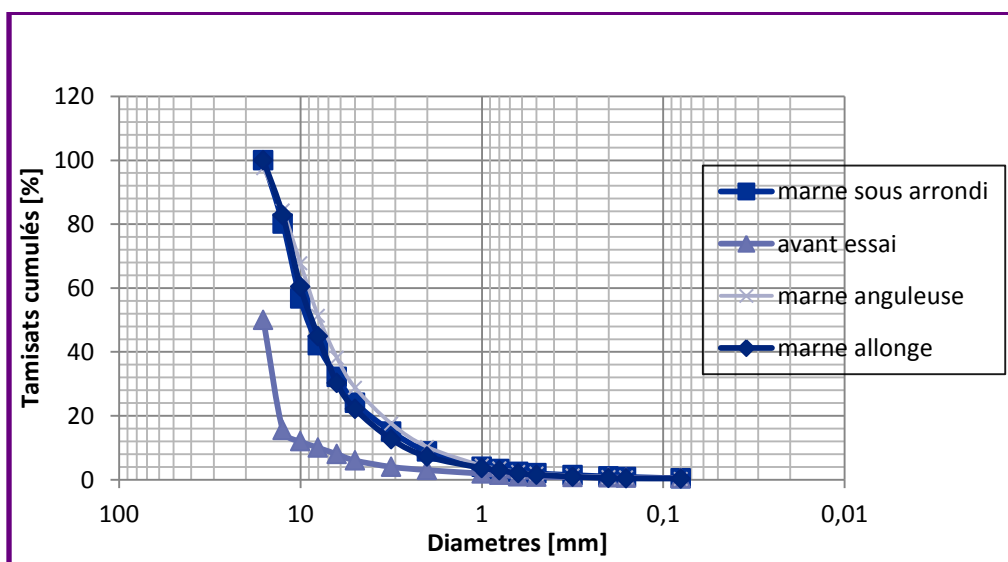


Figure IV-41: Comparaison des courbes granulométriques des 3 formes de la marne obtenues avant et après essai.

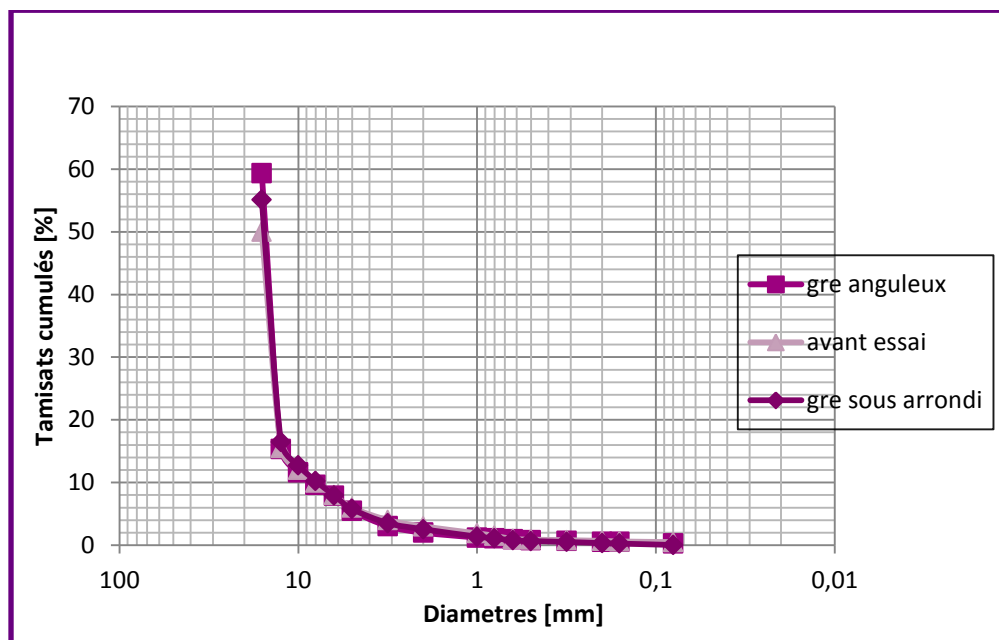


Figure IV-42 : Comparaison des courbes granulométriques des 3 formes du gré obtenues avant et après essai.

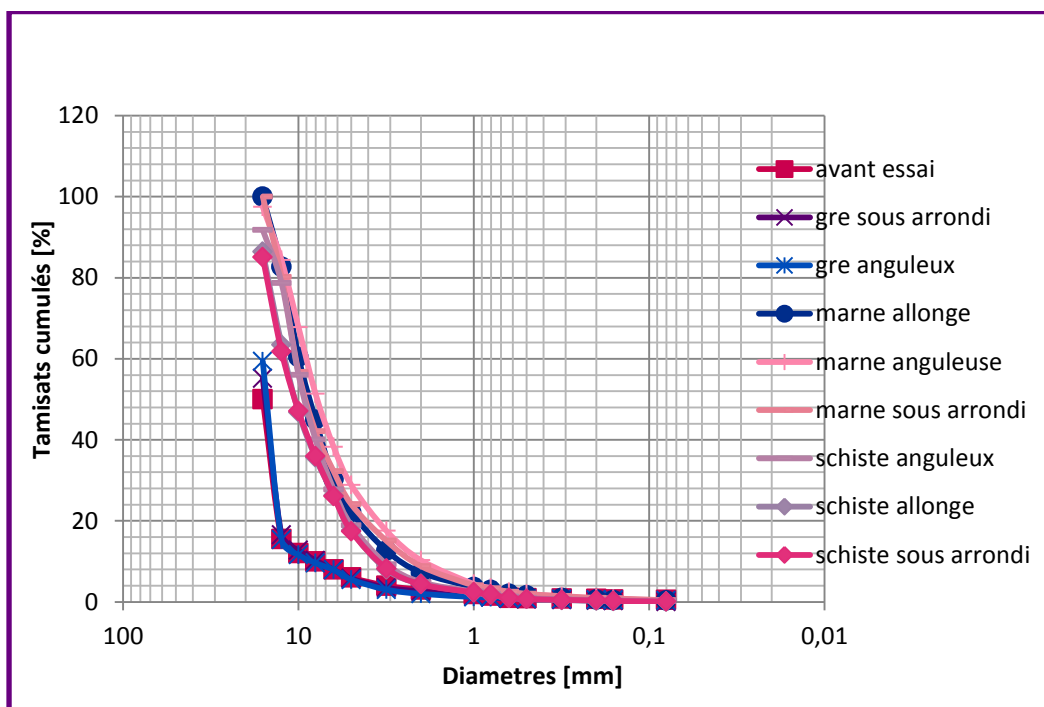


Figure IV-43: Comparaison des courbes granulométriques des 3 formes des 4 matériaux obtenues avant et après essai.

***Interprétation des résultats**

Les principaux résultats obtenus sont interprétés comme suit :

La courbe initiale avant essai présente une granulométrie serrée. Après essai, on constate que les courbes granulométriques obtenues sont étalées. dans le cas du schiste et marne, l'étalement semble être presque confondu (fig IV-40,fig IV-41). Une granulométrie serrée et presque confondu avec la courbe initiale a été obtenue dans le cas des 2 formes du gré avec moins de production de fine (fig IV-42). Le matériau le plus dégradé dans cet essai est la marne qui présente une granulométrie plus étalée par rapport au schiste et au gré et qui a produit plus de particules fines lors de l'essai (figIV-43).

Les formes anguleuse et sous arrondie du schiste sont les formes qui ont eu plus de diminution de dimension fractale ; ce qui explique qu'il a eu rupture des aspérités au niveau des grains contrairement à la forme allongée qui a eu qu'une petite diminution de la dimension fractale. Dans la marne et le gré, c'est la forme anguleuse qui a diminué le plus. La dimension fractale a augmenté après l'essai dans le cas de la pegmatite, cela montre que l'irrégularité superficielle des grains a augmenté.

Le coefficient de corrélation dans tous les matériaux étudiés varie de 0,93 à 0.99. R^2 est supérieur à 0,9, nous pouvons considéré que nous avons obtenus de bonnes corrélations.

L'essai gel/dégel a eu une diminution de la dimension fractale après essai pour tous les types de matériaux ; ce qui prouve qu'il y`a eu rupture des aspérités au niveau des grains (tableau IV-33).

IV-7-2) Essai d`altérabilité

L`essai a été appliqué selon le programme imposé (voire chapitre II)

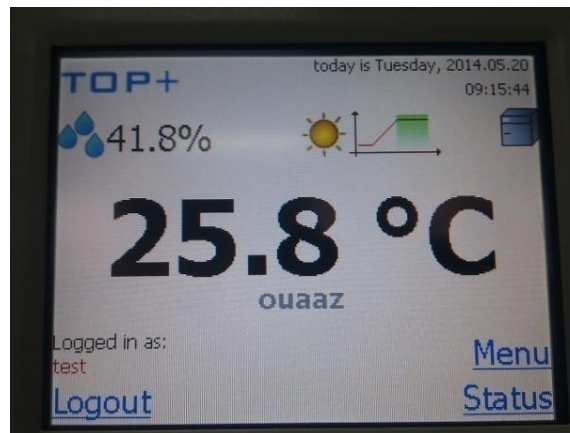
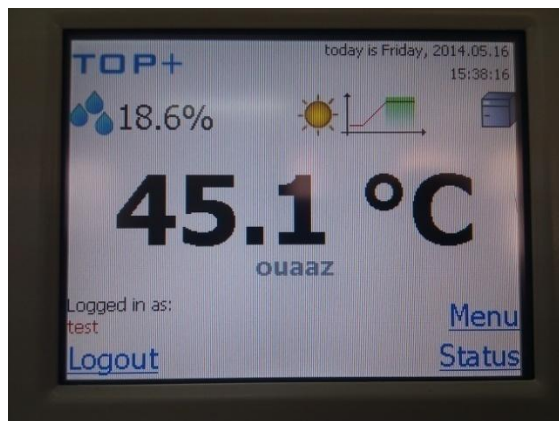


Figure IV-44: L`enceinte climatique a 45°C

figure IV-45 : L`enceinte climatique a 25°C

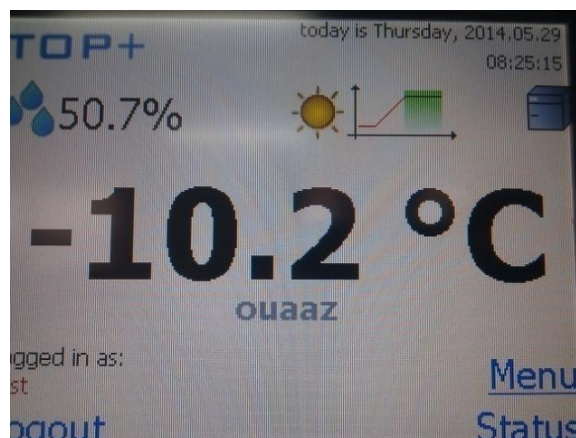
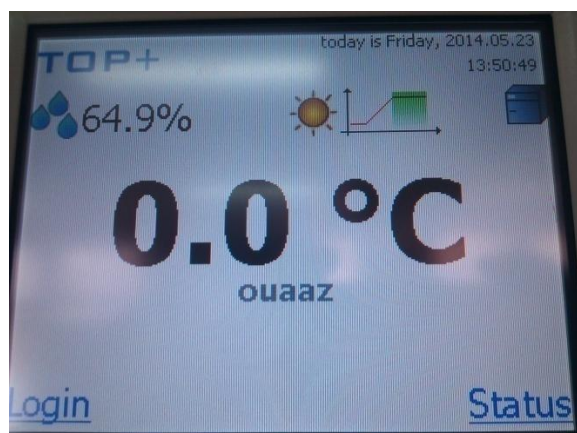


Figure IV-46 : L`enceinte climatique a 0°C

figure IV-47 : L`enceinte climatique a -10°C

L`analyse granulométrique et le calcul des dimensions fractales par la méthode des masse après essai de la fraction granulaire 0/16 pour les 3 forme des 4 matériaux a donnée les résultats suivants :

Tableau IV-14: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 des grains de schiste de forme sous-arrondie après essai.

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
16	47.724	47.724	242.412	83.551	01.00	00.835
12.5	47.724	95.448	194.688	67.102	00.781	00.671
10	57.208	152.656	137.480	47.384	00.625	00.474
8	31.849	184.505	105.631	36.407	00.500	00.364
6.3	38.838	223.343	66.793	23.021	00.394	00.230
5	22.364	245.707	44.429	15.313	00.312	00.153
3.15	22.364	268.071	22.065	07.605	00.197	00.076
2	09.385	277.456	12.680	04.370	00.125	00.044
1	05.691	283.147	06.989	02.408	00.062	00.024
0.8	01.897	285.044	05.092	01.755	00.050	00.017
0.63	01.597	286.641	03.495	01.205	0.039375	00.012
0.5	00.599	287.240	02.896	00.998	00.031	00.009
0.315	00.599	287.839	02.297	00.792	00.019	00.007
0.2	00.599	288.438	01.698	00.585	00.012	00.006
0.16	00.300	288.738	01.398	00.482	00.010	00.005
0.08	00.599	289.337	00.799	00.275	00.005	00.003
0	00.799	290.136	00.00	00.00	00.00	00.00

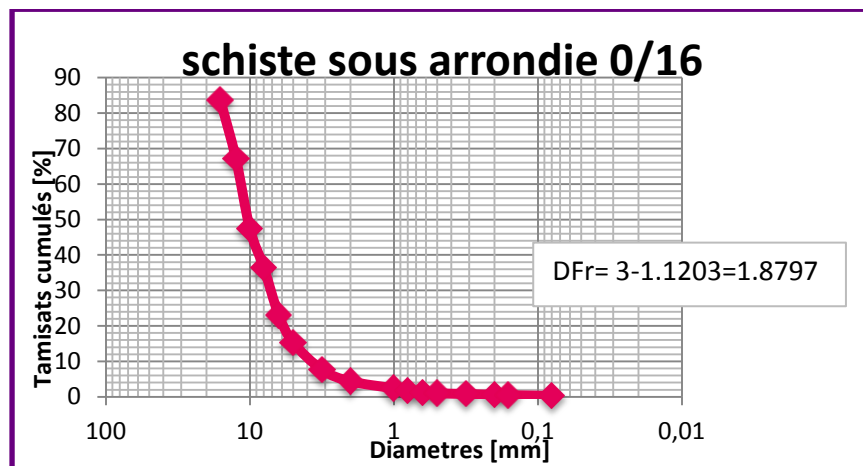


Figure IV-48 : Courbe granulométrique des grains de schiste de forme sous arrondie après essai d`altérabilité.

Tableau IV-15: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 des grains de schiste de forme allongée après essai

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
16	62.400	62.400	227.734	78.493	01.00	00.785
12.5	86.262	148.662	141.472	48.761	00.781	00.488
10	28.554	177.216	112.918	38.919	00.625	00.389
8	42.432	219.648	70.486	24.294	00.500	00.243
6.3	26.458	246.106	44.028	15.175	00.394	00.152
5	09.784	255.890	34.244	11.803	00.312	00.118
3.15	16.074	271.964	18.170	06.263	00.197	00.063
2	07.288	279.252	10.882	03.751	00.125	00.037
1	04.393	283.645	06.489	02.236	00.062	00.022
0.8	01.597	285.242	04.892	01.686	00.050	00.017
0.63	01.697	286.939	03.195	01.101	00.039	00.011
0.5	00.699	287.638	02.496	00.860	00.031	00.008
0.315	00.599	288.237	01.897	00.653	00.019	00.006
0.2	00.599	288.836	01.298	00.447	00.012	00.004
0.16	00.300	289.136	00.998	00.344	00.010	00.003
0.08	00.499	289.635	00.499	00.172	00.005	0.002
0	00.499	290.134	00.00	00.00	00.00	00.00

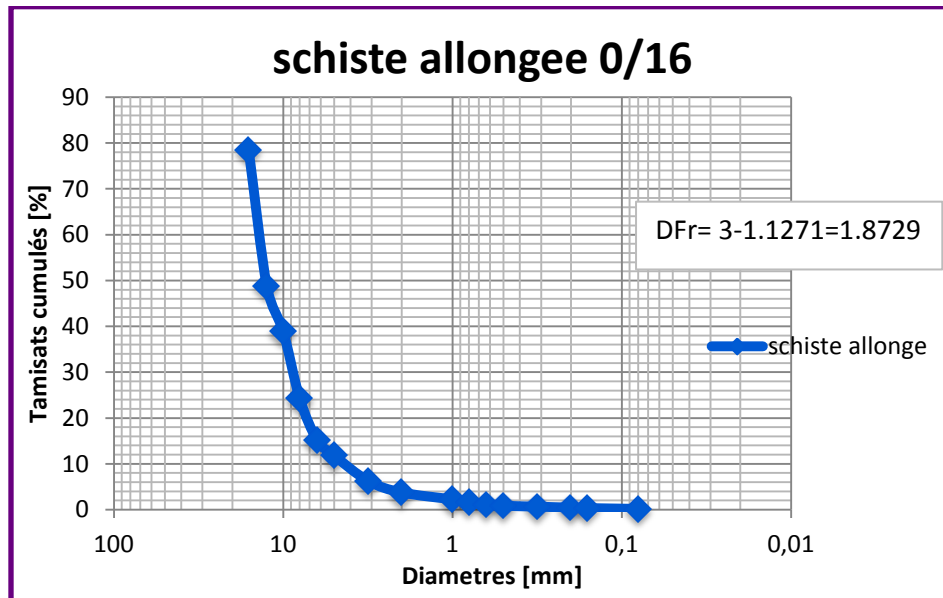


Figure IV-49 : Courbe granulométrique des grains de schiste de forme allongée après essai d'altérabilité.

Tableau IV-16: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 des grains de schiste de forme anguleuse après essai.

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
16	26.258	26.258	264.178	90.959	01.00	00.909
12.5	66.394	92.652	197.784	68.099	00.781	00.681
10	47.324	139.976	150.460	51.805	00.625	00.518
8	32.548	172.524	117.912	40.598	00.500	00.406
6.3	41.134	213.658	76.778	26.435	00.394	00.264
5	30.252	243.910	46.526	16.019	00.312	00.160
3.15	22.963	266.873	23.563	08.113	00.197	00.081
2	11.182	278.055	12.381	04.263	00.125	00.043
1	05.192	283.247	07.189	02.475	00.062	00.025
0.8	01.597	284.844	05.592	01.925	00.050	00.019
0.63	01.797	286.641	03.795	01.306	00.039	00.013
0.5	00.699	287.340	03.096	01.066	00.031	00.011
0.315	00.799	288.139	02.297	00.791	00.019	00.008
0.2	00.599	288.738	01.698	00.585	00.012	00.006
0.16	00.300	289.038	01.398	00.481	00.010	00.005
0.08	00.699	289.737	00.699	00.240	00.005	00.002
0	00.699	290.436	00.00	00.00	00.00	00.00

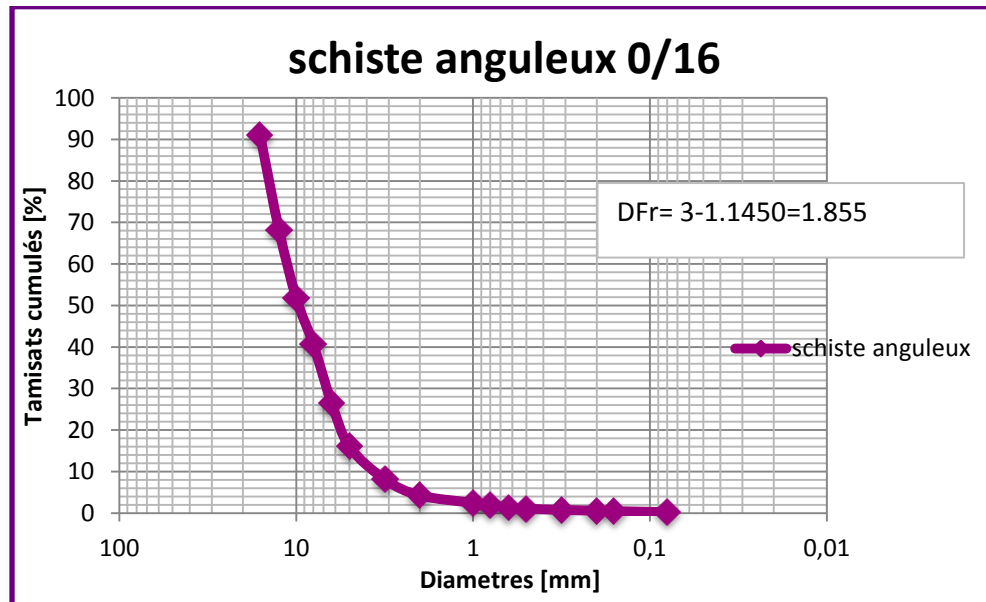


Figure IV-50 : Courbe granulométrique des grains de schiste de forme anguleuse après essai d'altérabilité.

Tableau IV-17: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 de la marne sous arrondie après essai

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
16	60.104	60.104	238.020	79.839	01.00	00.798
12.5	122.404	182.508	115.616	38.781	00.781	00.388
10	46.925	229.433	68.691	23.041	00.625	00.230
8	22.264	251.697	46.427	15.573	00.500	00.156
6.3	11.282	262.979	35.145	11.788	00.394	00.118
5	07.688	270.667	27.457	09.209	00.312	00.092
3.15	11.382	282.049	16.075	05.392	00.197	00.054
2	04.692	286.741	11.383	03.818	00.125	00.038
1	03.395	290.136	07.988	02.679	00.062	00.027
0.8	01.797	291.933	06.191	02.076	00.050	00.021
0.63	02.197	294.130	03.994	01.339	00.039	00.013
0.5	00.599	294.729	03.395	01.139	00.031	00.011
0.315	00.799	295.528	02.596	00.870	00.019	00.009
0.2	00.699	296.227	01.897	00.636	00.012	00.006
0.16	00.300	296.527	01.597	00.536	00.010	00.005
0.08	00.998	297.525	00.599	00.201	00.005	00.002
0	00.599	298.124	00.00	00.00	00.00	00.00

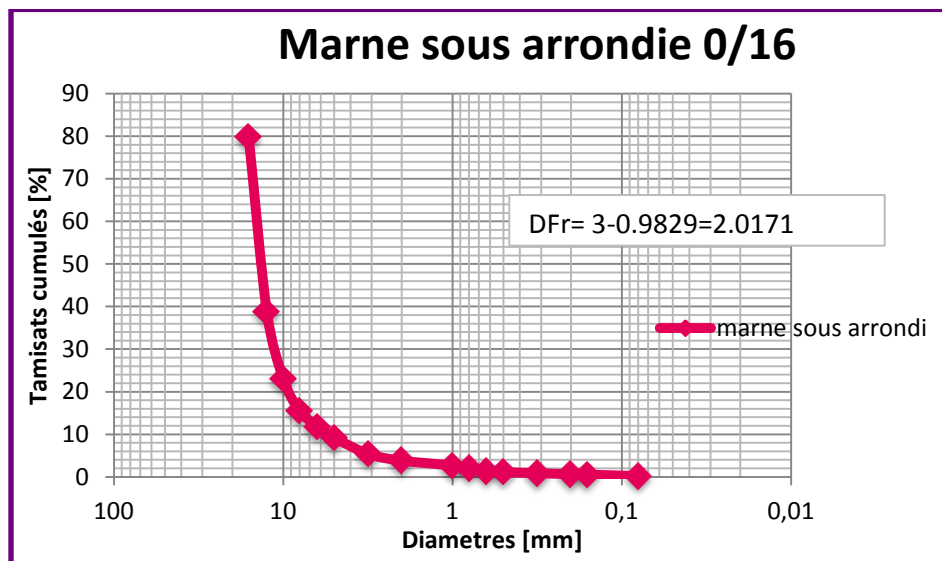


Figure IV-51: Courbe granulométrique de la marne sous arrondie après essai d`altérabilité

Tableau IV-18: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 de la marne anguleuse après essai

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
16	58.207	58.207	242.714	80.657	01.00	00.806
12.5	120.607	178.814	122.107	40.577	00.781	00.406
10	44.629	223.443	77.478	25.746	00.625	00.257
8	24.161	247.604	53.317	17.718	00.500	00.177
6.3	16.474	264.078	36.843	12.243	00.393	00.122
5	10.883	274.961	25.960	08.627	00.312	00.086
3.15	09.385	284.346	16.575	05.508	00.197	00.055
2	04.992	289.338	11.583	03.849	00.125	00.038
1	03.794	293.132	07.789	02.588	00.062	00.026
0.8	01.398	294.53	06.391	02.127	00.050	00.021
0.63	01.997	296.527	04.394	01.460	00.039	00.014
0.5	00.599	297.126	03.795	01.261	00.031	00.012
0.315	00.899	298.025	02.896	00.962	00.019	00.009
0.2	00.699	298.724	02.197	00.730	00.012	00.007
0.16	00.300	299.024	01.897	00.630	00.010	00.006
0.08	01.198	300.222	00.699	00.232	00.005	00.002
0	00.699	300.921	00.00	00.00	00.00	00.00

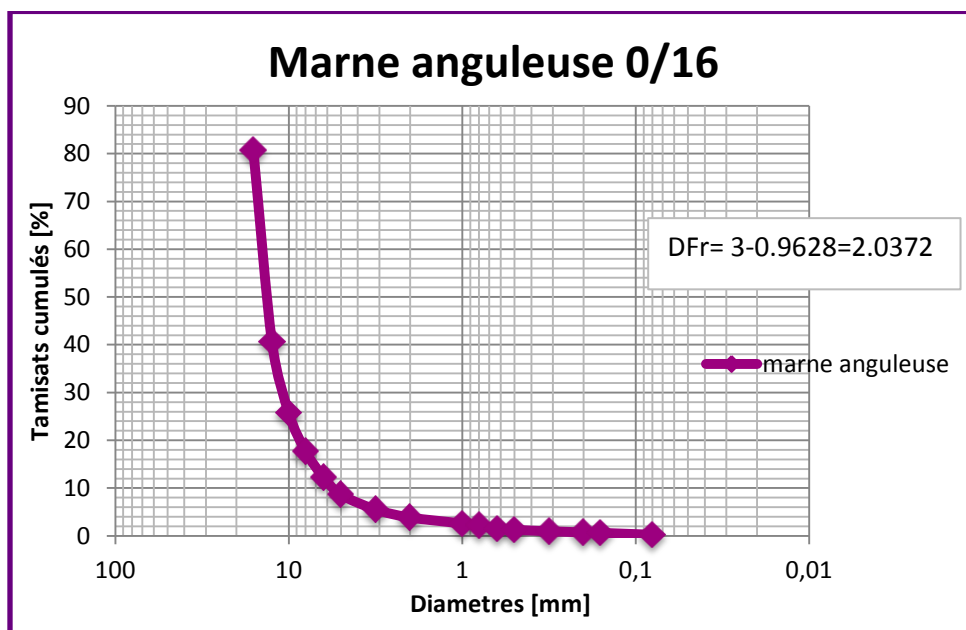


Figure IV-52: Courbe granulométrique de la marne anguleuse après essai d'altérabilité.

Tableau IV-19: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 de la marne allongée après essai

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
16	60.403	60.403	240.320	79.914	01.00	00.799
12.5	114.018	174.421	126.302	41.99	00.781	00.419
10	31.649	206.070	94.653	31.475	00.625	00.315
8	28.754	234.824	65.899	21.913	00.500	00.219
6.3	24.661	259.485	41.238	13.713	00.394	00.137
5	11.482	270.967	29.756	09.895	00.312	00.099
3.15	10.184	281.151	19.572	06.508	00.196	00.065
2	06.590	287.741	12.982	04.317	00.125	00.043
1	05.092	292.833	07.890	02.623	00.062	00.026
0.8	01.498	294.331	06.392	02.125	00.050	00.021
0.63	01.797	296.128	04.595	01.528	00.039	00.015
0.5	00.699	296.827	03.896	01.295	00.031	00.013
0.315	00.999	297.826	02.897	00.963	00.019	00.009
0.2	00.799	298.625	02.098	00.698	00.012	00.007
0.16	00.300	298.925	01.798	00.598	00.010	00.006
0.08	00.899	299.824	00.899	00.298	00.005	0.003
0	00.899	300.723	00.00	00.00	00.00	00.00

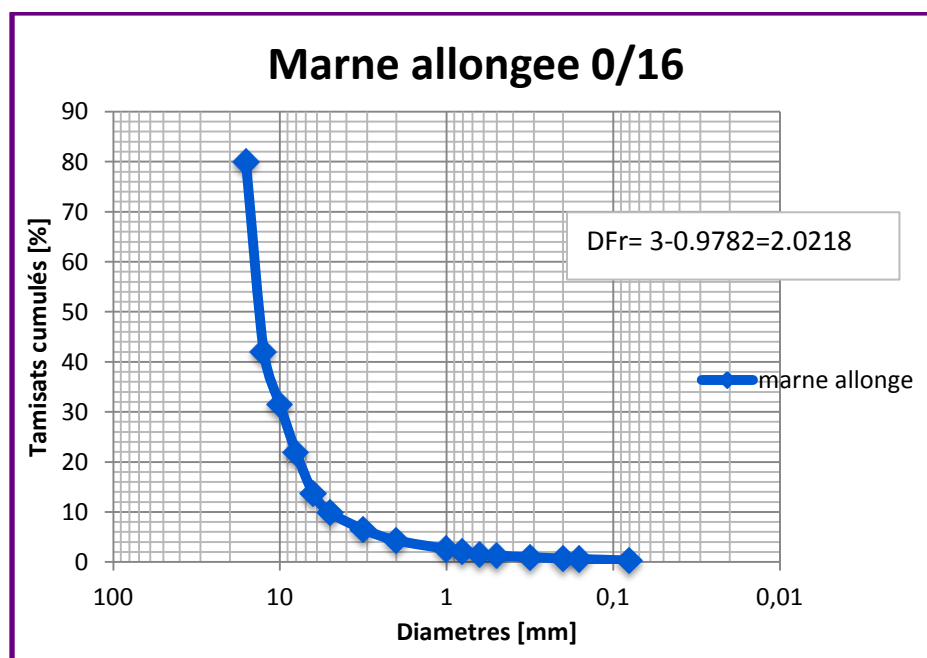


Figure IV-53 : Courbe granulométrique de la marne allongée après essai d`altérabilité.

Tableau IV-20: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 dues grains de gré de forme anguleuse après essai

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
16	128.594	128.594	142.574	52.577	01.00	00.526
12.5	98.243	226.837	44.331	16.348	00.781	00.163
10	12.780	239.617	31.551	11.635	00.625	00.116
8	04.093	243.71	27.458	10.126	00.500	00.101
6.3	04.892	248.602	22.566	08.322	00.394	00.083
5	06.390	254.992	16.176	05.965	00.312	00.059
3.15	05.391	260.383	10.785	03.977	00.197	00.039
2	03.495	263.878	07.290	02.688	00.125	00.027
1	02.396	266.274	04.894	01.805	00.062	00.018
0.8	00.300	266.574	04.594	01.694	00.050	00.017
0.63	01.098	267.672	03.496	01.289	00.039	00.012
0.5	00.200	267.872	03.296	01.215	00.031	00.012
0.315	00.300	268.172	02.996	01.105	00.019	00.011
0.2	00.499	268.671	02.497	00.921	00.012	00.009
0.16	00.300	268.971	02.197	00.810	00.010	00.008
0.08	01.398	270.369	00.799	00.295	00.005	00.003
0	00.799	271.168	00.00	00.00	00.00	00.00

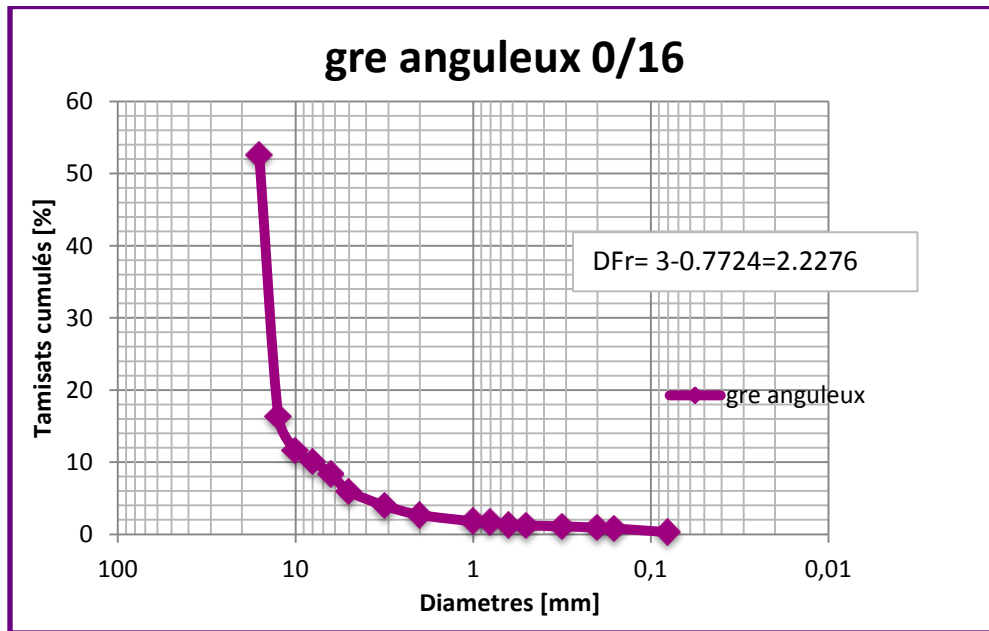


Figure IV-54 : Courbe granulométrique des grains de gré anguleux après essai d'altérabilité.

Tableau IV-21: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 des grains de gré de forme sous arrondie après essai

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
16	142.871	142.871	127.696	47.196	01.00	00.472
12.5	85.763	228.634	41.933	15.498	00.781	00.155
10	09.585	238.219	32.348	11.956	00.625	00.119
8	04.393	242.612	27.955	10.332	00.500	00.103
6.3	06.090	248.702	21.865	08.081	00.394	00.081
5	05.891	254.593	15.974	05.904	00.312	00.059
3.15	04.792	259.385	11.182	04.133	00.197	00.041
2	04.293	263.678	06.889	02.546	00.125	00.025
1	02.196	265.874	04.693	01.734	00.062	00.017
0.8	00.100	265.974	04.593	01.697	00.050	00.017
0.63	01.098	267.072	03.495	01.292	00.039	00.013
0.5	00.300	267.372	03.195	01.181	00.031	00.012
0.315	00.499	267.871	02.696	00.996	00.019	00.009
0.2	00.599	268.470	02.097	00.775	00.012	00.007
0.16	00.300	268.770	01.797	00.664	00.010	00.006
0.08	01.098	269.868	00.699	00.258	00.005	00.002
0	00.699	270.567	00.00	00.00	00.00	00.00

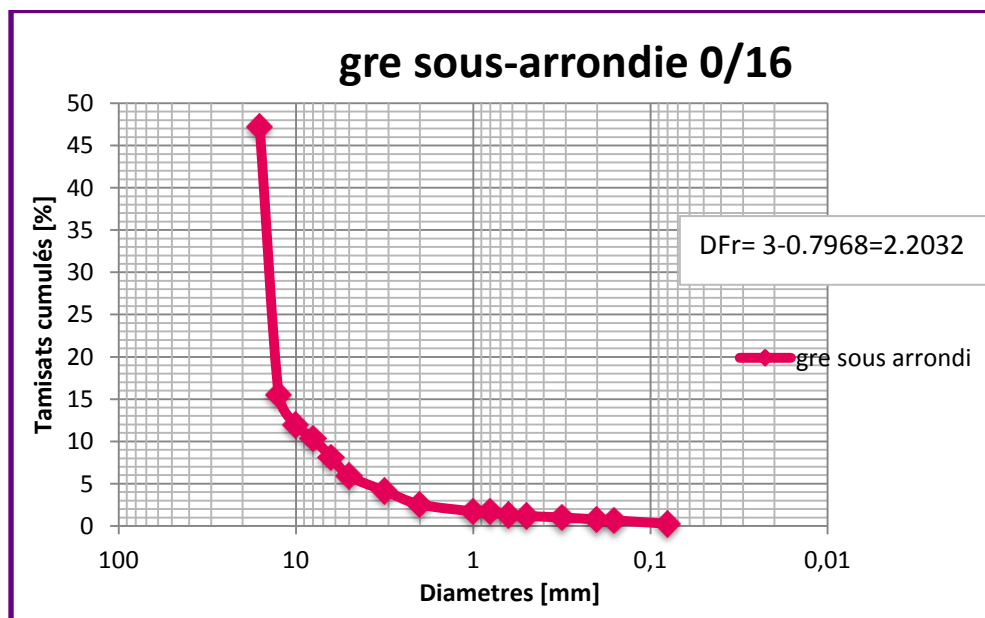


Figure IV-55 : Courbe granulométrique des grains de gré de forme sous arrondie après essai d'altérabilité.

Tableau IV-22: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/16 des grains de pegmatite après essai

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
10	10.783	10.783	38.240	78.004	01.00	00.780
8	05.292	16.075	32.948	67.209	00.800	00.672
6.3	07.388	23.463	25.560	52.139	00.630	00.521
5	05.591	29.054	19.969	40.734	00.500	00.407
3.15	06.290	35.344	13.679	27.903	00.315	00.279
2	03.195	38.539	10.484	21.386	00.200	00.214
1	03.395	41.934	07.089	14.460	00.100	00.145
0.8	00.100	42.034	06.989	14.256	00.080	00.142
0.63	02.396	44.430	04.593	09.369	00.063	00.094
0.5	01.098	45.528	03.495	07.129	00.050	00.071
0.315	00.699	46.227	02.796	05.703	00.031	00.057
0.2	00.599	46.826	02.197	04.481	00.021	00.045
0.16	00.300	47.126	01.897	03.869	00.016	00.039
0.08	00.699	47.825	01.198	02.444	00.008	00.024
0	01.198	49.023	00.00	00.00	00.00	00.00

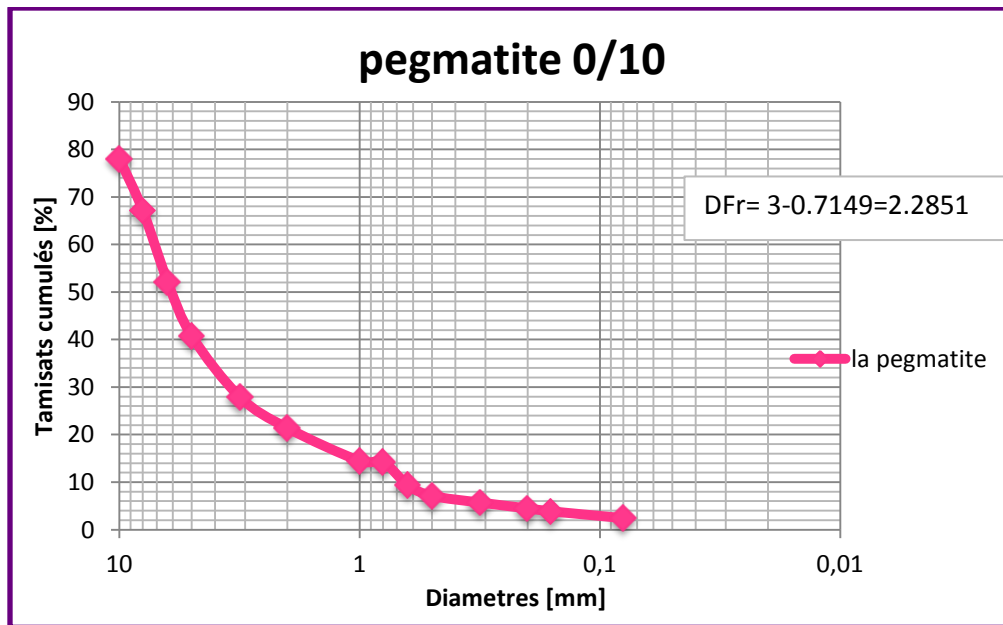


Figure IV-56 : Courbe granulométrique des grains de pegmatite après essai d'altérabilité.

Résultats

Les résultats observée d'essai altérabilité des 4 matériaux sous les différentes formes sont représentés ci-dessous :

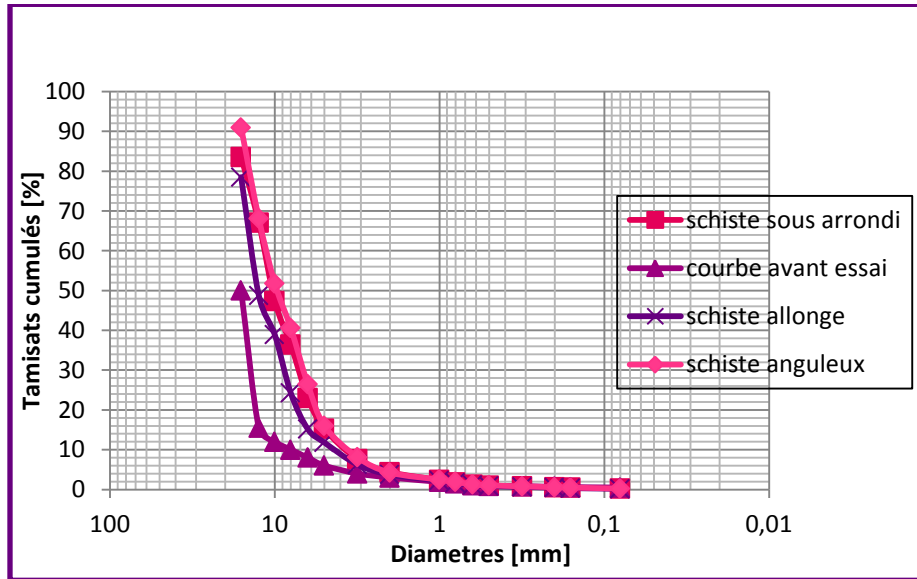


Figure IV-57 : Comparaison des courbes granulométriques des 3 formes du schiste obtenues avant et après essai.

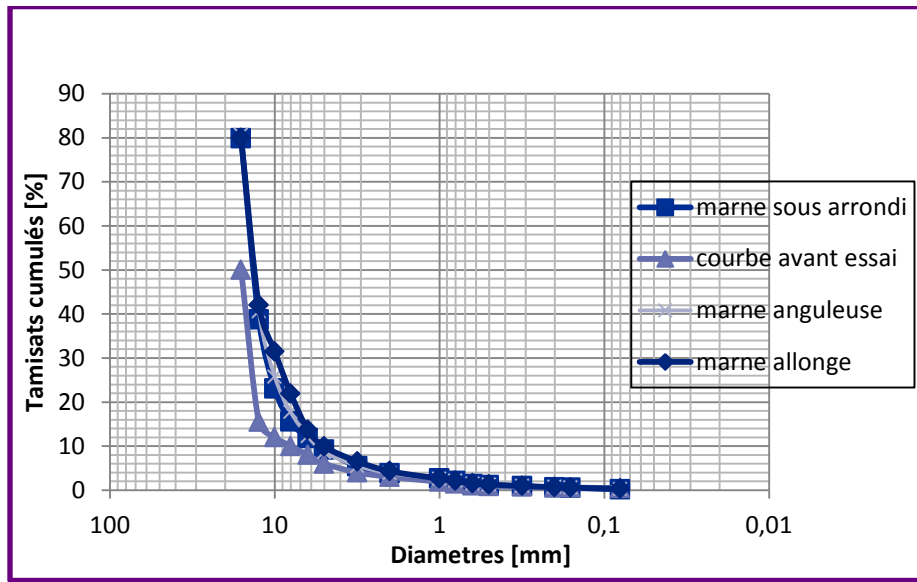


Figure IV-58: Comparaison des courbes granulométriques des 3 formes de la marne obtenues avant et après essai.

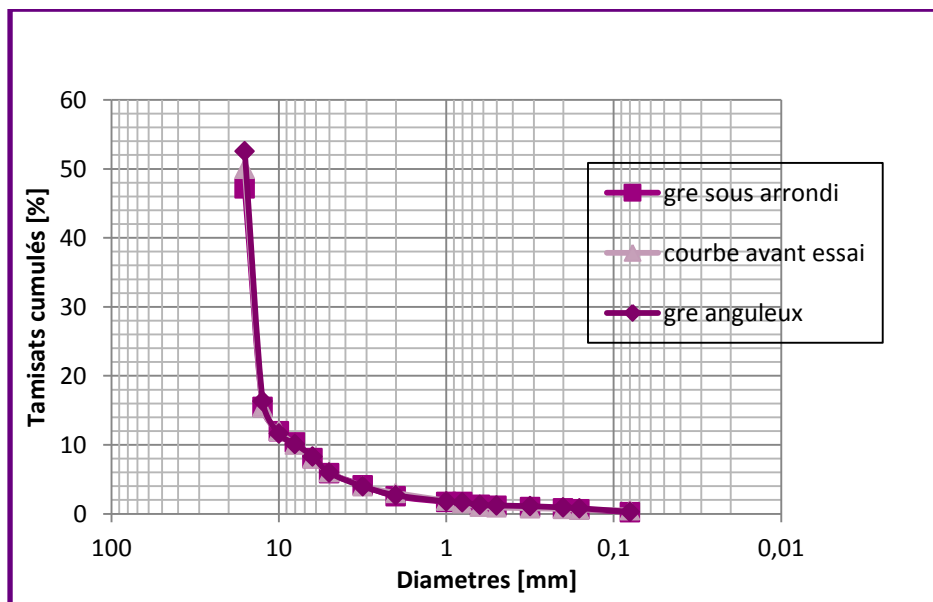


Figure IV-59 : Comparaison des courbes granulométriques des 3 formes du gré obtenues avant et après essai.

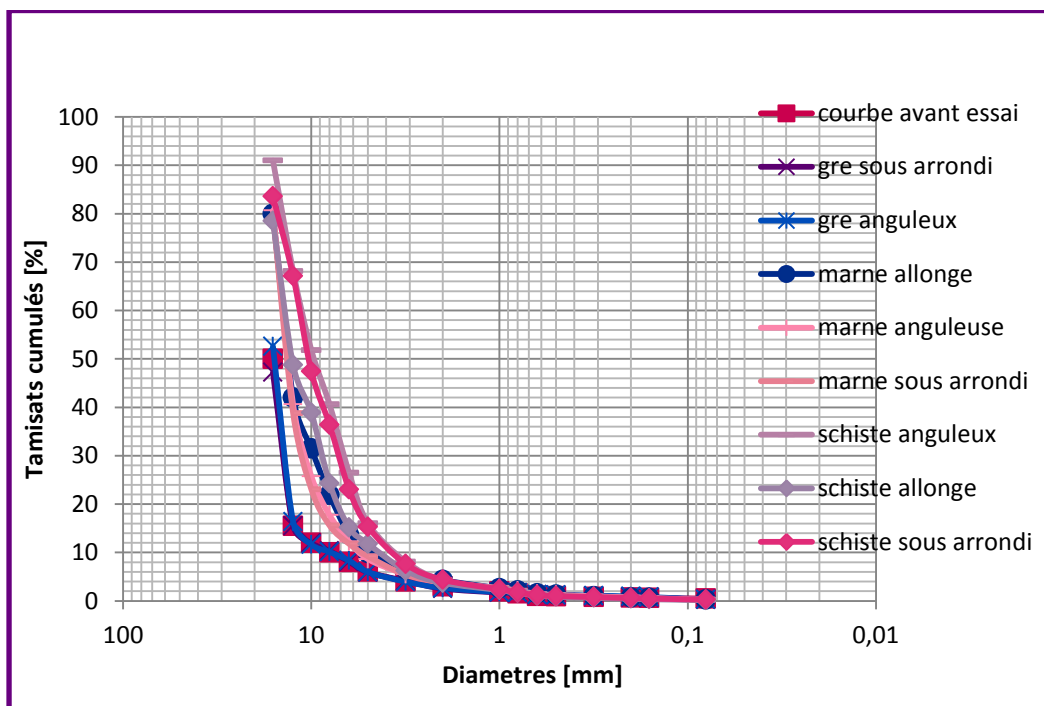


Figure IV-60 : Comparaison des courbes granulométriques des 3 formes des 4 matériaux obtenues avant et après essai.

***interprétation des résultats d`essai**

Les courbes granulométriques après essai présentent une granulométrie plus étalée que la courbe initiale dans le cas de la marne et le schiste avec une augmentation du pourcentage de fine, contrairement au gré et pegmatite ou les courbes présentent une granulométrie serrée et presque confondue à la courbe initiale avec un faible pourcentage de fine (fig IV-57,figIV-58,figIV-59).

Les courbe les plus étalées et qui présentent le plus grand pourcentage de fine sont celles du schiste sous les 3 formes (figIV-60). C`est donc le matériau le plus dégradé pour cet essai. Dans le cas de la marne, la forme la plus défavorable est la forme allongée ou on remarque qu`elle présente la courbe la plus étalée et un pourcentage de fine plus élevée par rapport aux autres formes (fig IV-58).

Dans le cas du schiste, la forme la plus défavorable est la forme anguleuse vue qu`elle présente la courbe la plus étalée et plus de fine (fig IV-57). La forme anguleuse du schiste est la forme qui a eu plus de diminution de dimension fractale ; ce qui veut dire qu`il y`a eu rupture des aspérités des grains et qui confirme que c`est la forme la plus dégradé, contrairement à la marne où la forme n`a pas influé beaucoup sur les résultats de la dimension fractale. La dimension fractale des grains de gré a augmenté légèrement ce qui montre que la rugosité des grains est devenue plus importante.

Le coefficient de corrélation dans tous les matériaux étudiés varie de 0,93 à 0.99. Il est donc supérieur à 0,9, on peut donc considérer que nous avons obtenu de bonnes corrélations.

IV-7-3) Essai de dégradabilité (norme NF P94-067)

L'essai a été appliqué selon la norme NFP94-067, les résultats observés sont représentés dans les figures ci-dessous :



Figure IV-61: Mouillage



figure IV-62 : Séchage



Figure IV-63: La marne après essai



figure IV-64: Le schiste après essai



Figure IV-65: Le gré après essai

IV-7-3-a) courbes granulométriques et dimension fractales

L`analyse granulométrique de la fraction granulaire 10/20 pour tout les matériaux avant et après essai a donné les résultats suivants :

Tableau IV-23 : Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 10/20 des matériaux avant essai.

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
20	700	700	1300	65	1	0.65
16	690	1390	610	30.5	0.8	0.305
12.5	70	1460	540	27	0.625	0.27
10	540	2000	0	0	0.5	0

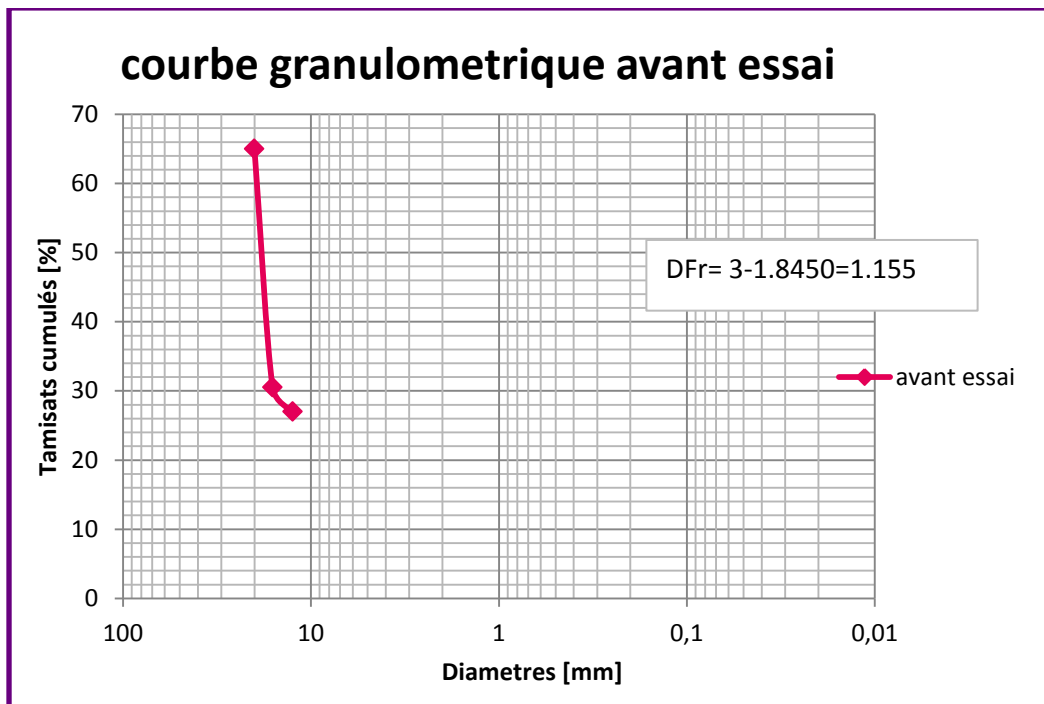


Figure IV-66: Courbe granulométrique avant essai.

Tableau IV-24: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/20 des grains de schiste de forme sous arrondie après essai

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
20	45.228	45.228	1926.618	97.706	01.00	00.977
16	160.244	205.472	1766.374	89.579	00.800	00.896
12.5	232.228	437.700	1534.146	77.802	00.625	00.778
10	433.307	871.007	1100.839	55.828	00.500	00.558
8	321.785	1192.792	779.054	39.509	00.400	00.395
6.3	274.561	1467.353	504.493	25.585	00.315	00.256
5	170.028	1637.381	334.465	16.962	00.250	00.169
3.15	209.864	1847.245	124.601	06.319	00.157	00.063
2	81.470	1928.715	43.131	02.187	00.100	00.022
1	29.952	1958.667	13.179	00.668	00.050	00.007
0.8	02.197	1960.864	10.982	00.557	00.040	00.005
0.63	02.396	1963.260	08.586	00.435	00.031	00.004
0.5	01.597	1964.857	06.989	00.354	00.025	00.003
0.315	02.196	1967.053	04.793	00.243	00.016	0.0024
0.2	01.298	1968.351	03.495	00.177	00.010	0.0017
0.16	00.599	1968.950	02.896	00.147	00.008	0.0014
0.08	01.398	1970.348	01.498	00.076	00.004	0.0007
0	01.498	1971.846	00.00	00.00	00.00	00.00

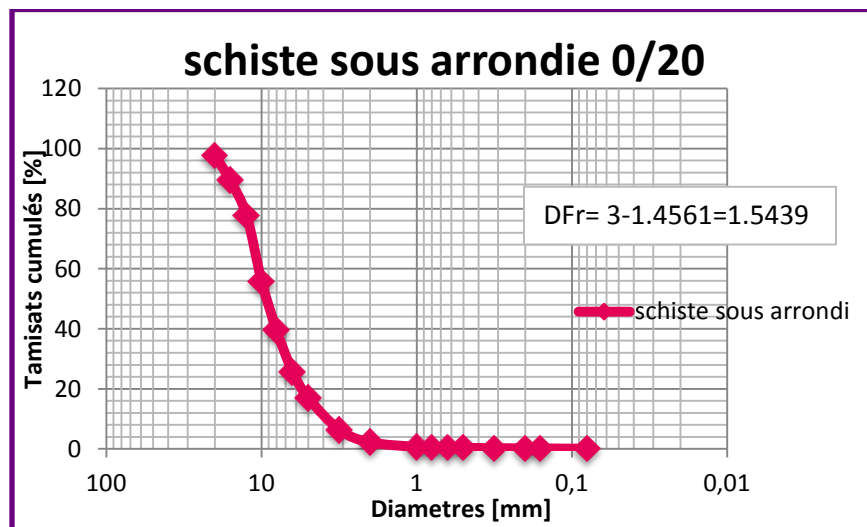


Figure IV-67: Courbe granulométrique des grains de schiste de forme sous arrondie après essai de dégradabilité.

Tableau IV-25: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/20 des grains de schiste de forme allongée après essai.

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
20	00.00	0	1972.943	100	01.00	01.00
16	151.757	151.757	1821.186	92.308	00.800	00.923
12.5	189.896	341.653	1631.290	82.683	00.625	00.827
10	379.593	721.246	1251.697	63.443	00.500	00.634
8	328.275	1049.521	923.422	46.804	00.400	00.468
6.3	281.050	1330.571	642.372	32.559	00.315	00.326
5	231.430	1562.001	410.942	20.829	00.250	00.208
3.15	255.891	1817.892	155.051	07.859	00.157	00.078
2	105.431	1923.323	49.620	02.515	00.100	00.025
1	37.240	1960.563	12.380	00.627	00.050	00.006
0.8	02.995	1963.558	09.385	00.476	00.040	00.005
0.63	02.396	1965.954	06.989	00.354	00.031	00.003
0.5	01.398	1967.352	05.591	00.283	00.025	0.0028
0.315	01.897	1969.249	03.694	00.187	00.016	0.0018
0.2	01.198	1970.447	02.496	00.126	00.010	0.0012
0.16	00.599	1971.046	01.897	00.096	00.008	0.0009
0.08	01.098	1972.144	00.799	00.040	00.004	0.0004
0	00.799	1972.943	00.00	00.00	00.00	00.00

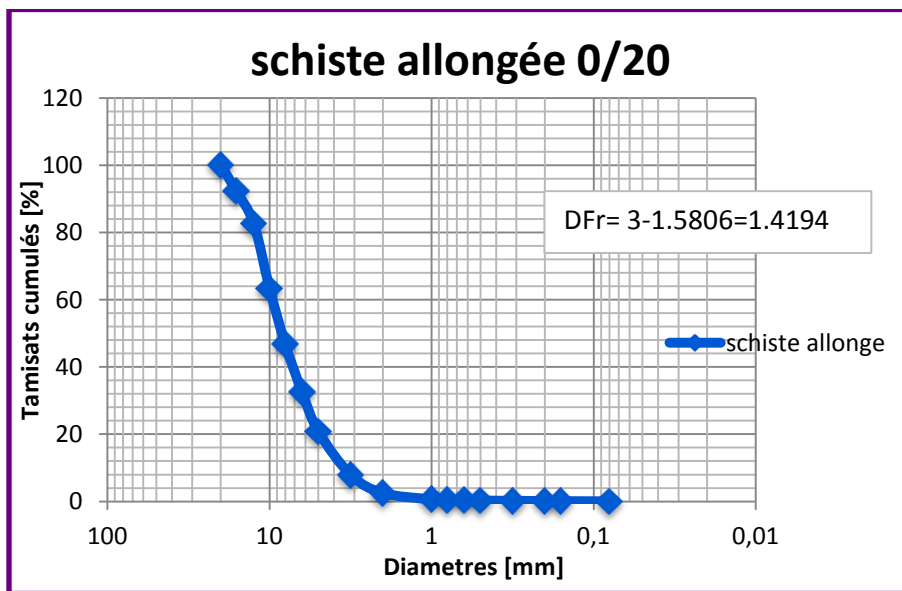


Figure IV-68: Courbe granulométrique des grains de schiste de forme allongée après essai de dégradabilité.

Tableau IV-26: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/20 des grains de schiste de forme anguleuse après essai.

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
20	25.359	25.359	1945.886	98.713	01.00	00.987
16	144.968	170.327	1800.918	91.359	00.800	00.913
12.5	201.777	372.104	1599.141	81.123	00.625	00.811
10	246.905	619.009	1352.236	68.598	00.500	00.686
8	396.865	1015.874	955.371	48.465	00.400	00.485
6.3	325.379	1341.253	629.992	31.959	00.315	00.319
5	214.457	1555.710	415.535	21.079	00.250	00.216
3.15	258.587	1814.297	156.948	07.962	00.157	00.080
2	105.731	1920.028	51.217	02.598	00.100	00.026
1	36.142	1956.170	15.075	00.765	00.050	00.007
0.8	03.095	1959.265	11.980	00.608	00.040	00.006
0.63	02.796	1962.061	09.184	00.466	00.031	0.0046
0.5	01.797	1963.858	07.387	00.375	00.025	0.0037
0.315	02.396	1966.254	04.991	00.253	00.016	0.0025
0.2	01.597	1967.851	03.394	00.172	00.010	0.0017
0.16	00.599	1968.450	02.795	00.142	00.008	0.0014
0.08	01.597	1970.047	01.198	00.061	00.004	0.0006
0	01.198	1971.245	00.00	00.00	00.00	00.00

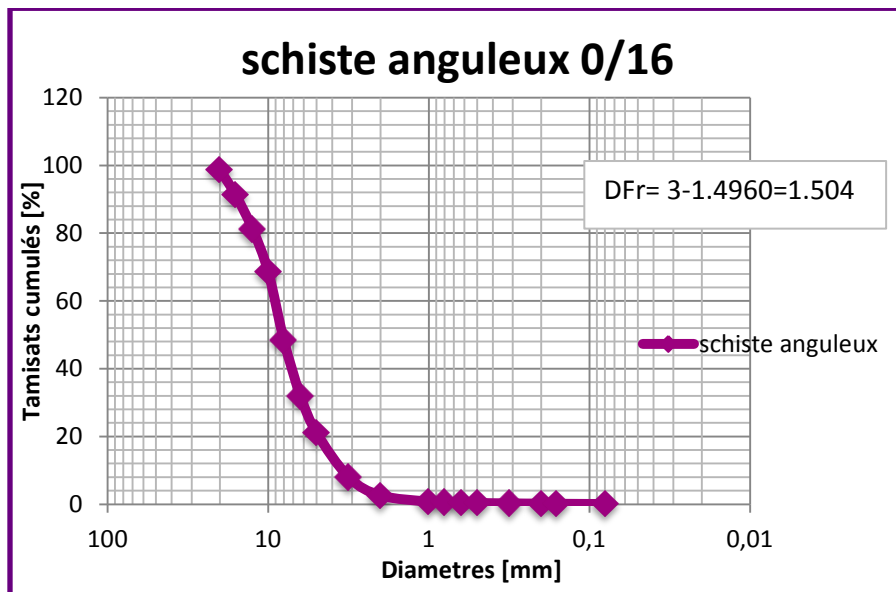


Figure IV-69 : Courbe granulométrique des grains de schiste de forme anguleuse après essai de dégradabilité.

Tableau IV-27: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/20 de la marne de forme sous arrondie après essai.

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
20	180.212	180.212	1804.113	90.918	01.00	00.909
16	209.265	389.477	1594.848	80.372	00.800	00.804
12.5	352.336	741.813	1242.512	62.616	00.625	00.626
10	555.312	1297.125	687.200	34.631	00.500	00.346
8	289.138	1586.263	398.062	20.060	00.400	00.201
6.3	178.115	1764.378	219.947	11.084	00.315	00.111
5	79.573	1843.951	140.374	07.074	00.250	00.071
3.15	55.412	1899.363	84.962	04.282	00.157	00.043
2	18.470	1917.833	66.492	03.351	00.100	00.033
1	29.852	1947.685	36.640	01.846	00.050	00.018
0.8	07.987	1955.672	28.653	01.444	00.040	00.014
0.63	06.889	1962.561	21.764	01.097	00.031	00.011
0.5	04.093	1966.654	17.671	00.890	00.025	00.009
0.315	05.391	1972.045	12.280	00.619	00.015	00.006
0.2	03.394	1975.439	08.886	00.448	00.010	00.004
0.16	01.298	1976.737	07.588	00.382	00.008	00.003
0.08	04.193	1980.930	03.395	00.171	00.004	00.001
0	03.395	1984.325	00.00	00.00	00.00	00.00

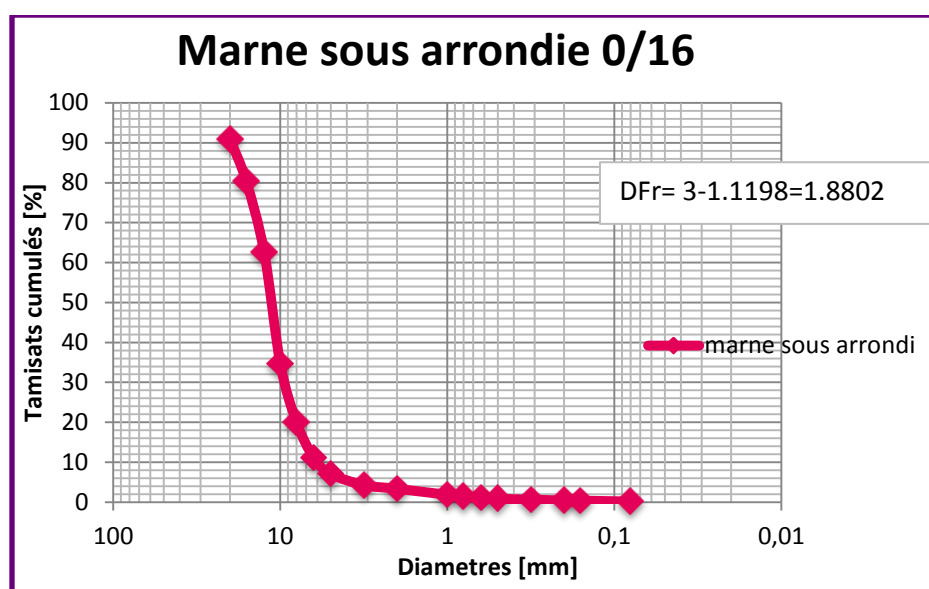


Figure IV-70 : Courbe granulométrique de la marne de forme sous arrondie après essai de dégradabilité.

Tableau IV-28: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/20 de la marne de forme allongée après essai.

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
20	212.460	212.460	1782.948	89.352	01.00	00.893
16	245.008	457.468	1537.940	77.074	00.80	00.771
12.5	327.376	784.844	1210.564	60.667	00.625	00.606
10	495.208	1280.052	715.356	35.850	00.500	00.358
8	305.212	1585.264	410.144	20.554	00.400	00.205
6.3	159.046	1744.310	251.098	12.584	00.315	00.126
5	58.606	1802.916	192.492	09.647	00.250	00.096
3.15	51.817	1854.733	140.675	07.049	00.157	00.070
2	17.472	1872.205	123.203	06.174	00.100	00.062
1	63.698	1935.903	59.505	02.982	00.050	00.029
0.8	17.871	1953.774	41.634	02.086	00.040	00.021
0.63	14.077	1967.851	27.557	01.381	00.031	00.013
0.5	07.089	1974.940	20.468	01.026	00.025	00.010
0.315	07.388	1982.328	13.080	00.655	00.016	00.006
0.2	03.994	1986.322	09.086	00.455	00.010	00.004
0.16	01.498	1987.820	07.588	00.380	00.008	0.0038
0.08	03.594	1991.414	03.994	00.200	00.004	0.0020
0	03.994	1995.408	00.00	00.00	00.00	00.00

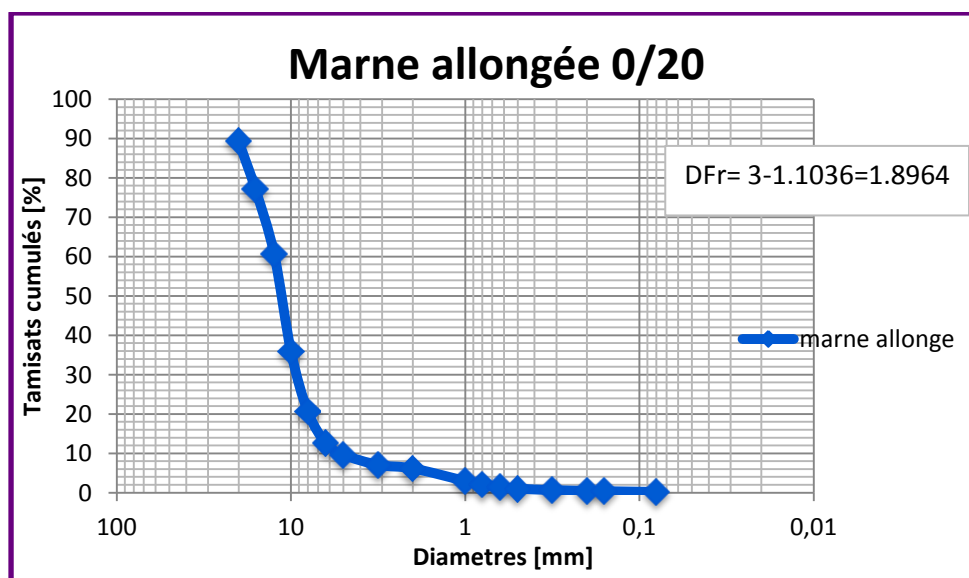


Figure IV-71: Courbe granulométrique de la marne de forme allongée après essai de dégradabilité.

Tableau IV-29: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/20 de la marne de forme anguleuse après essai.

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
20	186.002	186.002	1792.133	90.597	01.00	00.906
16	218.750	404.752	1573.383	79.538	00.800	00.795
12.5	327.875	732.627	1245.508	62.964	00.625	00.629
10	651.358	1383.985	594.150	30.036	00.500	00.300
8	242.412	1626.397	351.738	17.781	00.400	00.178
6.3	145.867	1772.264	205.871	10.407	00.315	00.104
5	58.606	1830.870	147.265	07.445	00.250	00.074
3.15	44.329	1875.199	102.936	05.204	0.157	00.052
2	17.971	1893.170	84.965	04.295	00.100	00.043
1	36.442	1929.612	48.523	02.453	00.050	00.024
0.8	10.483	1940.095	38.040	01.923	00.040	00.019
0.63	11.182	1951.277	26.858	01.357	00.031	00.0136
0.5	06.889	1958.166	19.969	01.009	00.025	00.0101
0.315	07.588	1965.754	12.381	00.626	00.015	00.006
0.2	03.994	1969.748	08.387	00.424	00.010	00.004
0.16	01.298	1971.046	07.089	00.358	00.008	00.003
0.08	03.694	1974.740	03.395	00.172	00.004	0.0017
0	03.395	1978.135	00.00	00.00	00.00	00.00

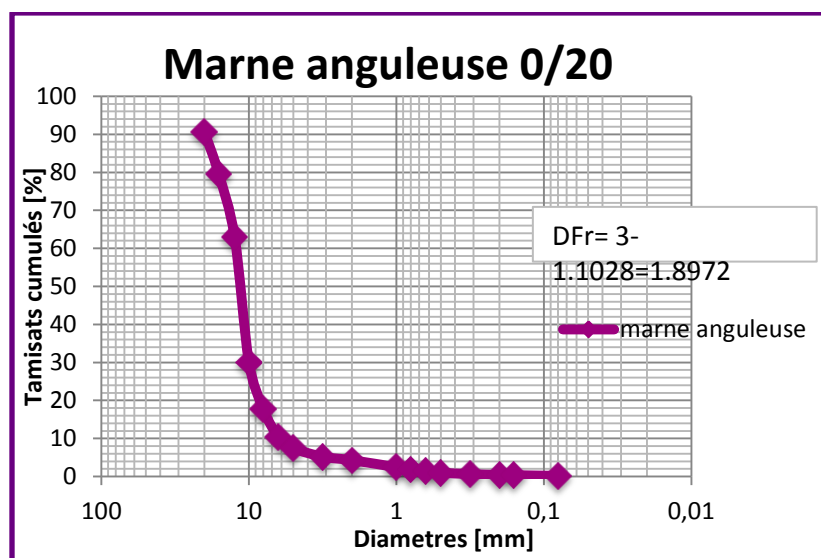


Figure IV-72: Courbe granulométrique de la marne de forme anguleuse après essai de dégradabilité.

Tableau IV-30: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/20 des grains de gré de forme anguleuse après essai.

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
20	654.353	654.353	1281.252	66.194	01.00	00.662
16	621.805	1276.158	659.447	34.069	00.800	00.341
12.5	172.424	1448.582	487.023	25.161	00.625	00.252
10	440.395	1888.977	46.628	02.409	00.500	00.024
8	38.239	1927.216	08.389	00.433	00.400	00.004
6.3	01.298	1928.514	07.091	00.366	00.315	0.0036
5	00.399	1928.913	06.692	00.346	00.250	0.0034
3.15	00.799	1929.712	05.893	00.304	00.157	0.0030
2	00.100	1929.812	05.793	00.299	00.100	0.0029
1	00.100	1929.912	05.693	00.294	00.050	0.0029
0.8	00.00	1929.912	05.693	00.294	00.040	0.0029
0.63	00.100	1930.012	05.593	00.289	00.031	0.0028
0.5	00.100	1930.112	05.493	00.284	00.025	0.0028
0.315	00.200	1930.312	05.293	00.273	00.016	0.0027
0.2	00.899	1931.211	04.394	00.227	00.010	0.0022
0.16	00.799	1932.010	03.595	00.186	00.008	0.0018
0.08	02.696	1934.706	00.899	00.046	00.004	0.0004
0	00.899	1935.605	00.00	00.00	00.00	00.00

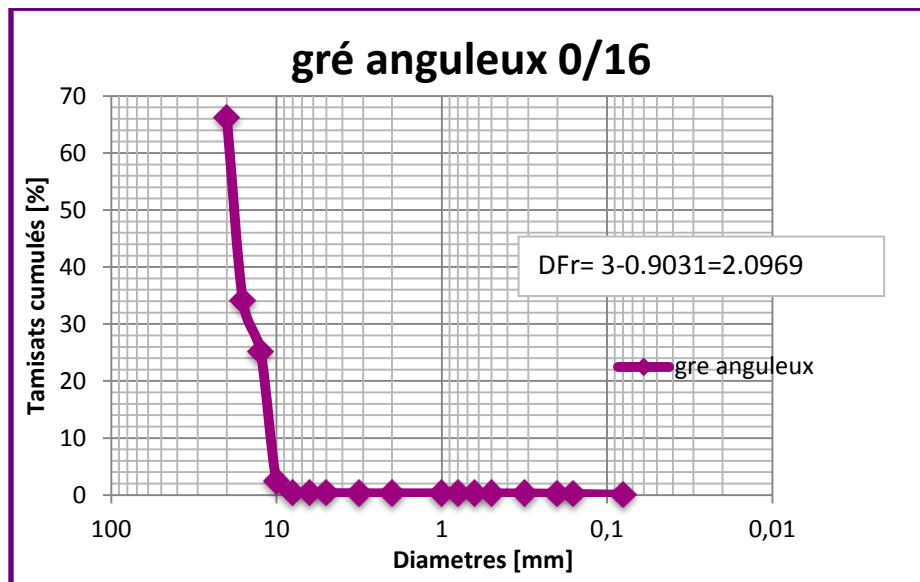


Figure IV-73: Courbe granulométrique des grains de gré de forme anguleuse après essai de dégradabilité.

Tableau IV-31: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/20 des grains de gré de forme sous arrondie après essai.

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
20	707.668	707.668	1290.537	64.585	01.00	00.646
16	672.924	1380.592	617.613	30.908	00.800	00.309
12.5	112.420	1493.012	505.193	25.282	00.625	00.253
10	486.023	1979.035	19.170	00.959	00.500	00.009
8	10.184	1989.219	08.986	00.449	00.400	00.004
6.3	00.998	1990.217	07.988	00.399	00.315	0.0039
5	00.899	1991.116	07.089	00.355	00.250	0.0035
3.15	00.399	1991.515	06.690	00.335	00.157	0.0033
2	00.100	1991.615	06.590	00.329	00.100	0.0032
1	00.100	1991.715	06.490	00.325	00.050	0.0032
0.8	00.00	1991.715	06.490	00.325	00.040	0.0032
0.63	00.100	1991.815	06.390	00.319	00.031	0.0031
0.5	00.100	1991.915	06.290	00.315	00.025	0.0031
0.315	00.399	1992.314	05.891	00.295	00.016	0.0029
0.2	01.098	1993.412	04.793	00.239	00.010	0.0023
0.16	00.899	1994.311	03.894	00.195	00.008	0.0019
0.08	02.796	1997.107	01.098	00.055	00.004	0.0005
0	01.098	1998.205	00.00	00.00	00.00	00.00

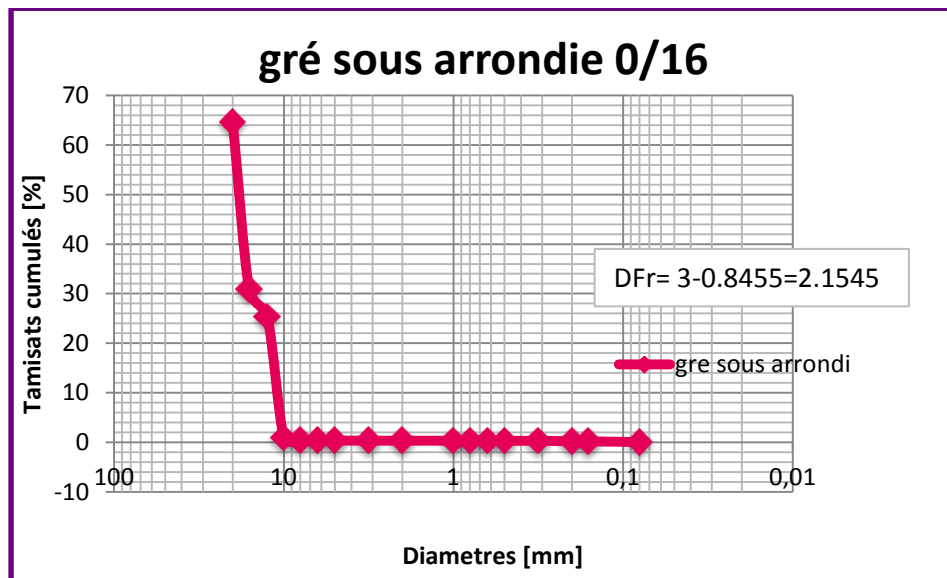


Figure IV-74 : Courbe granulométrique des grains de gré de forme sous arrondie après essai de dégradabilité.

Tableau IV-32: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/20 des grains de pegmatite après essai.

diamètres Ø (mm)	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisâts cumulés (gr)	tamisâts cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
12.5	118.81	118.810	490.017	80.485	01.00	00.805
10	455.97	574.780	34.047	05.592	00.800	00.056
8	31.450	606.230	02.597	00.426	00.640	00.004
6.3	01.098	607.328	01.499	00.246	00.504	00.002
5	00.599	607.927	00.900	00.148	00.400	0.0014
3.15	00.200	608.127	00.700	00.115	00.252	0.0011
2	00.200	608.327	00.500	00.082	00.160	0.0008
1	00.100	608.427	00.400	00.066	00.080	0.0006
0.8	00.200	608.627	00.200	00.033	00.064	0.0003
0.63	00.00	608.627	00.200	00.033	00.050	0.0003
0.5	00.00	608.627	00.200	00.033	00.040	0.0003
0.315	00.100	608.727	00.100	00.016	00.025	0.0001
0.2	00.00	608.727	00.100	00.016	00.016	0.0001
0.16	00.00	608.727	00.100	00.016	00.013	0.0001
0.08	00.00	608.727	00.100	00.016	00.006	0.0001
0	00.100	608.827	00.00	00.00	00.00	00.00

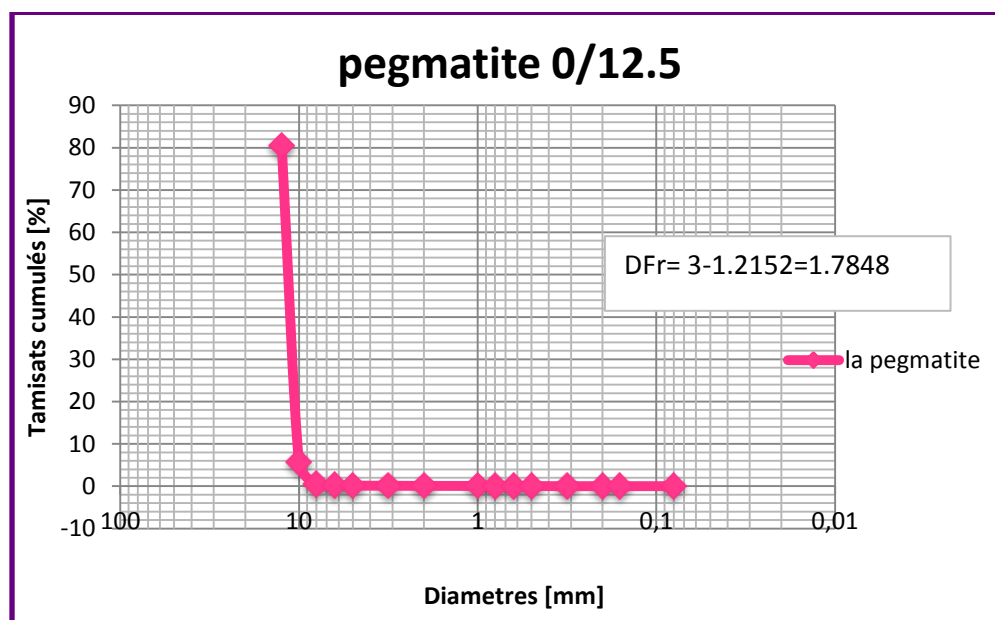


Figure IV-75 : Courbe granulométrique des grains de pegmatite après essai de dégradabilité.

Résultats

Calcul du coefficient de dégradabilité DG

Les valeurs de DG pour les formes des trois matériaux sont déterminées comme suit :

$$D_i=8$$

$$DG=D_i/D_f$$

Dans le domaine routier, les conditions suivantes sont à respecter :

$DG > 20 \Rightarrow$ matériaux rocheux **très dégradables**

$5 < DG < 20 \Rightarrow$ matériaux rocheux **moyennement dégradables**

$DG < 5 \Rightarrow$ matériaux rocheux **peu dégradables**

1) Grains de schiste de forme sous arrondie :

$$D_f=4 \Rightarrow DG=8/4=2$$

2) Grains de schiste de forme allongée :

$$D_f=3.5 \Rightarrow DG=8/3.5=2.285$$

3) Grains de Schiste de forme anguleuse :

$$D_f=3.5 \Rightarrow DG=8/3.5=2.285$$

4) Marne de forme sous arrondie :

$$D_f=6.3 \Rightarrow DG=8/6.3=1.269$$

5) Marne de forme allongée :

$$D_f=5 \Rightarrow DG= 8/5 =1.6$$

6) Marne de forme anguleuse :

$$D_f=6.3 \Rightarrow DG= 8/6.3 =1.269$$

7) Grains de gré de forme anguleuse :

$$D_f=10.2 \Rightarrow DG= 8/10.2=0.784$$

8) Grains de Gré de forme sous arrondie :

$$D_f=10.2 \Rightarrow DG= 8/10.2=0.784$$

9) Grains de pegmatite :

$$D_f=10 \Rightarrow DG= 8/10=0.8$$

Les matériaux étudiés ont tous un coefficient de dégradabilité inférieurs 5 ; donc ce sont des matériaux **peu dégradables**.

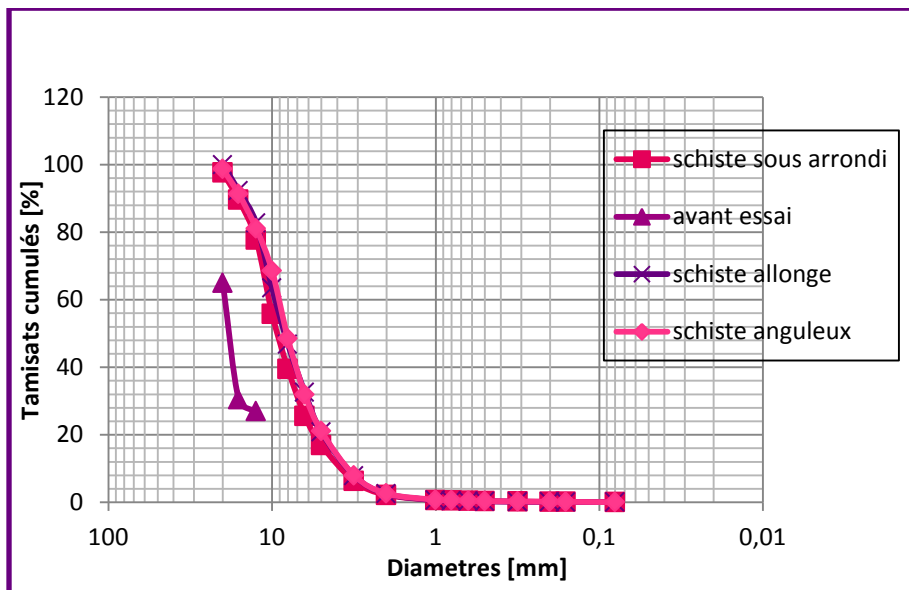


Figure IV-76: Comparaison des courbes granulométriques des 3 formes du schiste obtenues avant et après essai.

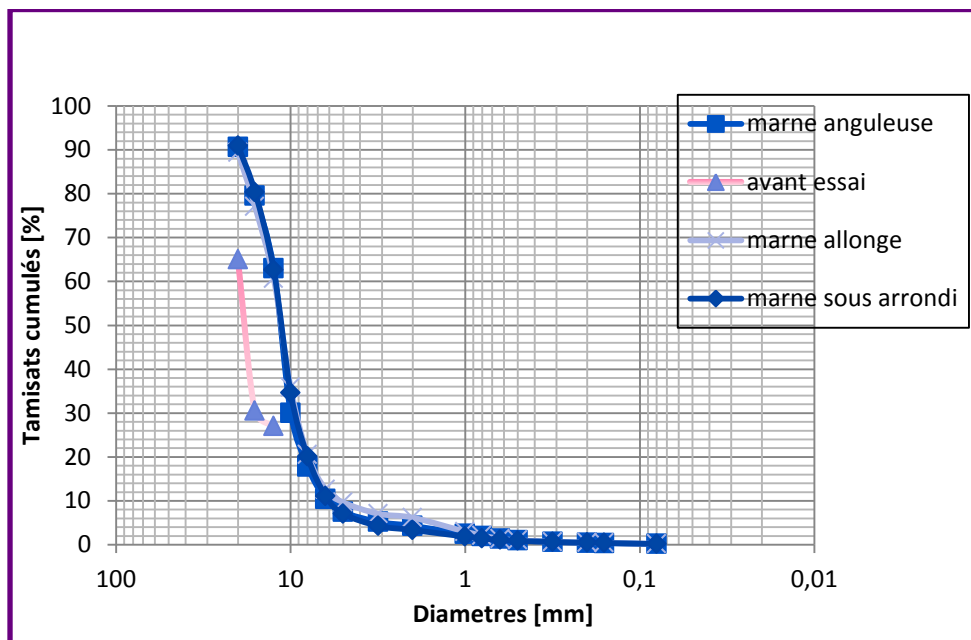


Figure IV-77: Comparaison des courbes granulométriques des 3 formes de la marne obtenues avant et après essai.

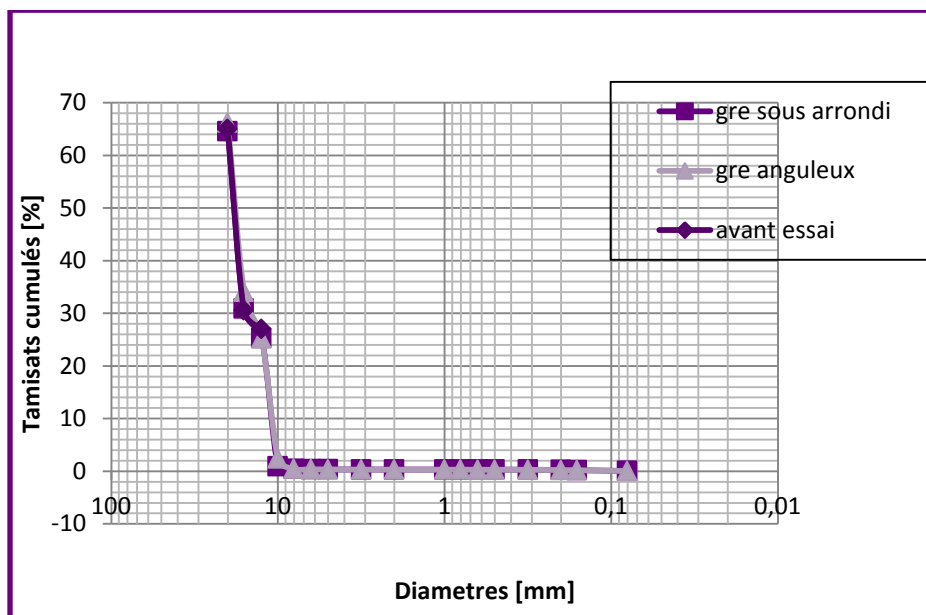


Figure IV-78 : Comparaison des courbes granulométriques des 3 formes du gré obtenues avant et après essai.

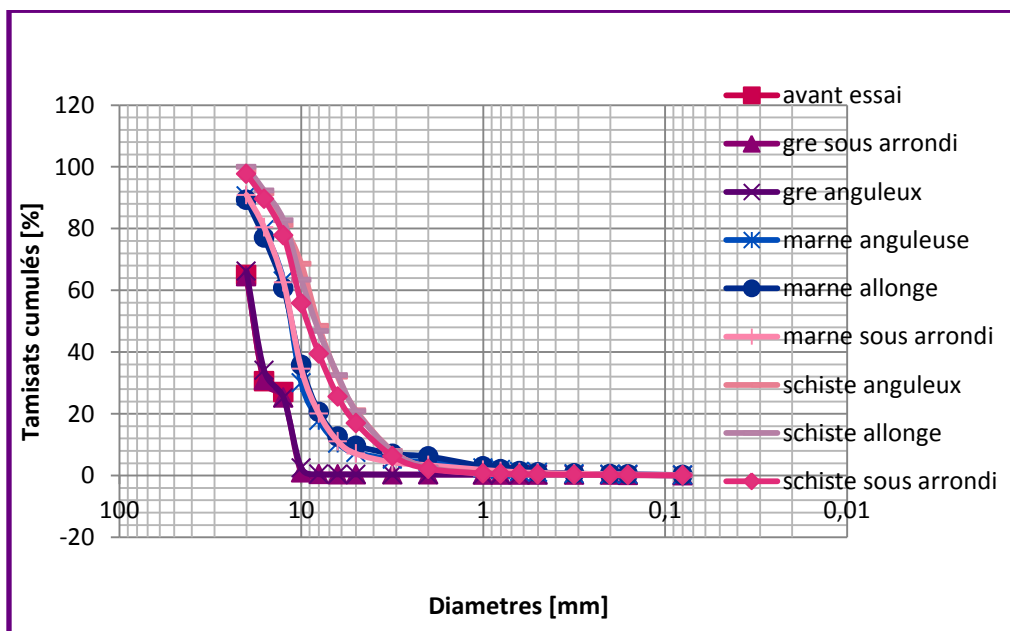


Figure IV-79 : Comparaison des courbes granulométriques des 3 formes des 3 matériaux (gré, schiste, marne) obtenues avant et après essai.

***interprétation des résultats**

Le coefficient de dégradabilité le plus élevée est celui du schiste pour les trois formes. Les courbes granulométriques observées après essai sont de granulométrie plus étalée que la courbe initiale, et il y'a eu production de particules fines (fig74,fig75). Les courbes les plus étalées sont les courbes des trois formes de schiste (figIV-77). Par contre, gré a eu qu'une petite production de particules fines avec un léger un étalement granulométrique. (IV-76).

Le matériau le plus dégradable est le matériau de schiste ou il a le plus grand étalement de courbe granulométrique, le plus grand coefficient de dégradabilité, et un grand pourcentage de fines par rapport aux autres matériaux. Le gré et la pegmatite sont les matériaux qui ont produit moins de particules fines et qui ont le plus faible coefficient de dégradabilité.

Dans le cas de la marne, la forme des grains n'influe pas sur la dégradation, les 3 courbes sont confondues. Par contre, dans le cas du schiste, on remarque que les formes allongée et anguleuse sont les plus dégradables (la courbe est plus étalée et présente un pourcentage de fine plus élevé).

Dans le cas du schiste, la dimension fractale a augmenté pour les 3 formes ; ce qui montre qu'il y'a eu un écaillage au niveau des grains. Sa dimension fractale pour la forme sous arrondie a augmenté plus que les 2 autres formes. Dans le cas de la marne, la dimension fractale a augmenté presque de la même façon pour les 3 formes ; ce qui veut dire qu'il y a eu écaillage des grains et la forme des grains n'a pas influé sur la façon de dégradation de la marne. Dans le cas du gré, la dimension fractale a augmenté pour les 2 formes (anguleuse et sous arrondie) surtout pour la forme sous arrondie ; ce qui montre que celle-ci est devenue plus rugueuse.

Les courbes de tendance montrent un bon ajustement des données et de la loi de puissance avec un degré élevé de corrélation ($R^2 > 0,96$) pour les matériaux schiste et marne. Par contre, pour le gré et la pegmatite ces corrélations ne sont pas aussi parfaites.

IV-7-3-b) - Valeurs des dimensions fractales

Les valeurs de dimension fractales des différents matériaux et essais sont représentée dans le tableau suivant :

Tableau IV-33 : Résultats de la dimension fractale des matériaux avant et après chaque essai

L`essai	Le matériau	La forme	Dimension fractale avant essai	Dimension fractale après essai
Gel/dégel	Schiste	Sous arrondie	2.2157	1.7279
"	Schiste	Anguleuse	2.2157	1.7765
"	Schiste	Allongée	2.2157	2.1790
"	Marne	Sous arrondie	2.2142	1.9559
"	Marne	Anguleuse	2.2142	1.8718
"	Marne	Allongée	2.2142	1.9206
"	Gré	Sous arrondie	2.2187	2.2032
"	Gré	anguleuse	2.2187	2.1760
"	pegmatite	Très anguleuse	2.2141	2.3045
altérabilité	Schiste	Sous arrondie	2.2157	1.8797
"	Schiste	Anguleuse	2.2157	1.8550
"	Schiste	Allongée	2.2157	1.8729
"	Marne	Sous arrondie	2.2142	2.0171
"	Marne	Anguleuse	2.2142	2.0372
"	Marne	Allongée	2.2142	2.0218
"	Gré	Sous arrondie	2.2187	2.2032
"	Gré	Anguleuse	2.2187	2.2276
"	pegmatite	Très anguleuse	2.2141	2.2851
degradabilite	Schiste	Sous arrondie	1.1550	1.5439
"	Schiste	Anguleuse	1.1550	1.5040
"	Schiste	Allongée	1.1550	1.4194
"	Marne	Sous arrondie	1.1550	1.8802
"	Marne	Anguleuse	1.1550	1.8972
"	Marne	Allongée	1.1550	1.89.64
"	Gré	Sous arrondie	1.1550	2.1545
"	Gré	Anguleuse	1.1550	2.0969
"	pegmatite	anguleuse	1.1550	1.7848

IV-8)- L`influence de la classe sur la dimension fractale

Les essais gel/dégel et les essais d`altérabilité ont été réalisés pour les deux classes granulaires 0/5 et 5/10 des matériaux les plus dégradables schiste et marne. Les résultats des essais sont représentés ci-dessous :

IV-8-1) -Essai gel/dégel

IV-8-1-a) -Cas de la classe 0/5

Les résultats d`analyse granulométrique et de calcul de la dimension fractale avant et après essais sont représentés si dessous :

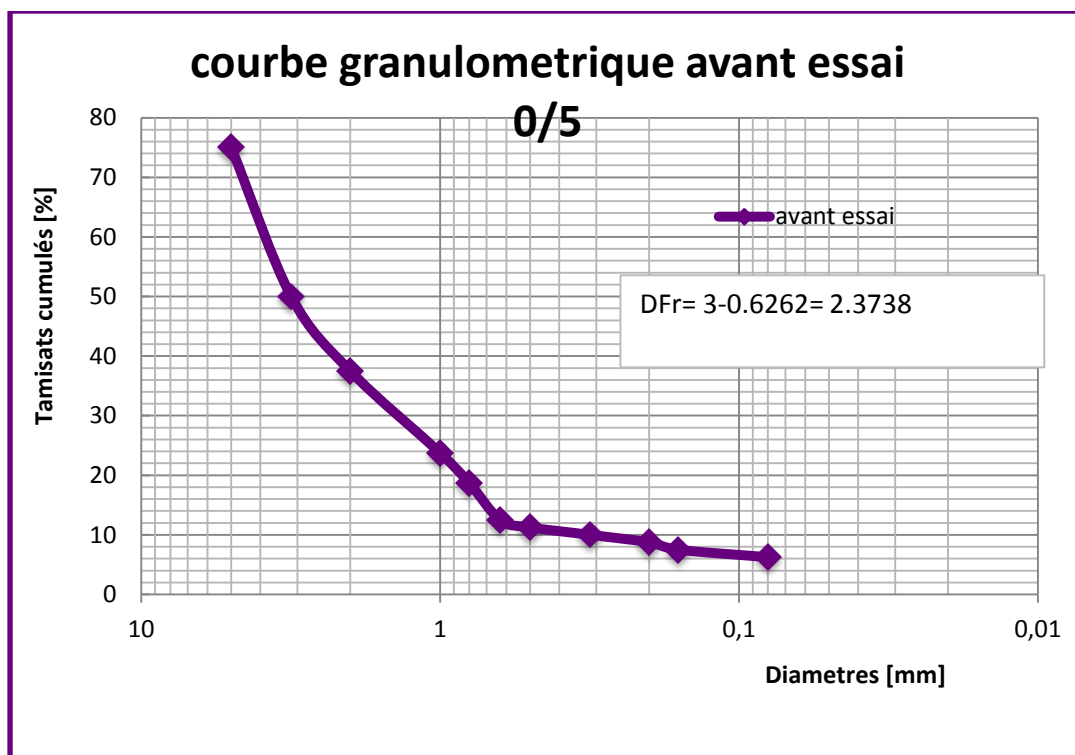


Figure IV-80: Courbe granulométrique avant essais classe 0/5

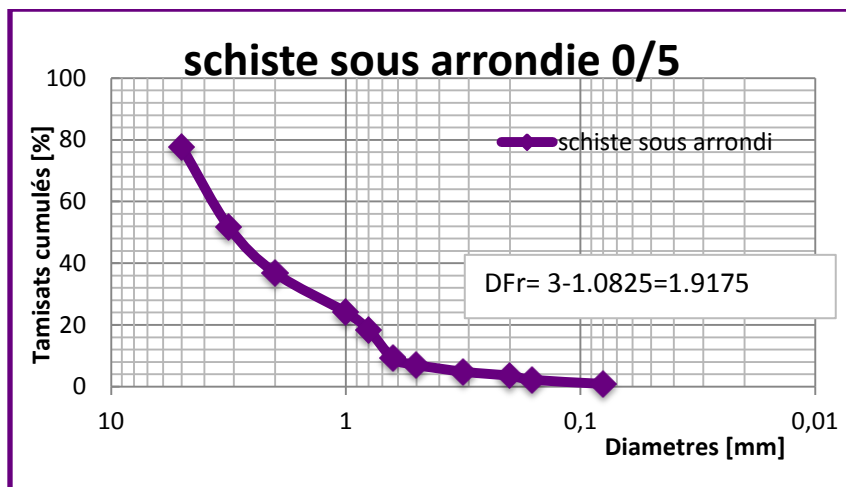


Figure IV-81 :
 Courbe granulométrique
 après essai du schiste sous
 arrondi classe 0/5

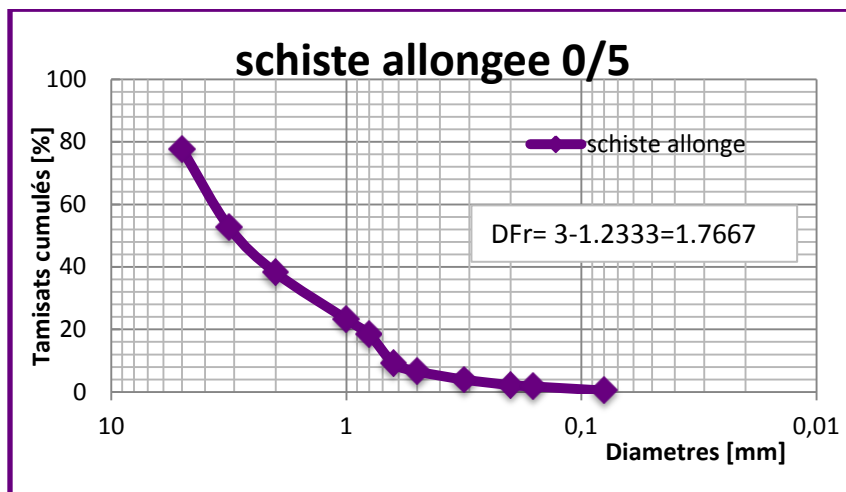


Figure IV-82:
 Courbe granulométrique
 après essai du schiste
 allongée classe 0/5

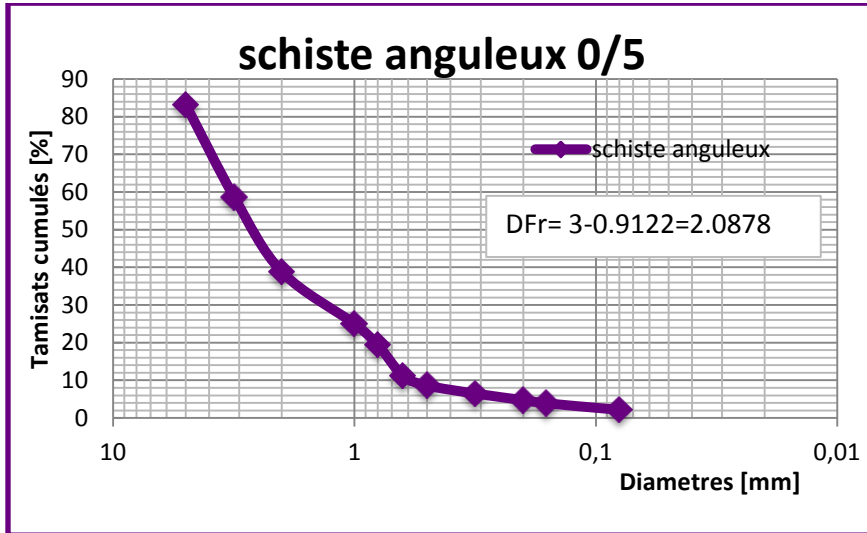


Figure IV-83:
Courbe granulométrique après essai du schiste anguleux classe 0/5

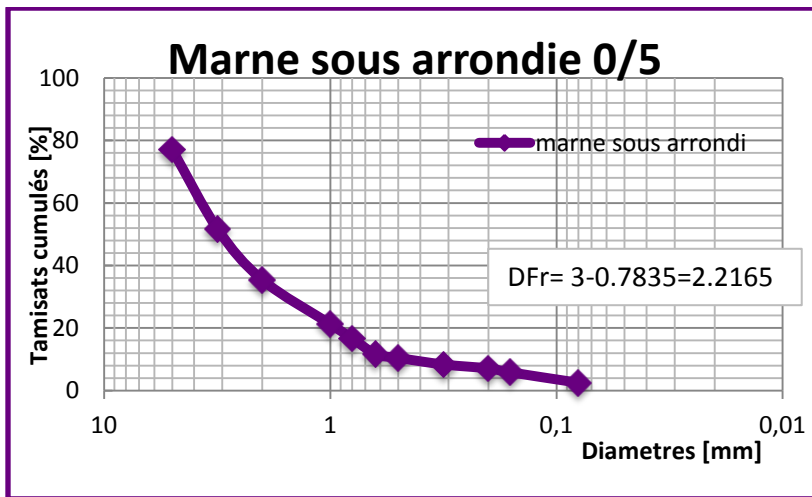


Figure IV-84:
Courbe granulométrique après essai de la marne sous arrondie classe 0/5

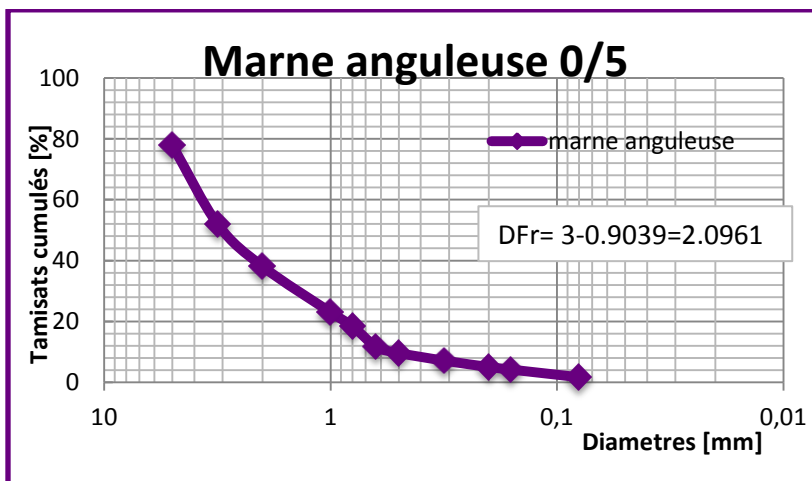


Figure IV-85:
Courbe granulométrique après essai de la marne anguleuse classe 0/5

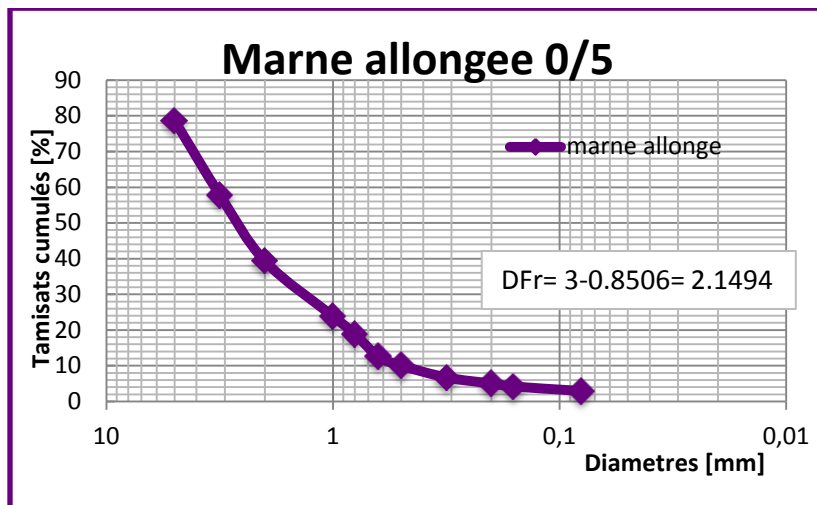


Figure IV-86:
Courbe granulométrique après essai de la marne allongée classe 0/5

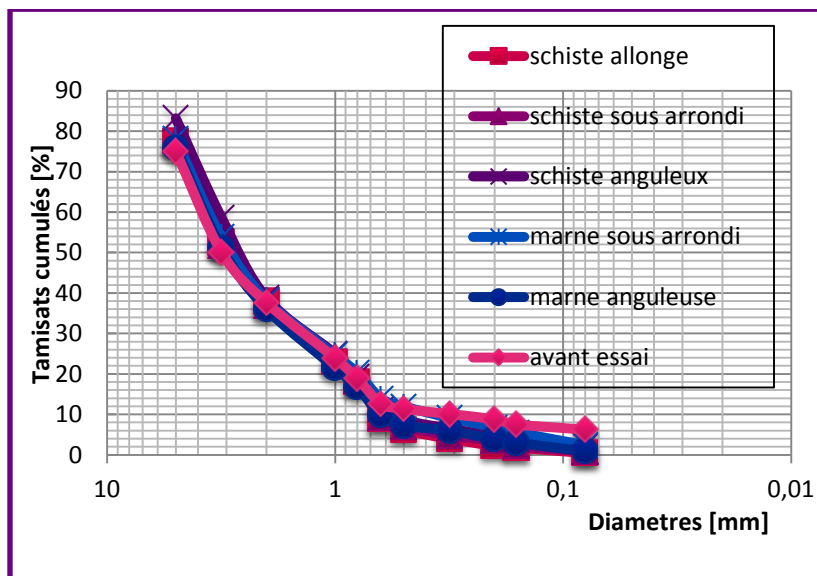


Figure IV-87:
Comparaison des courbes granulométriques obtenues après essai des 3 formes des 2 matériaux 0/5

IV-8-1-b) Cas de la classe 5/10

Les courbes granulométriques et les valeurs des dimensions fractales avant et après essai sont représentées comme suit :

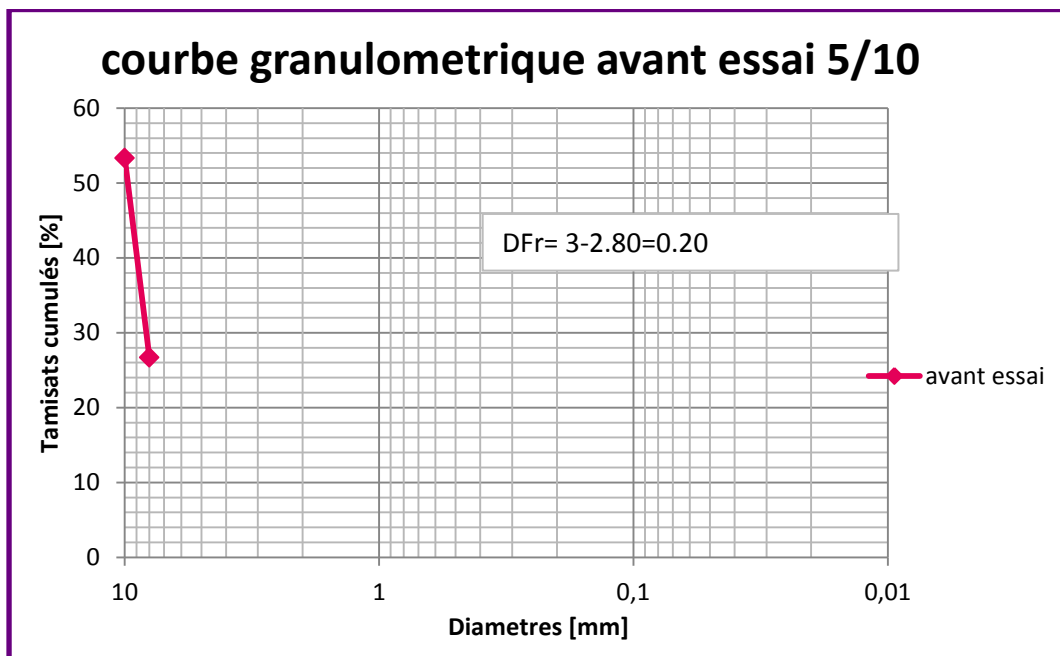


Figure IV-88: Courbe granulométrique avant essai de tous les matériaux de classe 5/10

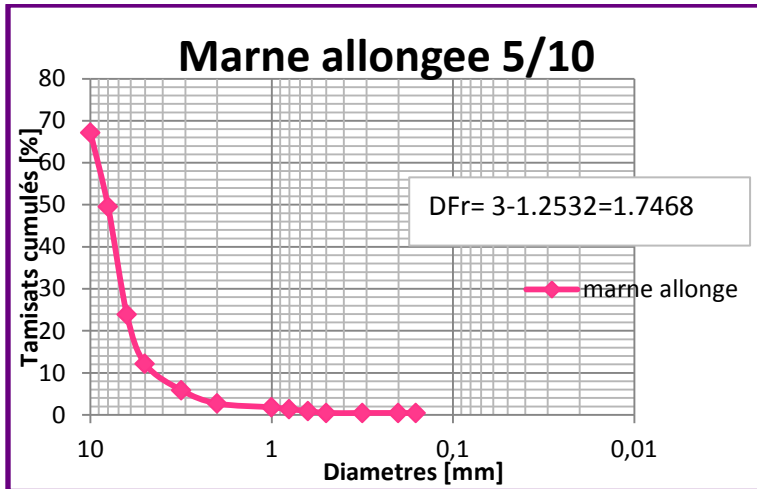


Figure IV-89:
Courbe granulométrique après essai de la marne allongée classe 5/10

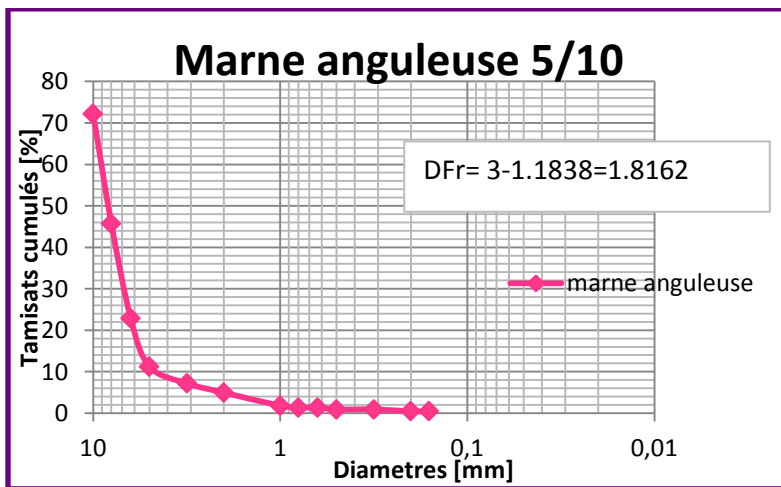


Figure IV-90:
Courbe granulométrique après essai de la marne anguleuse classe 5/10

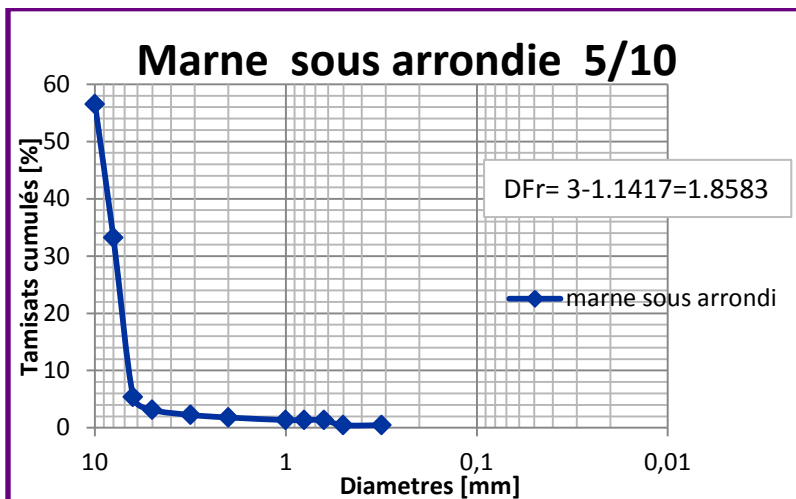


Figure IV-91:
Courbe granulométrique après essai de la marne sous arrondie classe 5/10

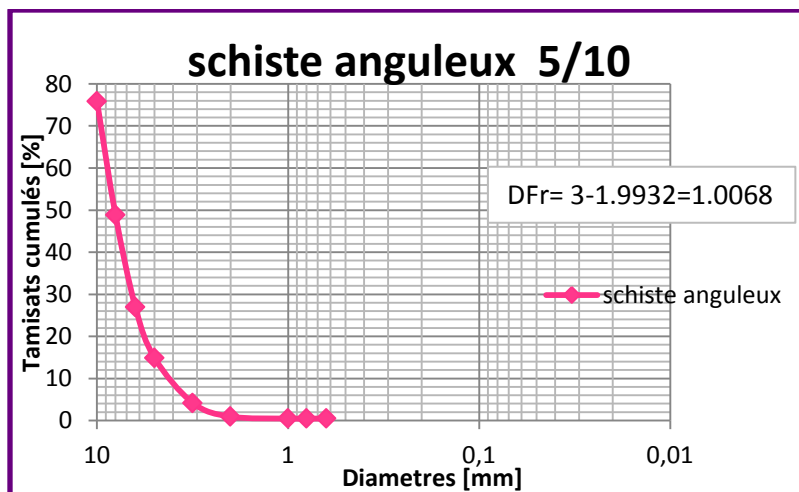


Figure IV-92:
Courbe granulométrique après essai de schiste anguleux classe 5/10

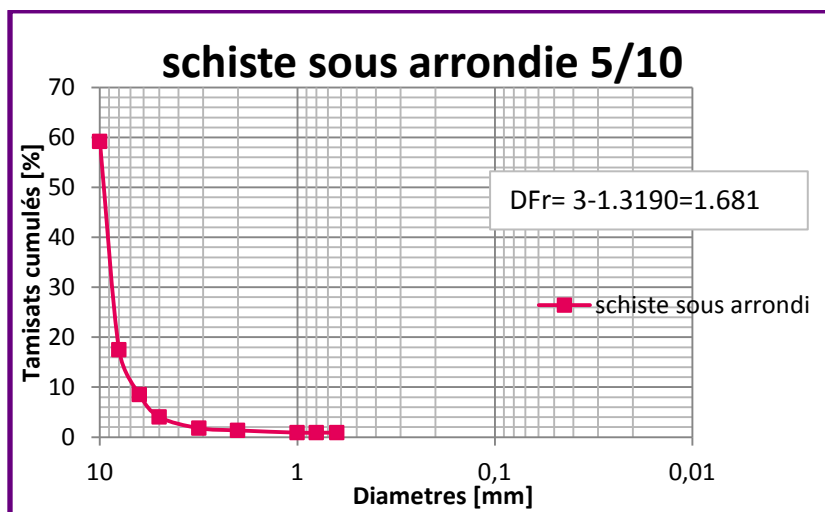


Figure IV-93:
Courbe granulométrique après essai de schiste sous arrondie classe 5/10

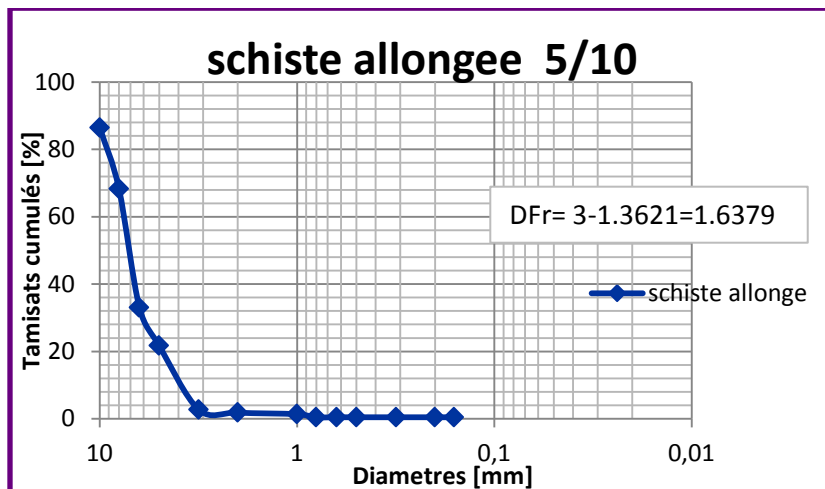


Figure IV-94:
Courbe granulométrique après essai du schiste allongée classe 5/10

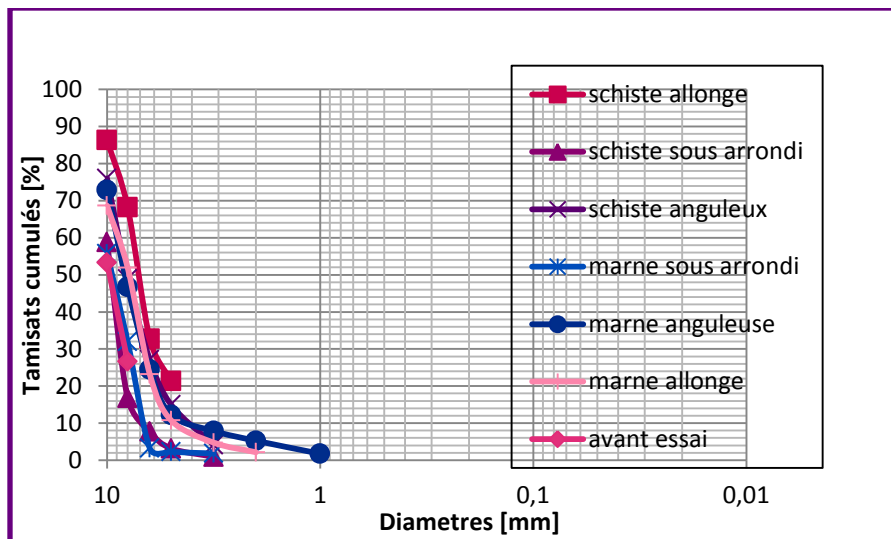


Figure IV-95:
Comparaison des courbes granulométriques obtenues après essai des 3 formes des 2 matériaux 5/10

IV-8-2)-Essai d`altérabilité

IV-8-2-a) Cas de la classe 0/5

Les courbes granulométriques et les valeurs des dimensions fractales des différents matériaux de classe 0/5 sont représentées ci dessous :

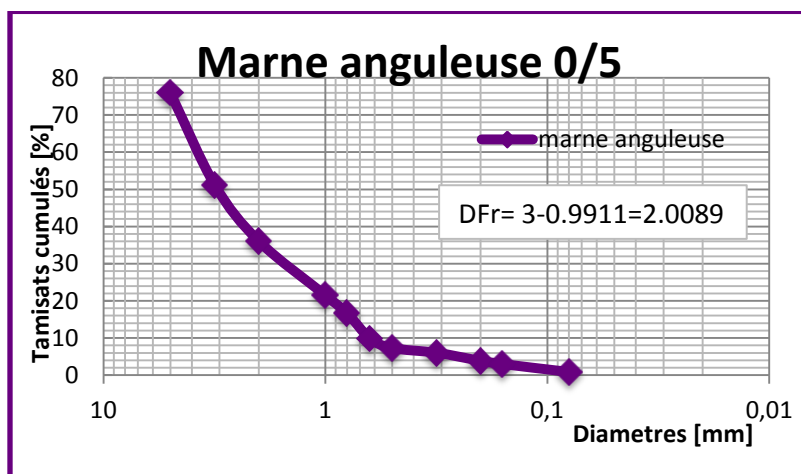


Figure IV-96:
Courbe granulométrique après essai de marne anguleuse classe 0/5

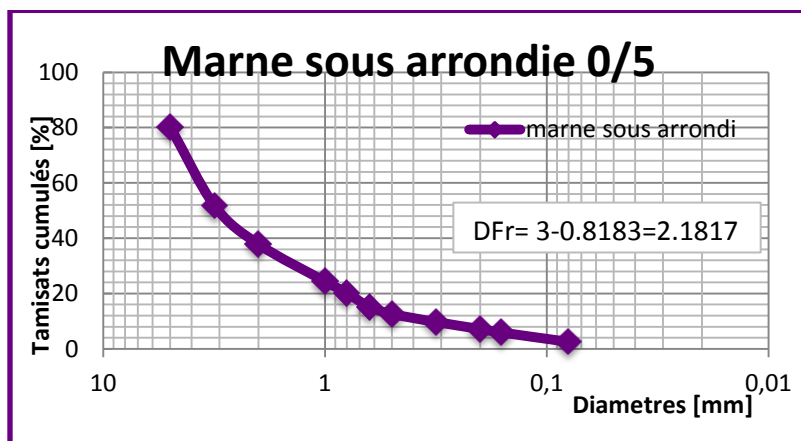


Figure IV-97:
Courbe granulométrique après essai de marne sous arrondi classe 0/5

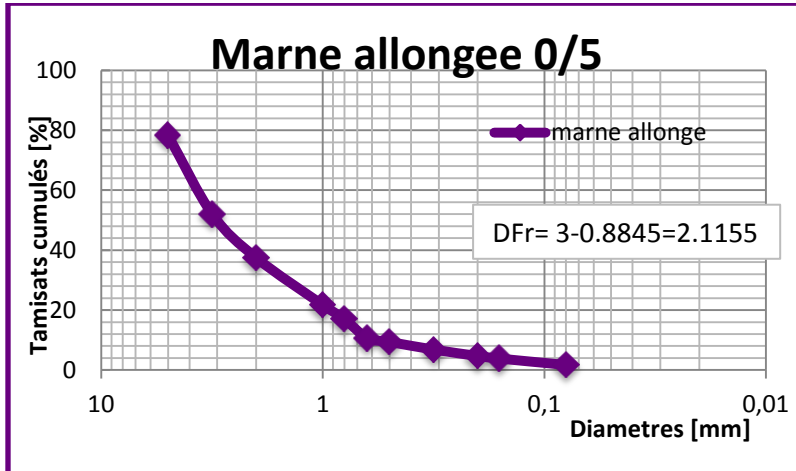


Figure IV-98:
Courbe granulométrique après essai de marne allongée classe 0/5

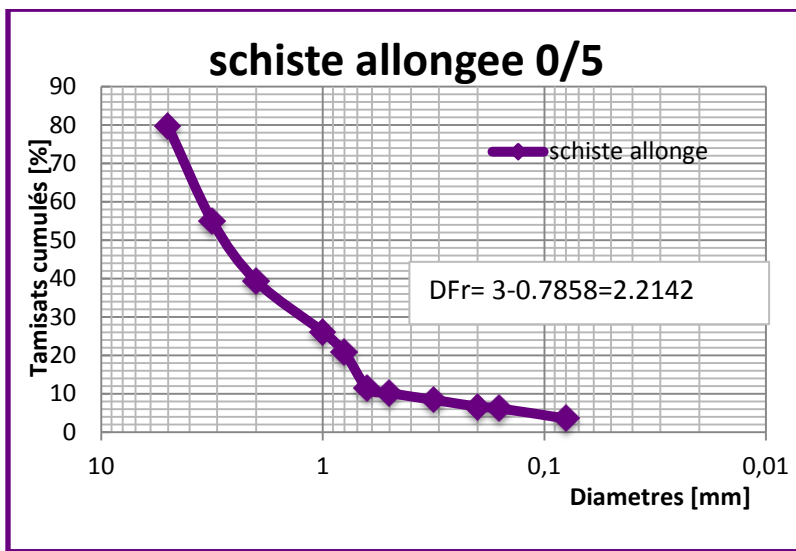


Figure IV-99:
Courbe granulométrique après essai du schiste allongée classe 0/5

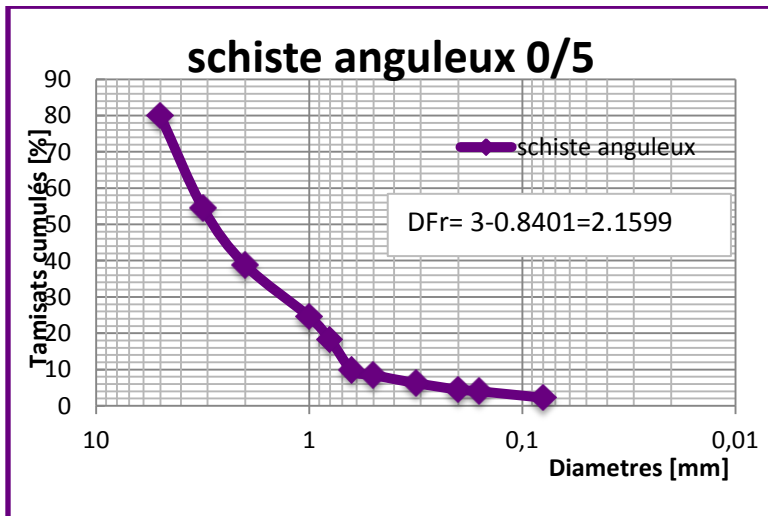


Figure IV-100:
Courbe granulométrique après essai du schiste anguleux classe 0/5

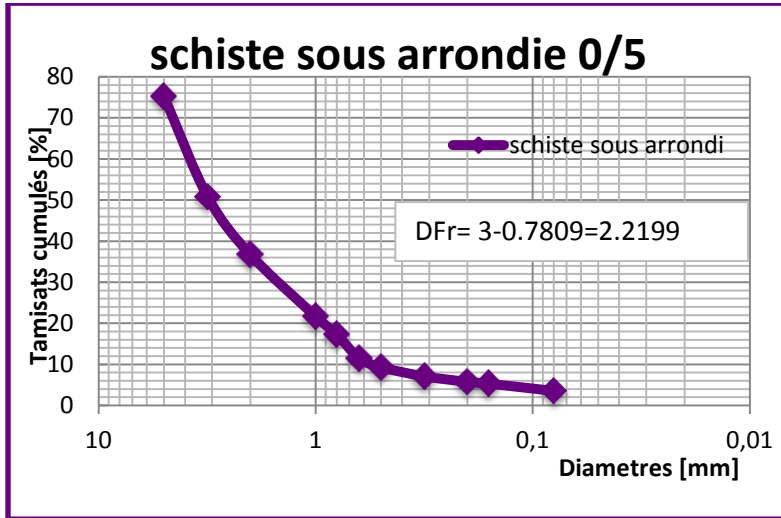


Figure IV-101:
 Courbe granulométrique après
 essai du schiste sous arrondie
 classe 0/5

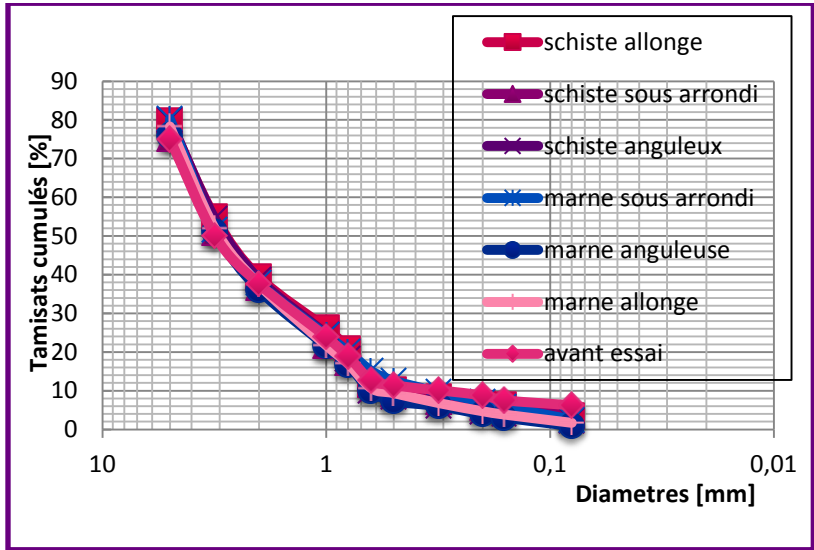


Figure IV-102:
 Comparaison des courbes
 granulométriques obtenues
 après essai des 3 formes des 2
 matériaux 0/5

IV-8-2-b) Cas de la classe 5/10

Les courbe granulométriques et les valeurs des dimensions fractales des différents matériaux de classe 5/10 après essais sont représentées ci-dessous :

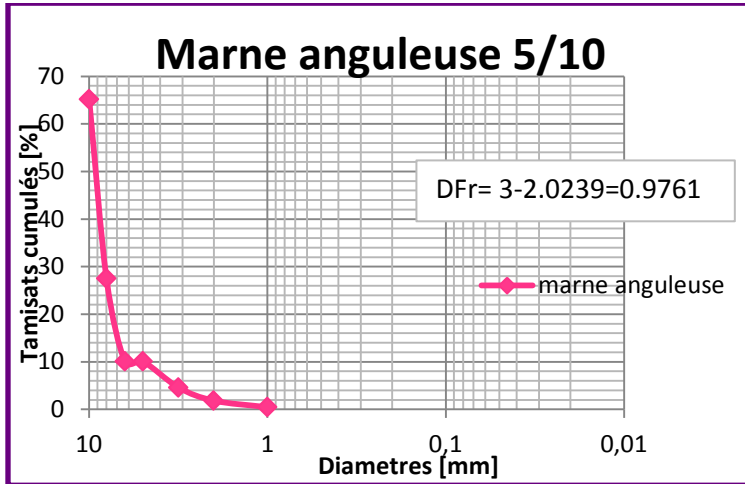


Figure IV-103:
 Courbe granulométrique après essai de marne anguleuse classe 5/10

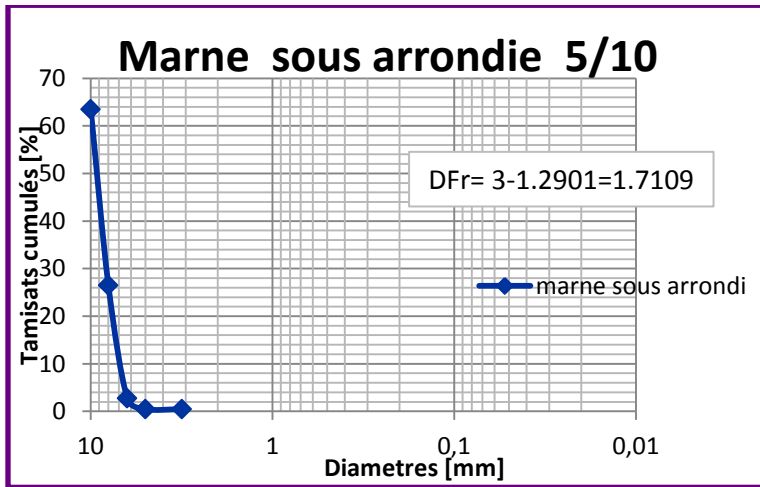


Figure IV-104:
 Courbe granulométrique après essai de marne sous arrondie classe 5/10

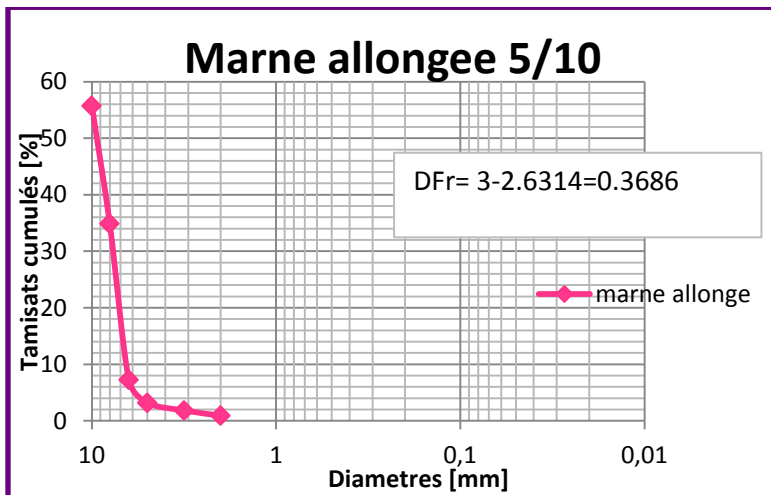


Figure IV-105:
 Courbe granulométrique après essai de marne allongée classe 5/10

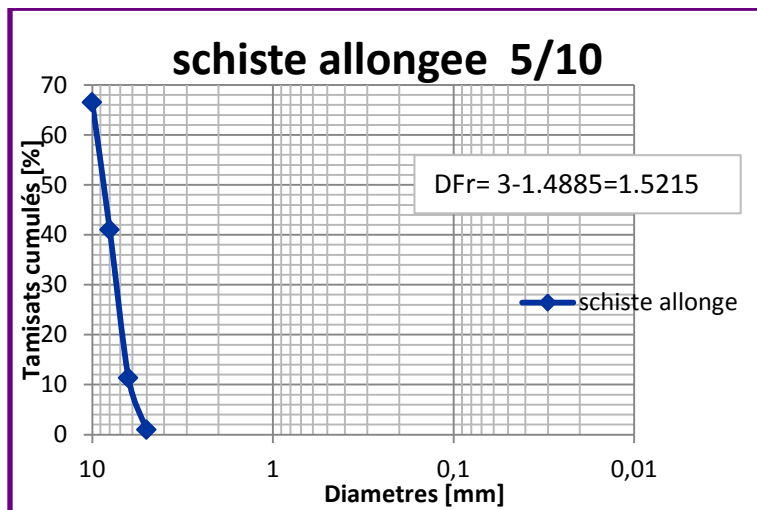


Figure IV-106:
Courbe granulométrique après
essai du schiste allongée
classe 5/10

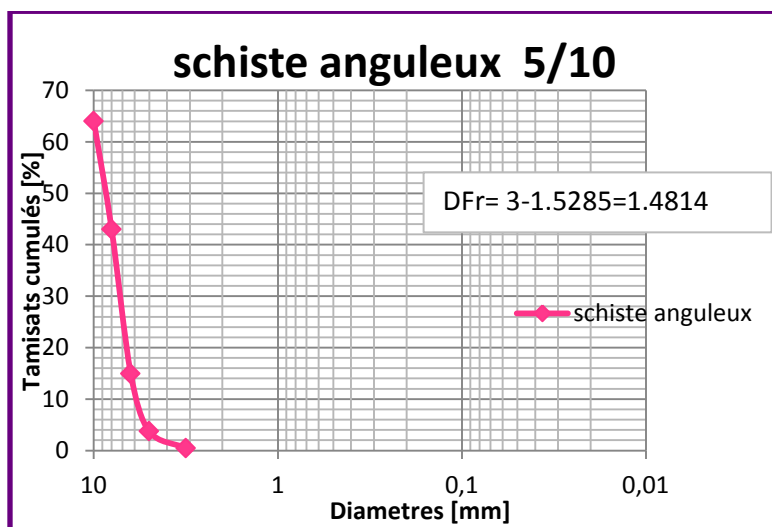


Figure IV-107:
Courbe granulométrique
après essai du schiste
anguleux classe 5/10

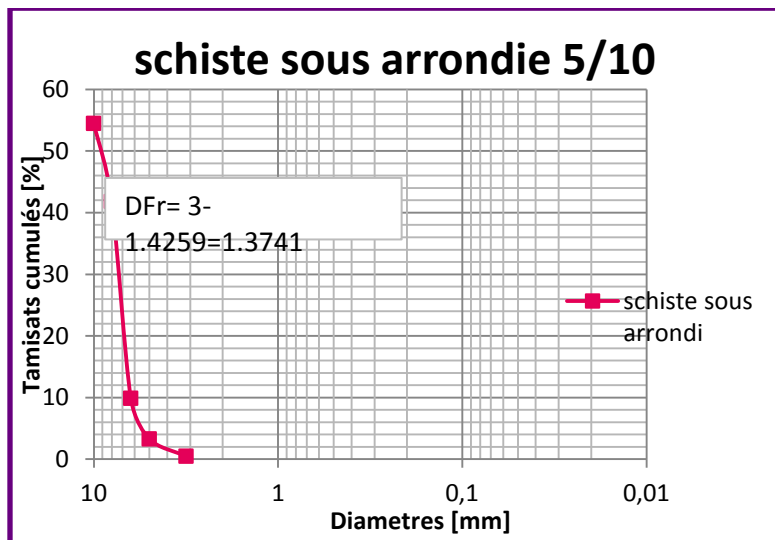


Figure IV-108:
 Courbe granulométrique après essai du schiste sous arrondie classe 5/10

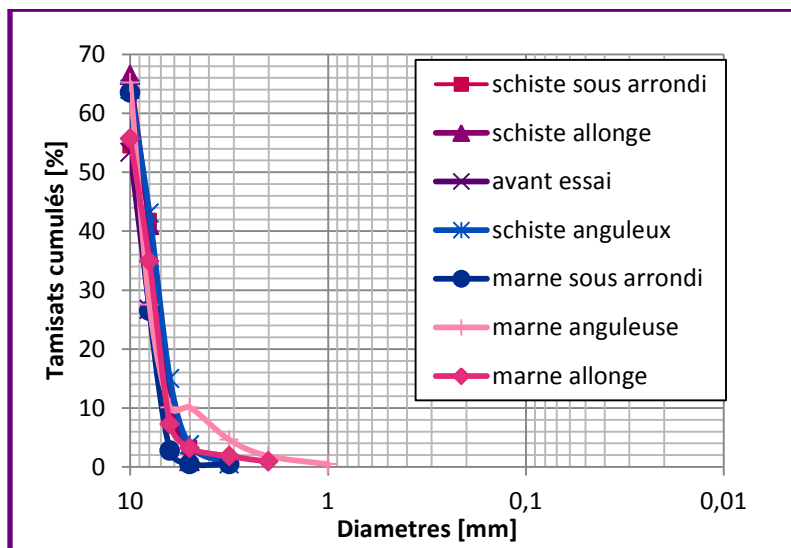


Figure IV-109:
 Comparaison des courbes granulométriques obtenues après essai des 3 formes des 2 matériaux 5/10

Tableau IV-34 : valeurs des dimensions fractales avant et après essai des différents matériaux étudiés de classe 0/5

L`essai	Le matériau	La forme	Dimension fractale avant essai	Dimension fractale après essai
Le gel/dégel	La marne	Sous arrondi	2.3738	2.2165
"	Marne	Anguleuse	2.3738	2.0961
"	Marne	Allongée	2.3738	2.1494
"	Schiste	Sous arrondi	2.3738	1.9175
"	Schiste	Anguleuse	2.3738	2.0878
"	Schiste	Allongée	2.3738	1.7667
Altérabilité	La marne	Sous arrondi	2.3738	2.1817
"	Marne	Anguleuse	2.3738	2.0089
"	Marne	Allongée	2.3738	2.1155
"	Schiste	Sous arrondi	2.3738	2.2199
"	Schiste	Anguleuse	2.3738	2.1599
"	Schiste	Allongée	2.3738	2.2142

Tableau IV- 35: valeurs des dimensions fractales avant et après essai des différents matériaux étudiés de classe 5/10

L`essai	Le matériau	La forme	Dimension fractale avant essai	Dimension fractale après essai
Le gel/dégel	La marne	Sous arrondi	0.20	1.8583
"	Marne	Anguleuse	0.20	1.8162
"	Marne	Allongée	0.20	1.7468
"	Schiste	Sous arrondi	0.20	1.6810
"	Schiste	Anguleuse	0.20	1.0068
"	Schiste	Allongée	0.20	1.6379
Altérabilité	La marne	Sous arrondi	0.20	1.7109
"	Marne	Anguleuse	0.20	0.9761
"	Marne	Allongée	0.20	0.3686
"	Schiste	Sous arrondi	0.20	1.3741
"	Schiste	Anguleuse	0.20	1.4815
"	Schiste	Allongée	0.20	1.5215

interprétation des résultats*Cas de la classe 0/5**

Les courbes granulométriques sont presque confondues avec la courbe initiale dans les 2 essais (gel/dégel et altérabilité), il y`a eu un faible étalement de courbe granulométrique (fig IV-85, fig IV-100).

La dimension fractale a diminué dans les 2 essais surtout dans le cas du gel /dégel (schiste en 3 formes et la marne anguleuse) (tableau VI-34).

Cas de Classe 5/10

Les courbes granulométriques après essai sont plus étalées que la courbe initiale dans le cas de l`essai gel/ dégel ; contrairement a l`essai d`altérabilité où les courbes sont de granulométrie serrée et sont presque confondues à la courbe initiale, et il y`a eu une production de fines dans les 2 essais avec un pourcentage plus élevé dans l`essai gel/dégel surtout dans le cas de la marne anguleuse, allongée ainsi que dans le cas du schiste allongé et anguleux. Contrairement à l`essai d`altérabilité où on a eu presque la même quantité de fine pour toutes les formes des deux matériaux sauf dans le cas de la marne anguleuse, (figIV-93, figIV-107).

La dimension fractale a augmenté après les deux essais d`une façon plus élevée dans le cas du gel/dégel surtout pour la marne sous trois formes ; contrairement à l`essai d`altérabilité où le schiste a présenté la plus grande valeur de DF après essai. Donc le schiste est le matériau le plus défavorable en terme de dimension fractale dans le cas de l`essai d`altérabilité et le matériau marne dans le cas de l`essai gel/dégel (tableau IV-35).

L`essai le plus défavorable est l`essai gel/dégel et ceci pour les deux classes 0/5 et 5/10 des différents matériaux où on a observé plus de particules fines et un étalement granulométrique plus important ainsi que des variations des valeurs de dimensions fractales plus étendues par rapport à l`essai d`altérabilité.

La forme de la marne a peu influé la dimension fractale où on a remarqué pour les deux classes après essai des valeurs assez proches pour les trois formes ; contrairement au schiste où on a remarqué que la forme anguleuse est la plus défavorable avec DF qui a augmenté pour les deux

formes aux essais gel/ dégel et altérabilité dans le cas de la classe 0/5 et qui a diminué aux essais gel/dégel/ dans le cas de la classe 5/10.

***Interprétation des résultats généraux de la méthode des masses**

La méthode des masses met en évidence le phénomène d'écrasement des grains à l'échelle de l'échantillon. Les principaux résultats obtenus sont interprétés comme suit :

Les essais font augmenter l'écrasement des grains ce qui influe sur la valeur de la dimension fractale qui varie après chaque essai où elle a diminué dans le cas de deux essais d'altérabilité et de gel/dégel ; contrairement à l'essai de dégradabilité où DF a augmenté. On a constaté une différence du mode de rupture des grains qui peut être une rupture des aspérités dans le cas de l'essai gel/dégel et de l'essai d'altérabilité et l'écaillage dans le cas de la dégradabilité.

La dimension fractale dépend de l'étalement de courbe granulométrique et du pourcentage de fines produites après essai où elle diminue après l'essai gel/dégel et d'altérabilité. En effet les courbes granulométriques obtenues après l'essai gel/dégel ont eu un étalement et une production de fines d'une quantité importante ; contrairement à l'essai d'altérabilité où les courbes granulométriques sont presque confondues à la courbe initiale et présentent moins de fines par rapport à l'essai gel/dégel, ainsi qu'à l'essai de dégradabilité où la dimension fractale a augmenté avec des courbes granulométriques bien étalées après essai et une quantité suffisante de fines.

Le schiste est le matériau le plus dégradé dans les cas des deux essais de dégradabilité et d'altérabilité où on a remarqué un étalement de courbes granulométriques plus important que pour les autres matériaux avec un pourcentage de fines plus élevé, contrairement au gel /dégel où la marne est le matériau le plus dégradé.

En terme de dimension fractale, le schiste est le plus défavorable dans le cas du gel/dégel et d'altérabilité où DF a diminué plus que les autres matériaux. La marne dans le cas d'essai de dégradabilité où DF a augmenté après essai plus que les autres matériaux.

Le gré et la pegmatite sont les matériaux les moins écrasés par ces essais où on remarque que leur courbe granulométrique après chaque essai est presque confondue à la courbe initiale avec une production de fines de petite quantité (IV-76, IV-77), ainsi que des dimension fractale presque égales à la dimension fractale initiale (tableau IV-33) .

La classe de l'échantillon influe sur la dimension fractale. En effet, des étalements des courbes granulométriques de classe 5/10 ; contrairement à la classe 0/5 ou les courbes granulométriques se sont très peu étalées et ont produit que peu de particules fines, par conséquent les valeurs de la dimension fractale ont diminuée dans le cas de la classe 0/5 (rupture d'aspérité) et ont augmenté dans le cas de la classe 5/10 (écaillage).

L'essai gel/dégel est l'essai qui a eu le plus de variation de la dimension fractale ; cela montre que c'est l'essai le plus défavorable par rapport à l'essai d'altérabilité.

IV-10) Conclusion

Les matériaux étudiés présentent un coefficient de dégradabilité DG inférieur à 5 ; donc ces matériaux sont peu dégradables.

La variation de la dimension fractale est affectée par :

- la nature des grains, où le schiste et la marne sont les matériaux les plus défavorables, contrairement au gré et à la pegmatite qui sont les moins dégradables,
- la forme des grains qui joue un rôle dans la dégradation du schiste, du gré et dans les grains de marne ;
- la taille des grains est l'un des paramètres influant la dimension fractale où on a observé l'influence de la classe granulaire sur la dimension fractale (plus la classe est grande plus il y a une dégradation des grains et une variation de DF) ,
- et le chemin de contrainte qui joue un rôle important dans la variation de DF et la dégradation des grains. En effet, l'essai gel /dégel a été l'essai le plus défavorable en terme d'étalement de courbe granulométrique et de production de particules fines ainsi que l'essai de dégradabilité qui est le plus défavorable en terme de dimension fractale.

IV-11) Détermination de la dimension fractale par la méthode de compactage des boîtes (box counting ; périmètre)

Le principe de la méthode des boîtes est de faire un maillage de carreaux de dimension identique, et de compter le nombre de boîtes qui touchent le contour du grain (le périmètre), cette opération est refaite plusieurs fois avec des boîtes de taille décroissante (dans notre cas 5 ; 2.5 ; 1.25 ; ...). Cette méthode est basée sur le principe que l'image du grain va correspondre au nombre de boîtes en fonction de leur taille, cela peut être représenté par la formule suivante :

$$N(X>x)=kx^{-DF}$$

-Equation IV-1-

x : dimension des boîtes

$N(X>x)$: nombre des boîtes

K : constante

D_F : dimension fractale

En traçant dans un graphe logarithmique le nombre de boîtes en fonction de leur dimension, la dimension fractale est obtenue suivant la pente la mieux adaptée à la ligne et peut être calculée par l'équation suivante :

$$D_F = -m$$

- Equation (IV-2)-

m : la pente de la droite la mieux adaptée à l'équation N° (IV-1)

IV-11-1) Exemple d`application (un grain de marne de forme sous arrondie de 12.5 mm avant essai gel /dégel)



Figure IV-110: grain de marne de forme sous Arrondie 12.5mm

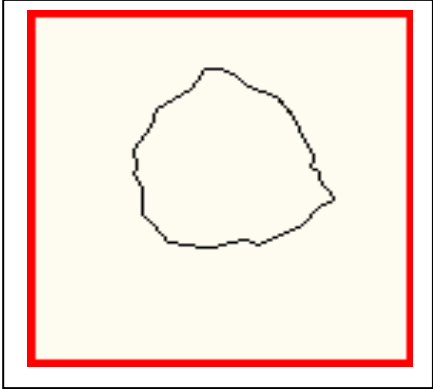


Figure IV-111: entourage du grain

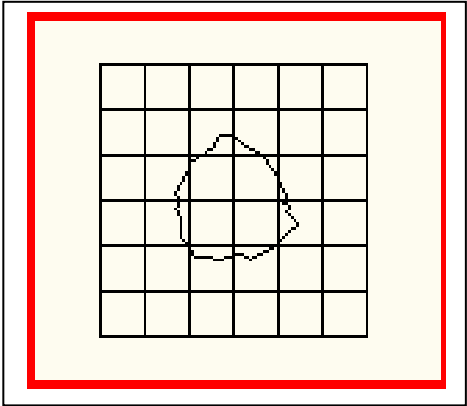


Figure IV-112: grain sous maillage de Caro de 5mm

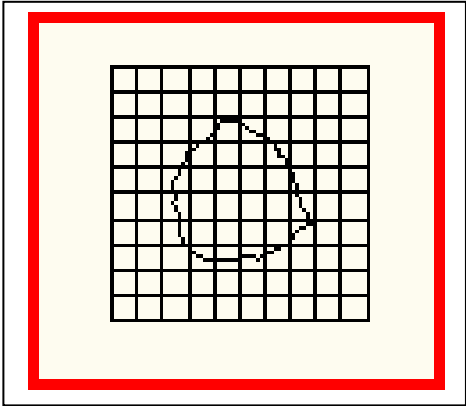


Figure IV-113: grain sous maillage de Caro de 2.5 mm

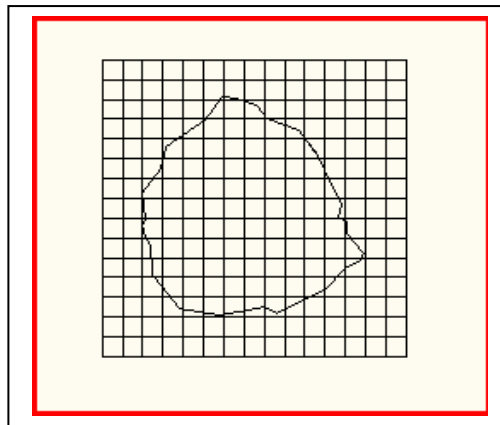


Figure IV-114: grain sous maillage de Caro de 1.25 mm

Tableau IV-36: nombre de Caro calculée des maillages des Caro

Dimension du Carreau	5 mm	2.5 mm	1.25 mm
Nombres de Carreaux	10	16	33

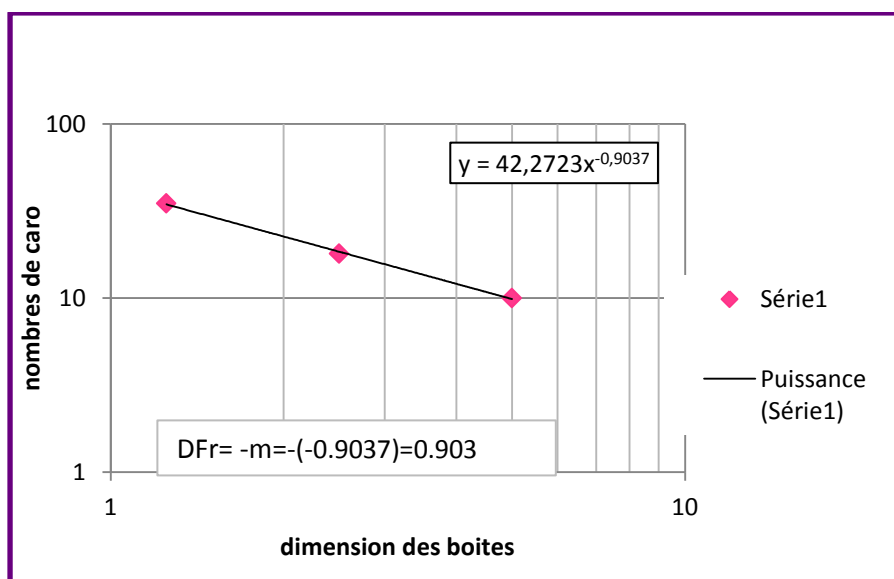


Figure IV-115 : courbe de tendance et calcul de la dimension fractale du grain par la méthode des boîtes

IV-11-2) Essai de gel /dégel

Les valeurs des dimensions fractales et résultats obtenue des différents diamètres des 4 matériaux sont représentés si dessous :

Tableau IV-37 : Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites de la marne sous arrondie

Diamètre des grains	Avant essai	Après le 1 er cycle	Après le 5eme cycle	Après le 6eme cycle	Après le 7 eme cycle	Après le 8 eme cycle	Après le 1 0 eme cycle
16	1.0321	1.0476	1.0577	1.1240	1.1813	1.1813	1.2075
12.5	1.1240	1.1240	1.1401	1.1893	1.1610	1.1008	1.0000
10	1.0294	1.0577	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9372
8	1.1962	1.2297	1.2240	1.2297	1.2925	1.2297	1.2297
6.3	1.0437	1.1610	1.1610	1.1610	1.3502	1.3502	1.3502
5	1.2513	1.3502	1.3502	1.7297	1.5000	1.5000	1.5000
3.15	1.5850	1.4037	1.4037	1.4037	1.4037	1.4037	1.4037

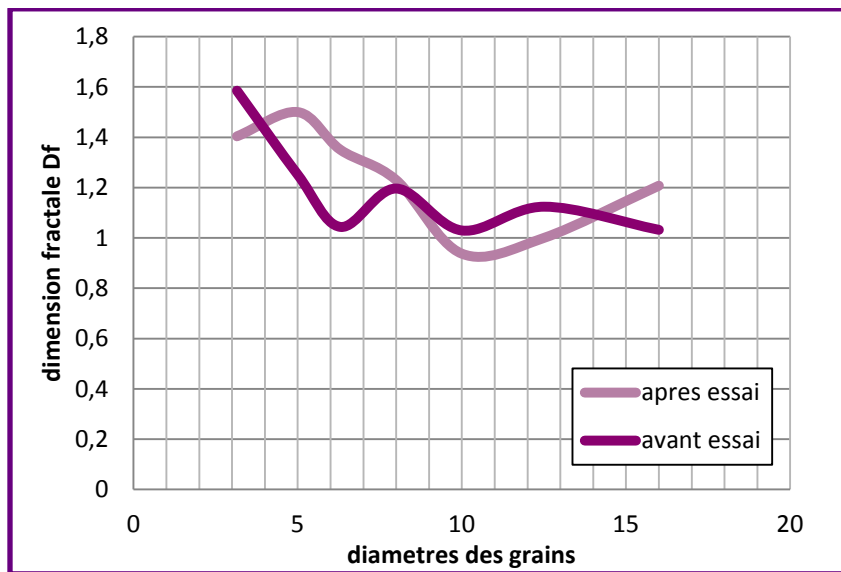


Figure IV-116 : Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains de la marne de forme sous arrondie

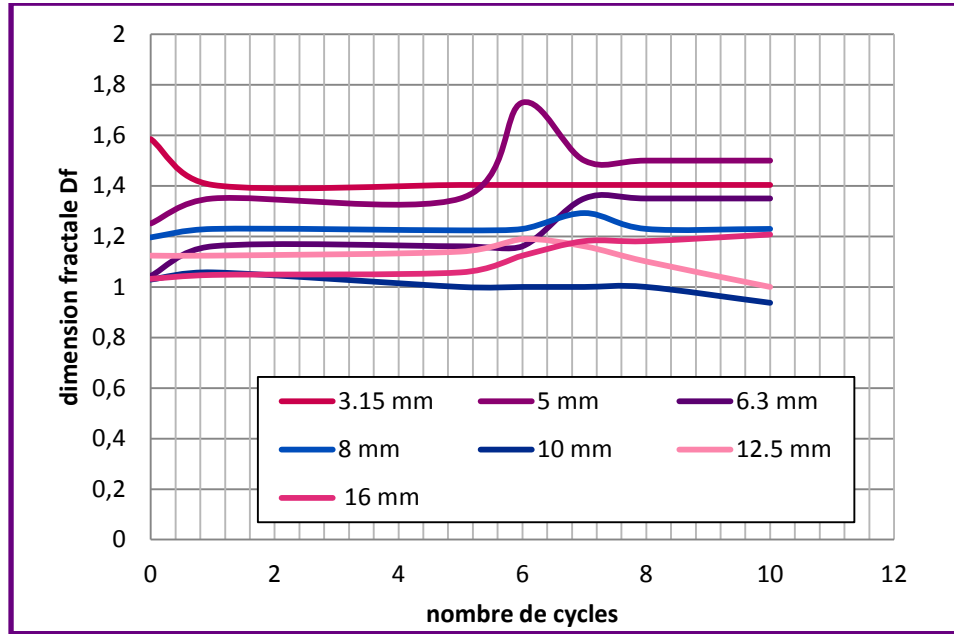


Figure IV-117 : Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains de la marne de forme sous arrondie

Tableau IV-38 : Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites de la marne anguleuse

Diamètre des grains	Avant essai	Après le 1 er cycle	Après le 5eme cycle	Après le 6eme cycle	Après le 7 eme cycle	Après le 8 eme cycle	Après le 1 0 eme cycle
16	0.9603	0.9603	1.0577	1.0437	1.0437	1.2075	1.2075
12.5	1.0646	1.1846	1.2618	1.2618	1.2075	1.2075	1.1112
10	1.1427	1.2010	1.1112	1.1112	1.1610	1.1610	1.0437
8	1.1962	1.1962	1.1962	1.1962	1.1610	1.1610	1.1240
6.3	1.2925	1.1240	1.0850	1.0850	1.0850	1.0437	1.0437
5	1.0000	1.2075	1.2925	1.2925	1.5000	1.5000	1.5000
3.15	1.0577	1.2925	1.5850	1.5000	1.5000	1.5000	1.6610

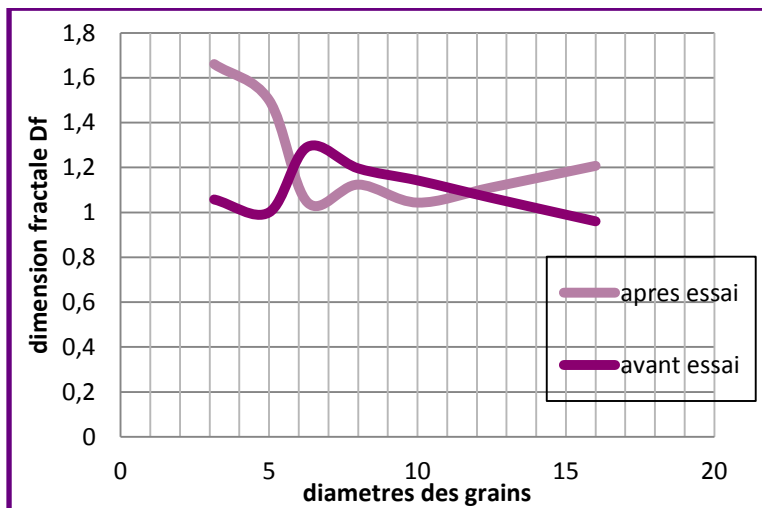


Figure IV-118 : Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains de la marne de forme anguleuse

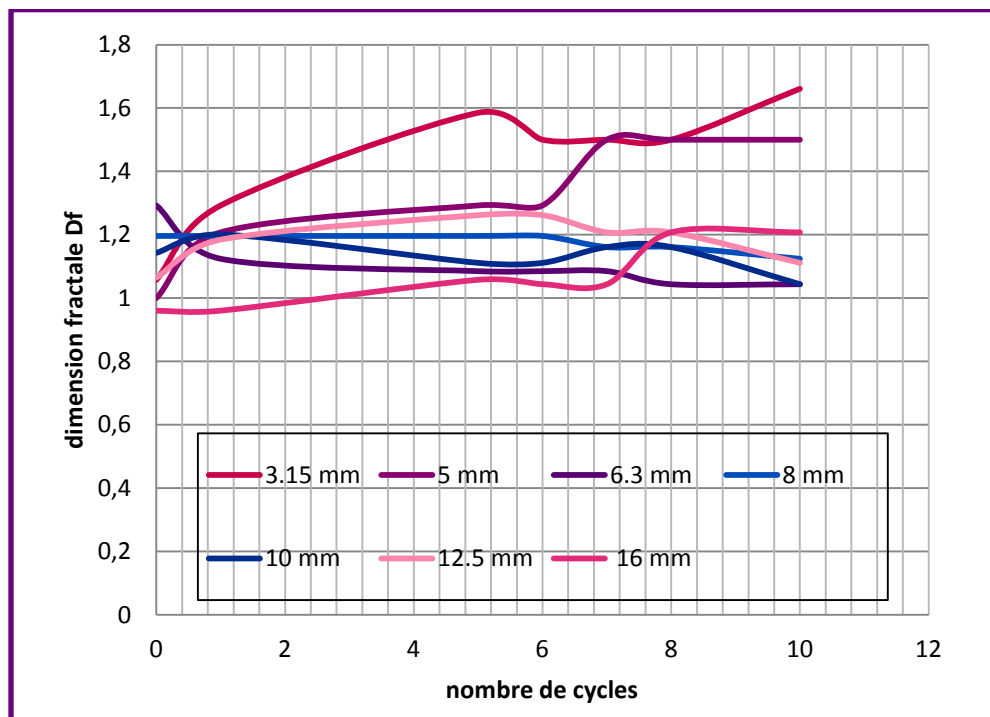


Figure IV-119 : Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains de la marne de forme anguleuse

Tableau IV-39: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boîtes de la marne allongée

Diamètre des grains	Avant essai	Après le 1 er cycle	Après le 5eme cycle	Après le 6eme cycle	Après le 7 eme cycle	Après le 8 eme cycle	Après le 1 0 eme cycle
16	0.9164	1.0149	1.0149	1.0963	1.2165	1.2165	1.2165
12.5	1.0776	1.0734	1.0850	1.1315	1.1315	1.5437	1.5437
10	1.2075	1.2722	1.2722	1.0253	1.0253	1.0253	1.2925
8	1.1365	1.1365	1.0000	1.0294	1.1610	1.1610	1.4037
6.3	1.1610	1.1893	1.2165	1.2165	1.4534	1.6240	1.4037
5	1.3685	1.3685	1.3502	1.2925	1.2925	1.2925	1.2925
3.15	1.3502	1.5850	1.5850	1.5850	1.5850	1.5850	1.5850

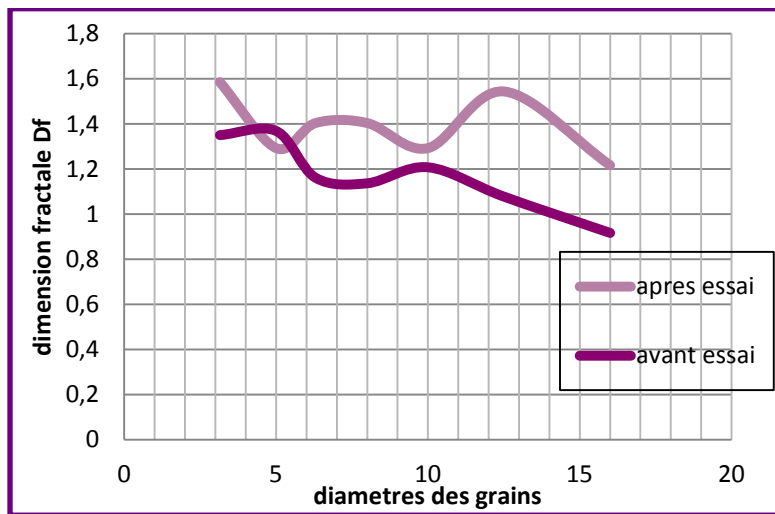


Figure IV-120: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains de la marne de forme allongée

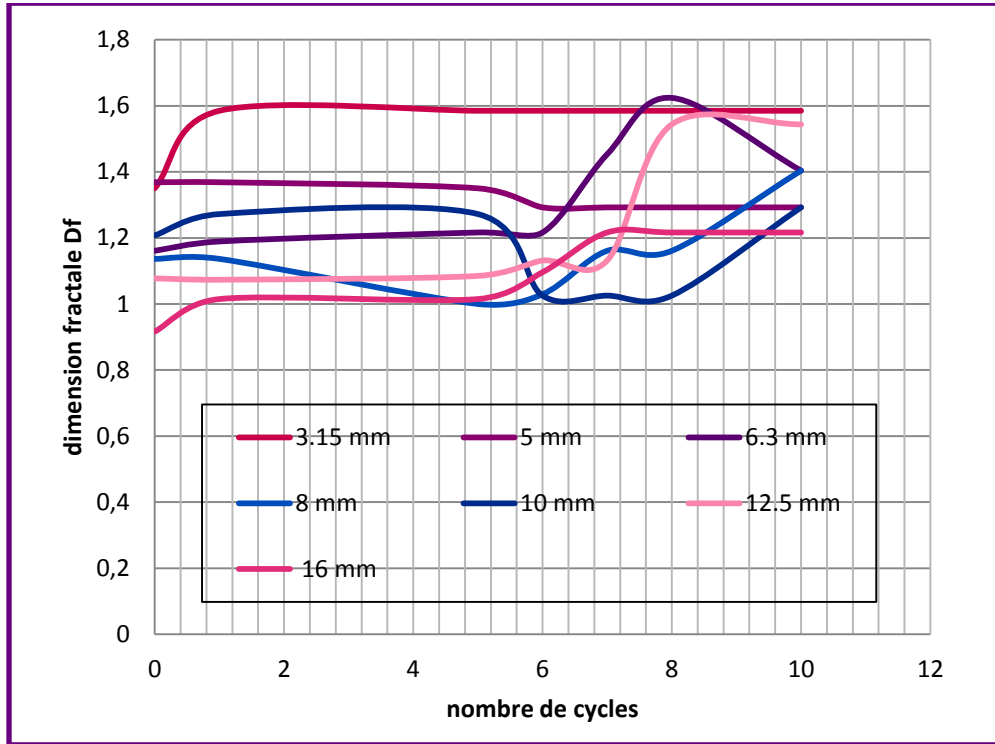


Figure IV-121: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains de la marne de forme allongée

Tableau IV-40: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boîtes du schiste sous arrondie

Diamètre des grains	Avant essai	Après le 1 er cycle	Après le 5eme cycle	Après le 6eme cycle	Après le 7 eme cycle	Après le 8 eme cycle	Après le 1 0 eme cycle
16	0.8685	1.0577	1.1240	1.1240	1.1240	1.1401	1.1401
12.5	1.0000	1.0178	1.1047	1.0963	1.0963	1.0734	1.1610
10	1.0734	1.0963	1.0588	1.0588	1.1962	1.1962	1.1610
8	1.3219	1.3502	1.3219	1.2925	1.2925	1.2618	1.2618
6.3	1.0850	1.0850	1.0850	1.0850	1.0850	1.0850	1.0437
5	1.0000	1.0000	0.9534	1.1610	1.1610	1.1610	1.1610
3.15	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.6610	1.6610

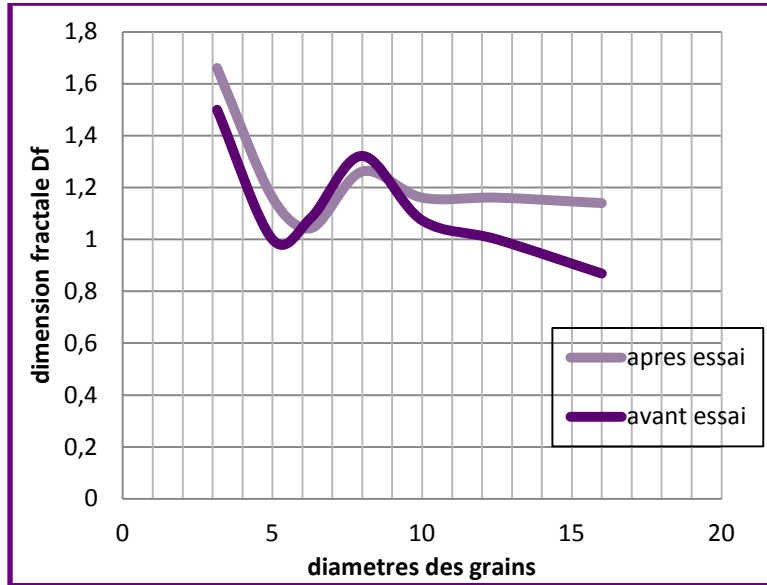


Figure IV-122 : Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains du schiste de forme sous arrondie

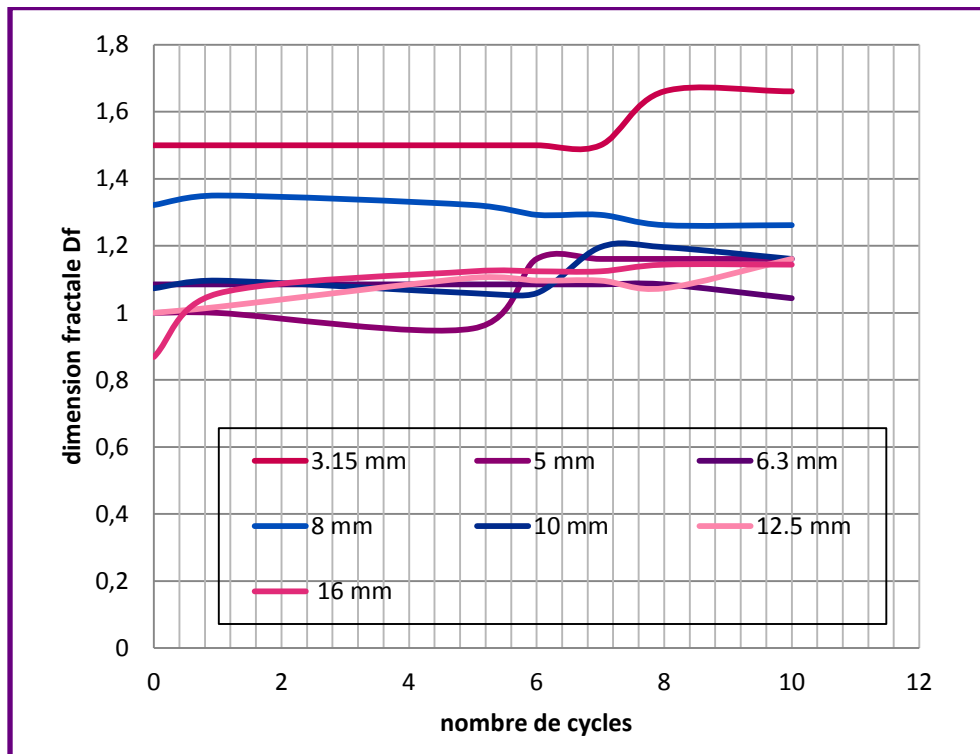


Figure IV-123: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains du schiste de forme sous arrondie

Tableau IV-41: valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boîtes du schiste anguleux

Diamètre des grains	Avant essai	Après le 1 er cycle	Après le 5eme cycle	Après le 6eme cycle	Après le 7 eme cycle	Après le 8 eme cycle	Après le 1 0 eme cycle
16	1.0628	1.0628	0.9771	0.9771	0.9771	1.0000	1.0253
12.5	1.0715	1.0476	1.0476	1.0850	1.0850	1.2075	1.2075
10	1.1240	1.0850	1.0437	1.0000	1.0734	1.0000	0.9771
8	0.9183	0.9183	0.9465	1.0294	1.0294	1.0577	1.0294
6.3	1.1962	1.1962	1.1962	1.2075	1.2075	1.2075	1.2075
5	1.0437	1.4037	1.4037	1.4037	1.4037	1.4534	1.4534
3.15	1.6610	1.6610	1.5850	1.4037	1.2925	1.2925	1.2925

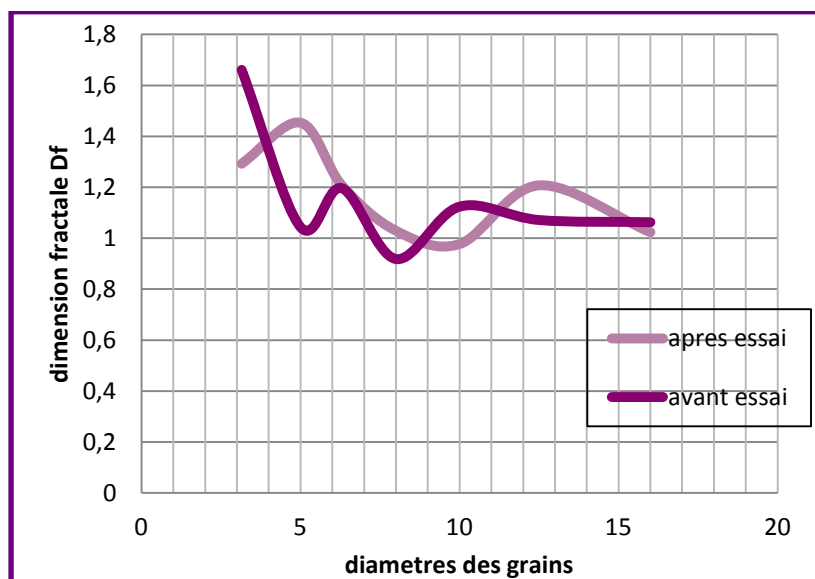


Figure IV-124 : Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains du schiste de forme anguleuse

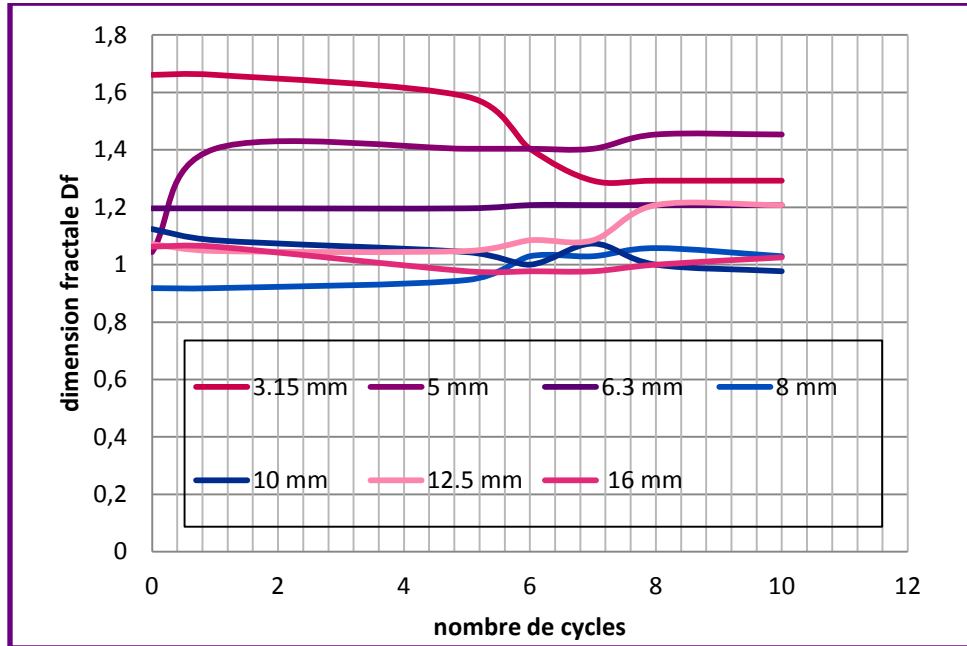


Figure IV-125: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains du schiste de forme anguleuse

Tableau IV-42: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites du schiste allongée

Diamètre des grains	Avant essai	Après le 1 er cycle	Après le 5eme cycle	Après le 6eme cycle	Après le 7 eme cycle	Après le 8 eme cycle	Après le 10 eme cycle
16	0.9290	0.9879	1.0253	1.0253	1.0137	1.0137	1.0776
12.5	1.1448	1.1610	1.1610	1.2203	1.2203	1.2075	1.2075
10	0.9797	0.9797	1.0646	1.0646	1.0437	1.0437	1.0437
8	1.0850	1.2925	1.2925	1.2925	1.5294	1.5294	1.3685
6.3	1.0577	1.1893	1.1962	1.1962	1.2075	1.2075	1.2925
5	1.2297	1.3315	1.3315	1.3315	1.3315	1.3315	1.5000
3.15	1.2925	1.2925	1.2925	1.2297	1.2297	1.1610	1.5850

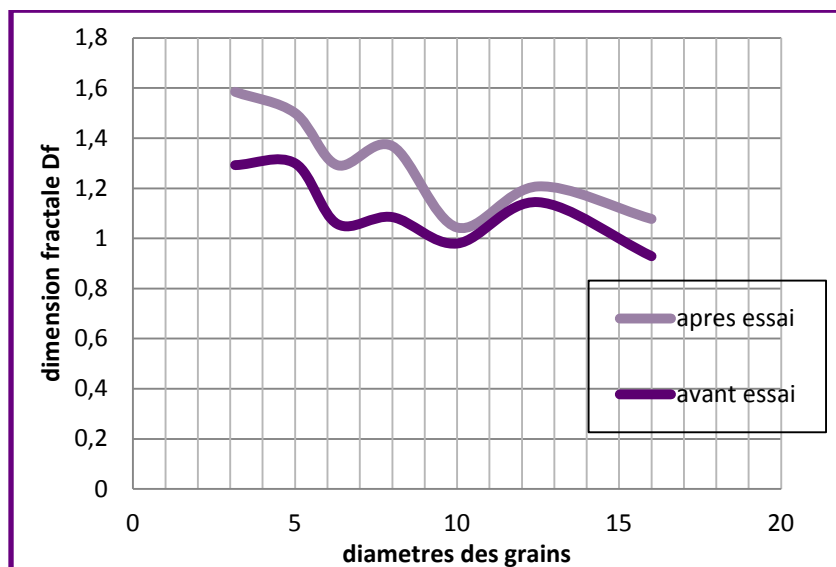


Figure IV-126: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains du schiste de forme allongée

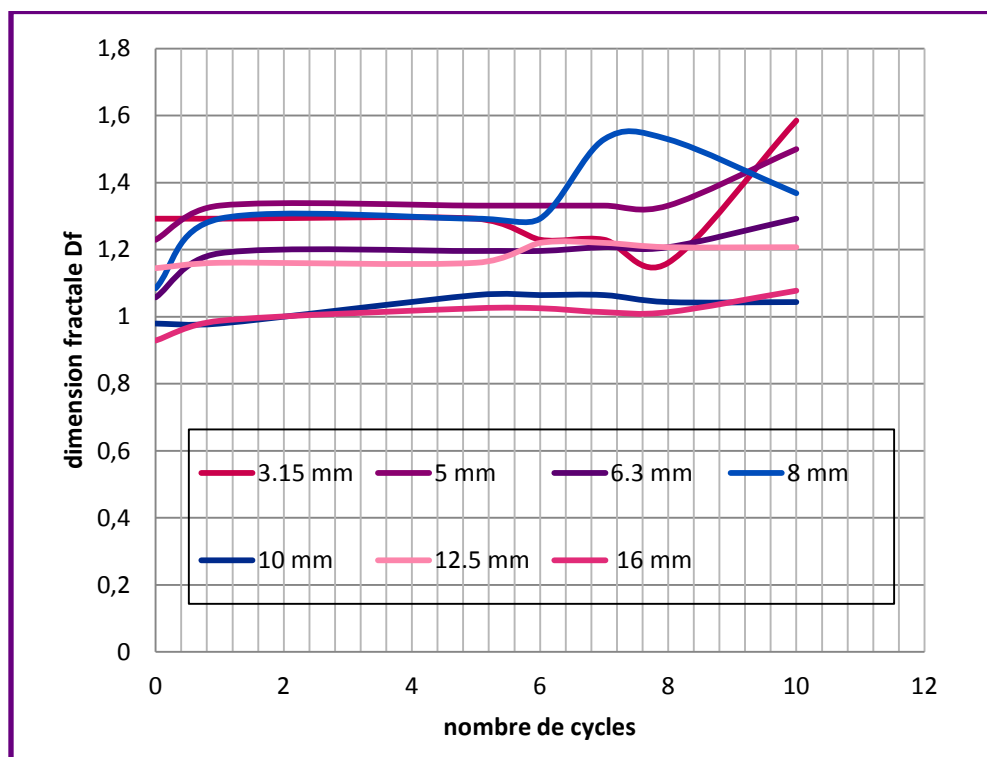


Figure IV-127: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains du schiste de forme allongée

Tableau IV-43: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites du gré anguleux

Diamètre des grains	Avant essai	Après le 1 er cycle	Après le 5eme cycle	Après le 6eme cycle	Après le 7 eme cycle	Après le 8 eme cycle	Après le 1 0 eme cycle
16	0.9423	0.9423	0.9534	0.9534	0.9834	0.9834	0.9834
12.5	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0577	1.0577	1.0577
10	1.0294	1.0294	1.2925	1.2925	1.2618	1.2618	1.2618
8	1.1240	1.1240	1.1240	1.1240	1.1240	1.1240	1.1240
6.3	1.1240	1.2075	1.2075	1.2075	1.2075	1.2075	1.2075
5	1.3502	1.3502	1.3502	1.3502	1.3502	1.7925	1.7925
3.15	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000

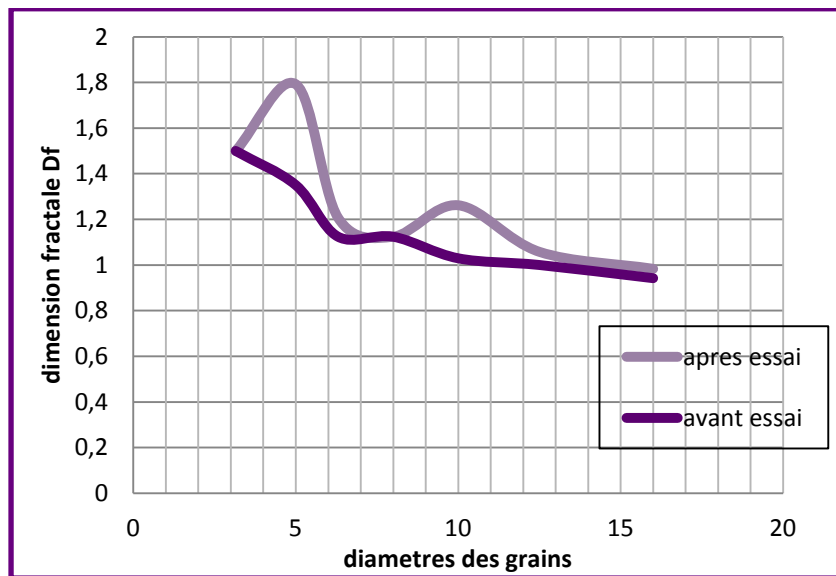


Figure IV-128: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains de gré de forme anguleuse

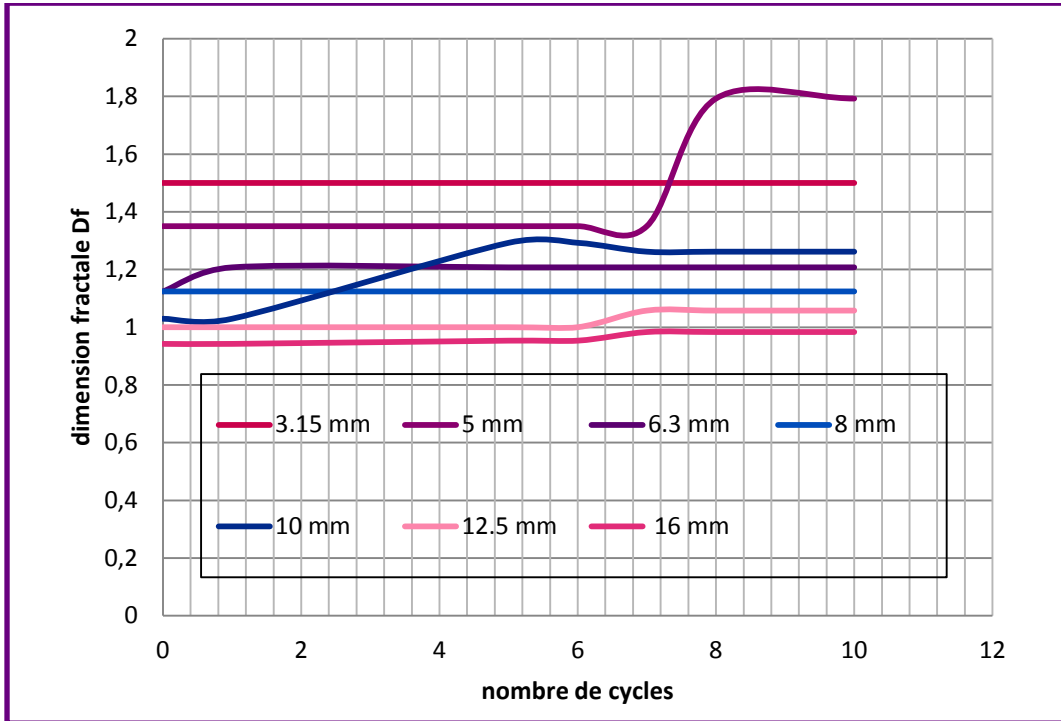


Figure IV-129: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains de gré de forme anguleuse

Tableau IV-44: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boîtes du gré sous arrondi

Diamètre des grains	Avant essai	Après le 1 ^{er} cycle	Après le 5 ^{eme} cycle	Après le 6 ^{eme} cycle	Après le 7 ^{eme} cycle	Après le 8 ^{eme} cycle	Après le 10 ^{eme} cycle
16	0.9848	0.9848	0.9848	0.9848	1.0321	1.0321	1.1008
12.5	0.9771	0.9771	0.9771	0.9771	0.9534	0.9534	0.9534
10	1.0850	1.0850	1.0850	1.0850	1.0850	1.0577	1.0577
8	1.2297	1.2297	1.2297	1.1962	1.1962	1.1962	1.1962
6.3	1.0437	1.0437	1.0437	1.0437	1.0437	1.0437	1.0437
5	1.1112	1.1112	1.1112	1.1112	1.1112	1.1112	1.1112
3.15	1.6610	1.6610	1.6610	1.6610	1.6610	1.6610	1.6610

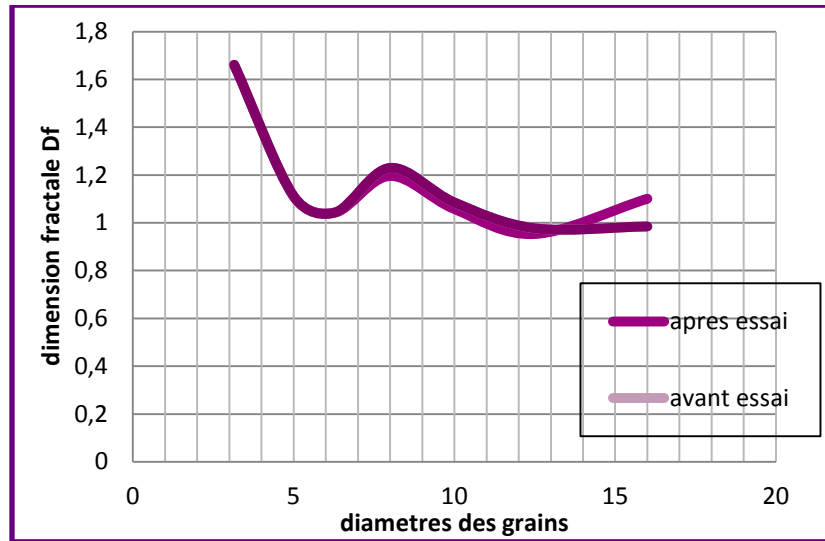


Figure IV-130: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains de gré de forme sous arrondie

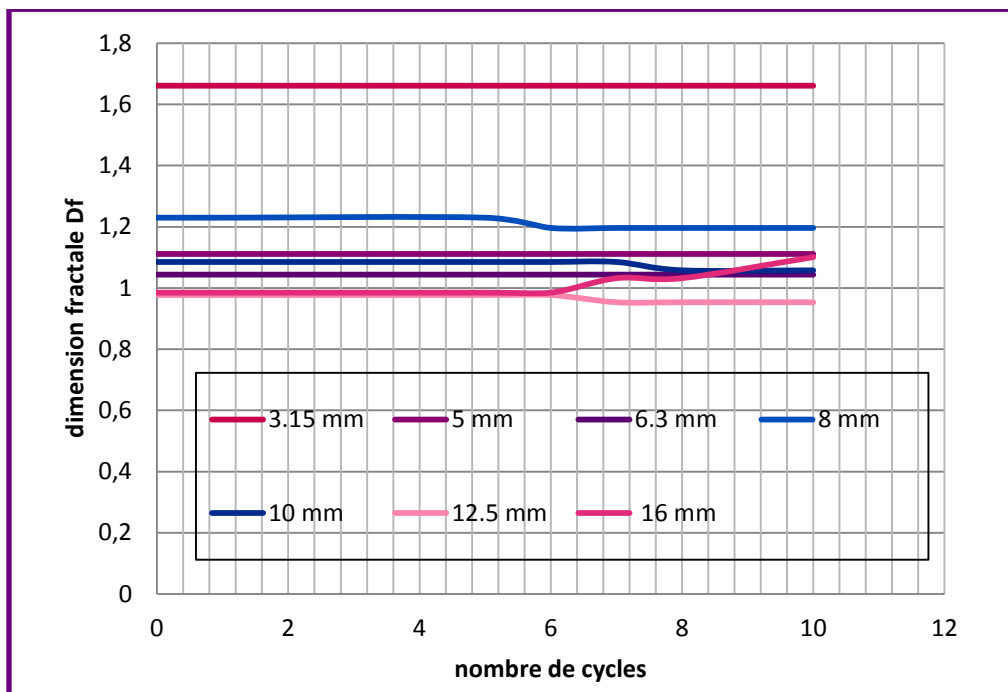


Figure IV-131: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains de gré de forme sous arrondie

Tableau IV-45: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites de la pegmatite

Diamètre des grains	Avant essai	Après le 1 er cycle	Après le 5eme cycle	Après le 6eme cycle	Après le 7 eme cycle	Après le 8 eme cycle	Après le 1 0 eme cycle
16	1.0352	1.0352	1.0352	1.0352	1.0178	1.0577	1.0577
12.5	1.0850	1.0850	1.0850	1.0850	1.0850	1.0646	1.0646
10	1.0000	1.0000	1.0222	1.0222	1.0222	1.0222	1.0222
8	1.2297	1.2297	1.2297	1.2297	1.2297	1.1962	1.1962
6.3	1.1008	1.1008	1.1008	1.5000	1.4037	1.4037	1.4037
5	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.2075	1.2075
3.15	1.3502	1.3502	1.3502	1.3502	1.3502	1.2925	1.2925

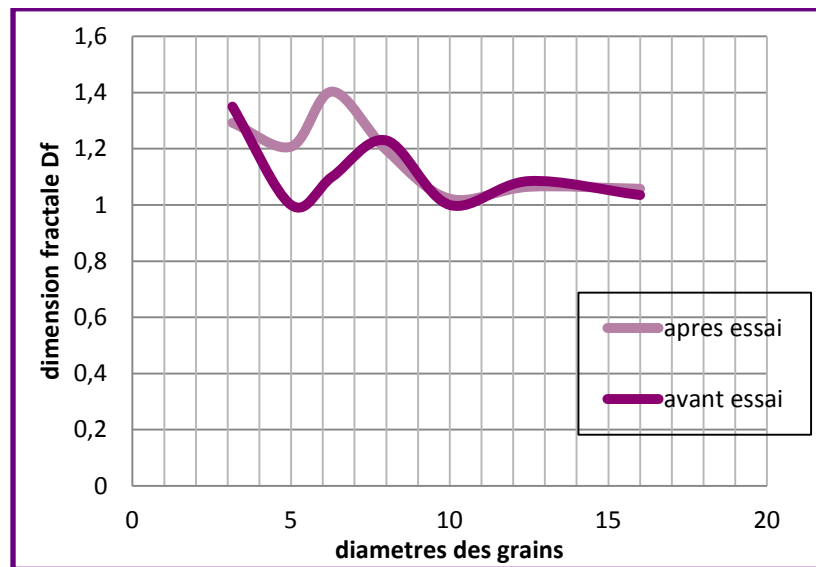


Figure IV-132: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains de la pegmatite

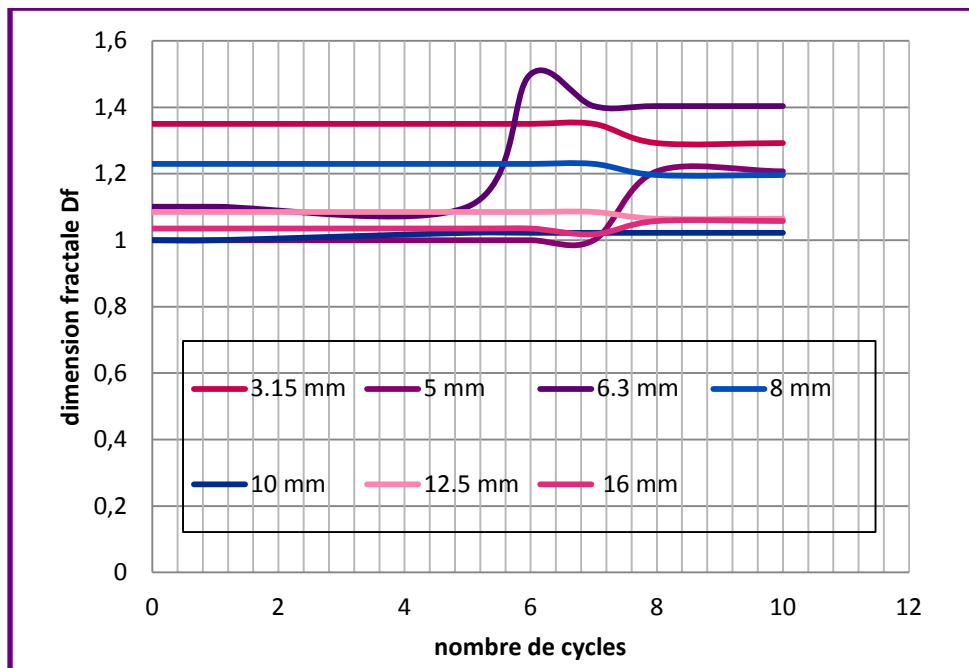


Figure IV-133: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains de la pegmatite

IV-11-3) Essai d’Altérabilité

Les résultats des essais d’altérabilité obtenus sur les différents diamètres des 4 matériaux sont représentés ci-dessous :

Tableau IV-46: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites de la marne sous arrondie

Diamètres des grains	avant	Après 3 jours	Après 3 jours	Après 2 jours	Après 4 jours
16	0.9571	0.9571	0.9571	1.0311	1.0688
12.5	1.0253	1.0253	1.0253	1.1112	1.0000
10	1.0850	1.0850	1.0850	1.1962	1.1962
8	1.2297	1.2297	1.2297	1.1240	1.0437
6.3	1.0850	1.0850	1.0850	1.0850	1.0000
5	1.1610	1.1610	1.1610	1.1610	1.3502
3.15	1.6610	1.6610	1.6610	1.6610	1.5850

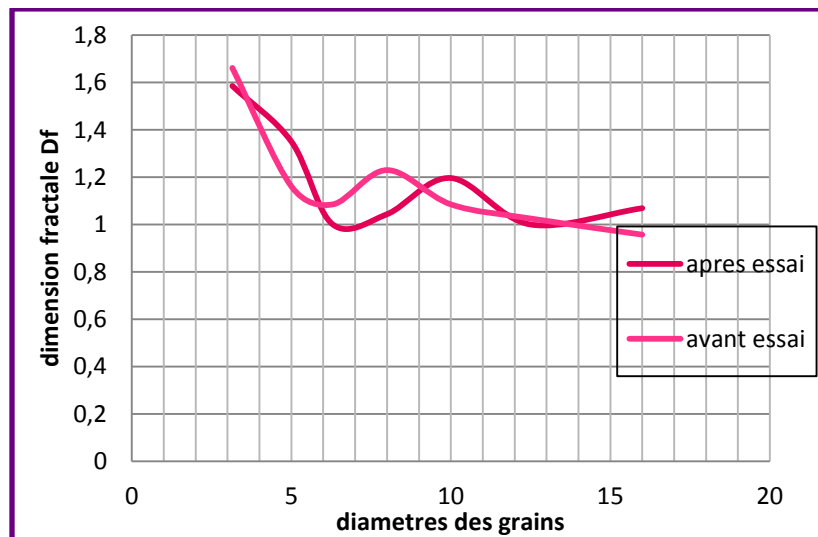


Figure IV-134: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains de la marne de forme sous arrondie

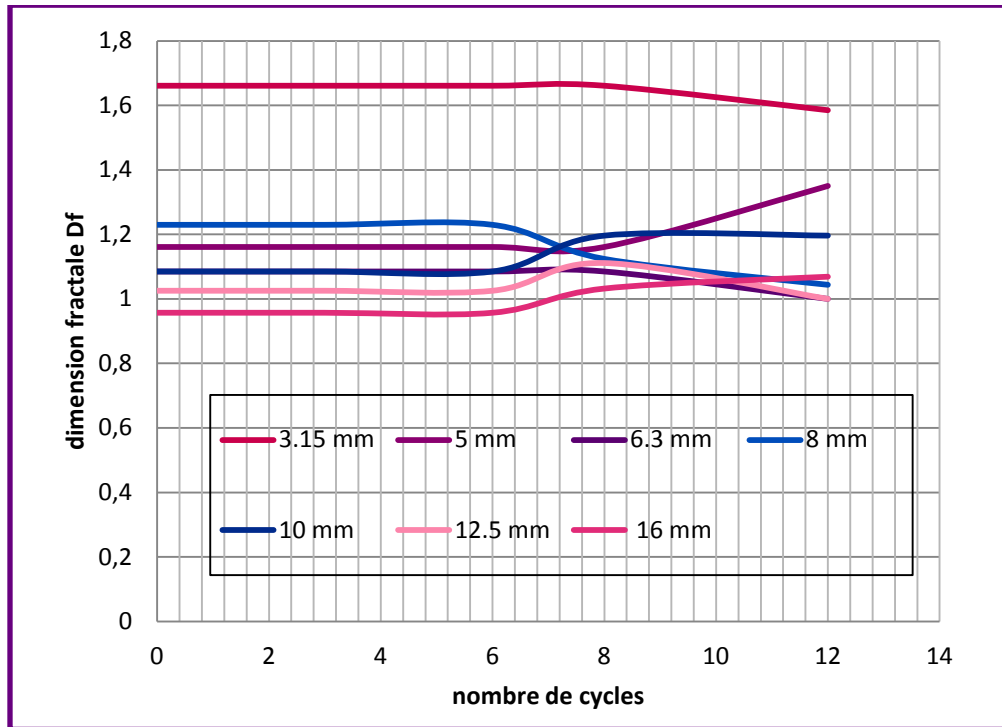


Figure IV-135: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains de la marne de forme sous arrondie

Tableau IV-47: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites de la marne anguleuse

Diamètres des grains	avant	Après 3 jours	Après 3 jours	Après 2 jours	Après 4 jours
16	1.0662	1.0662	1.0662	1.0662	1.0405
12.5	1.1850	1.1185	1.0734	1.0734	1.0498
10	0.9534	0.9534	0.9534	0.9534	1.1365
8	1.1315	1.1315	1.1008	1.1008	1.2618
6.3	1.1962	1.1962	1.3315	1.3315	1.2075
5	1.0437	1.0437	1.0437	1.0437	1.1610
3.15	1.6610	1.6610	1.6610	1.6610	1.6610

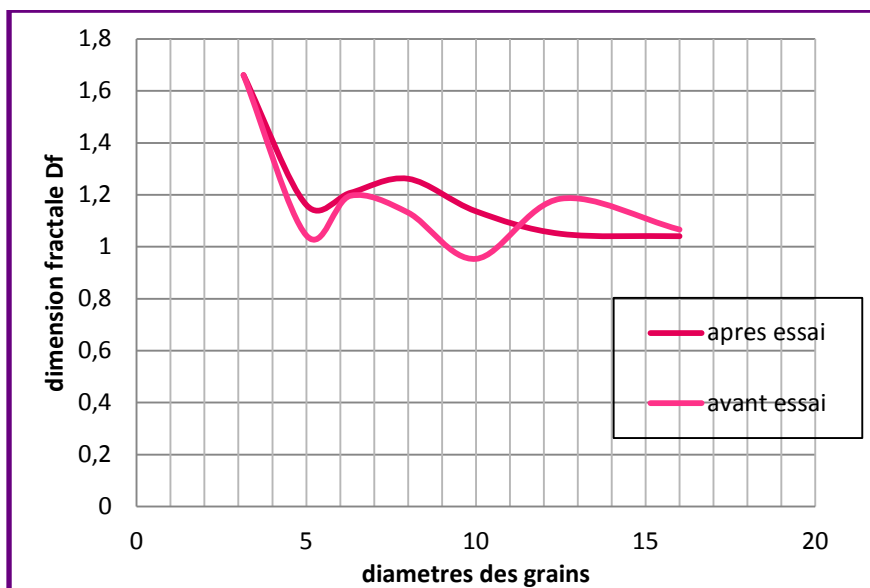


Figure IV-136: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains de la marne de forme anguleuse

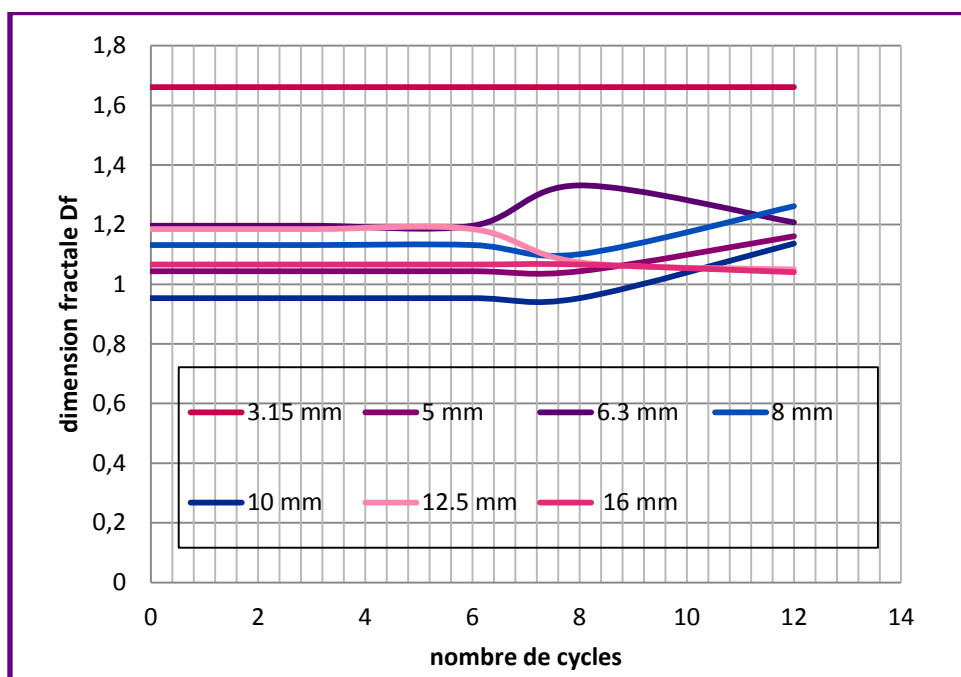


Figure IV-137: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains de la marne de forme anguleuse

Tableau IV-48: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites de la marne allongée

Diamètres des grains	avant	Après 3 jours	Après 3 jours	Après 2 jours	Après 4 jours
16	1.0982	1.0982	1.0982	1.0437	1.1448
12.5	0.9693	0.9693	0.9693	0.9037	0.9037
10	1.0760	1.0760	1.0760	1.0760	1.0646
8	1.2297	1.2297	1.2297	1.2297	1.1365
6.3	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.2925
5	1.0437	1.0437	1.0437	1.0437	1.0577
3.15	1.4534	1.4534	1.4534	1.4534	1.4037

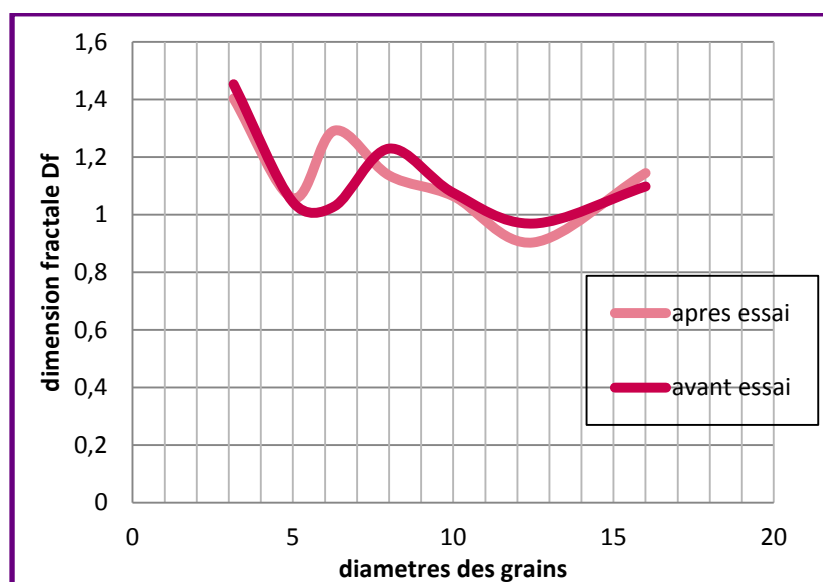


Figure IV-138: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains de la marne de forme allongée

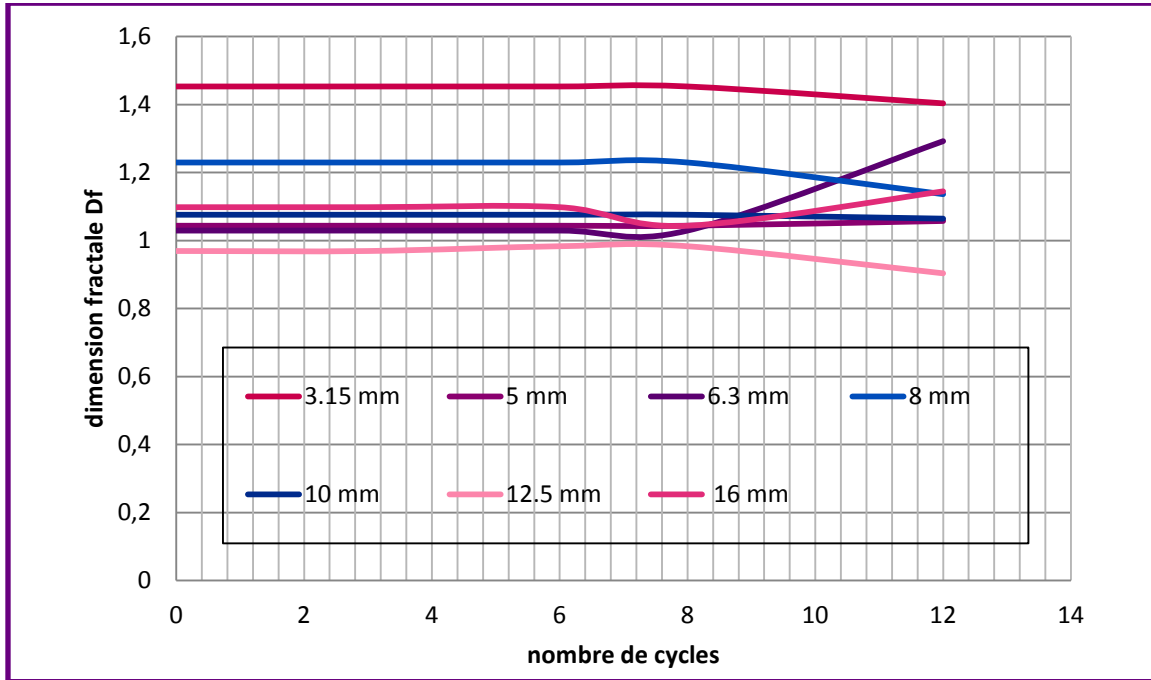


Figure IV-139: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains de la marne de forme allongée

Tableau IV-49: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites du schiste sous arrondie

Diamètres des grains	avant	Après 3 jours	Après 3 jours	Après 2 jours	Après 4 jours
16	0.9116	0.9116	0.9116	1.0688	1.0688
12.5	1.0178	1.0178	1.0178	1.0390	1.0963
10	1.1401	1.1401	1.1401	1.1365	1.1365
8	1.3219	1.3219	1.3219	1.3219	1.3219
6.3	1.2618	1.2618	1.2618	1.2618	1.1962
5	1.1610	1.1610	1.1610	1.1610	1.1610
3.15	1.1610	1.1610	1.1610	1.1610	1.1610

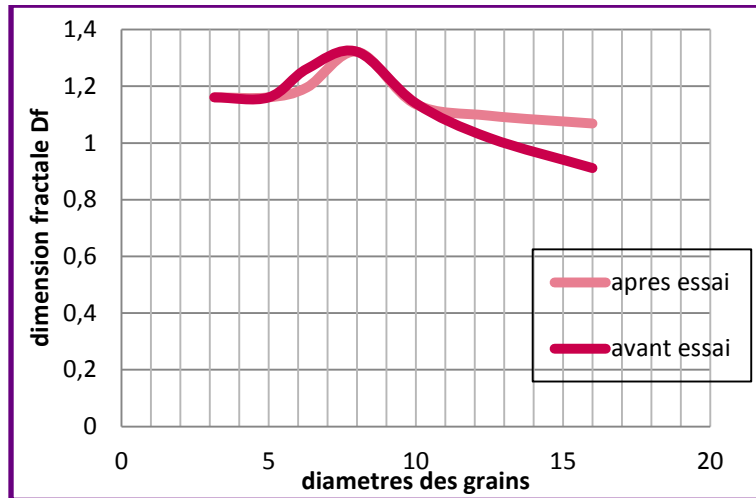


Figure IV-140: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains du schiste de forme sous arrondie

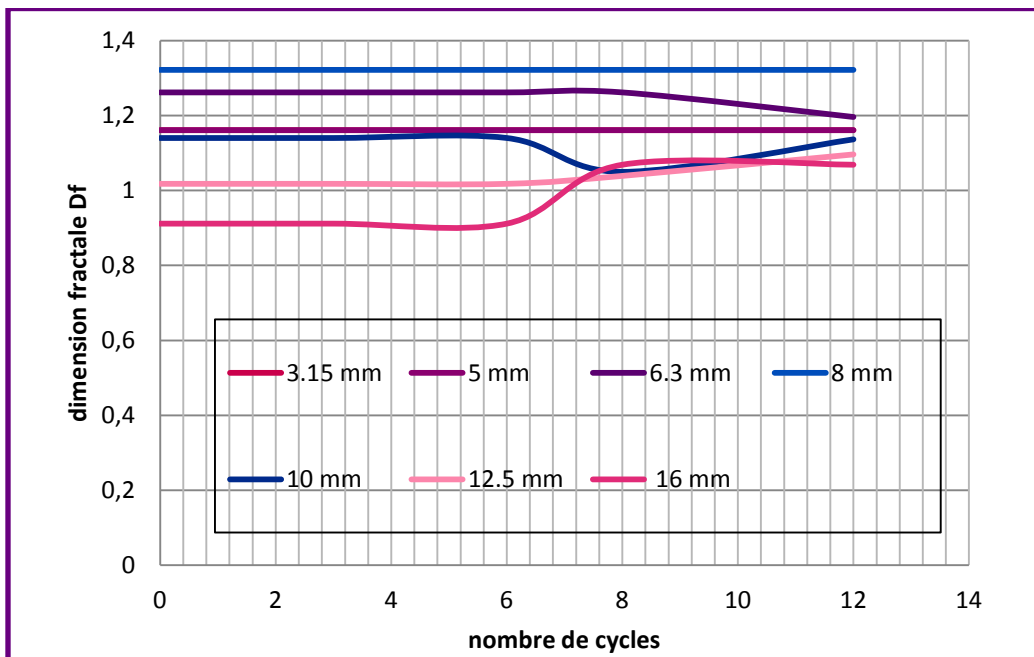


Figure IV-141: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains du schiste de forme sous arrondie

Tableau IV-50: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boîtes du schiste anguleux

Diamètres des grains	avant	Après 3 jours	Après 3 jours	Après 2 jours	Après 4 jours
16	1.0577	1.0577	1.0577	1.0577	1.0577
12.5	1.1163	1.1163	1.1163	1.1163	1.0850
10	1.1240	1.1240	1.1240	1.1240	1.2075
8	1.0498	1.0498	1.0498	1.2165	1.2165
6.3	1.0850	1.0850	1.0850	1.0850	1.0437
5	1.0688	1.0688	1.0688	1.0688	1.5437
3.15	1.2297	1.2297	1.2297	1.1610	1.1610

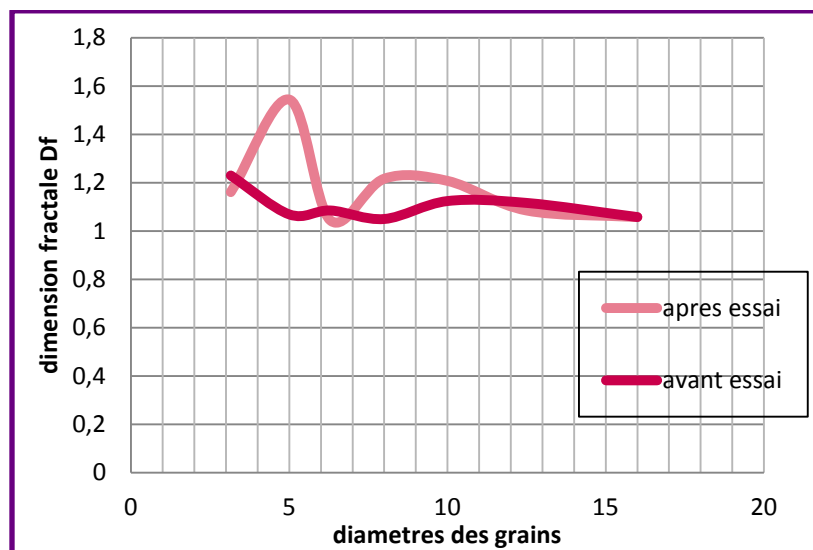


Figure IV-142: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains du schiste de forme anguleuse

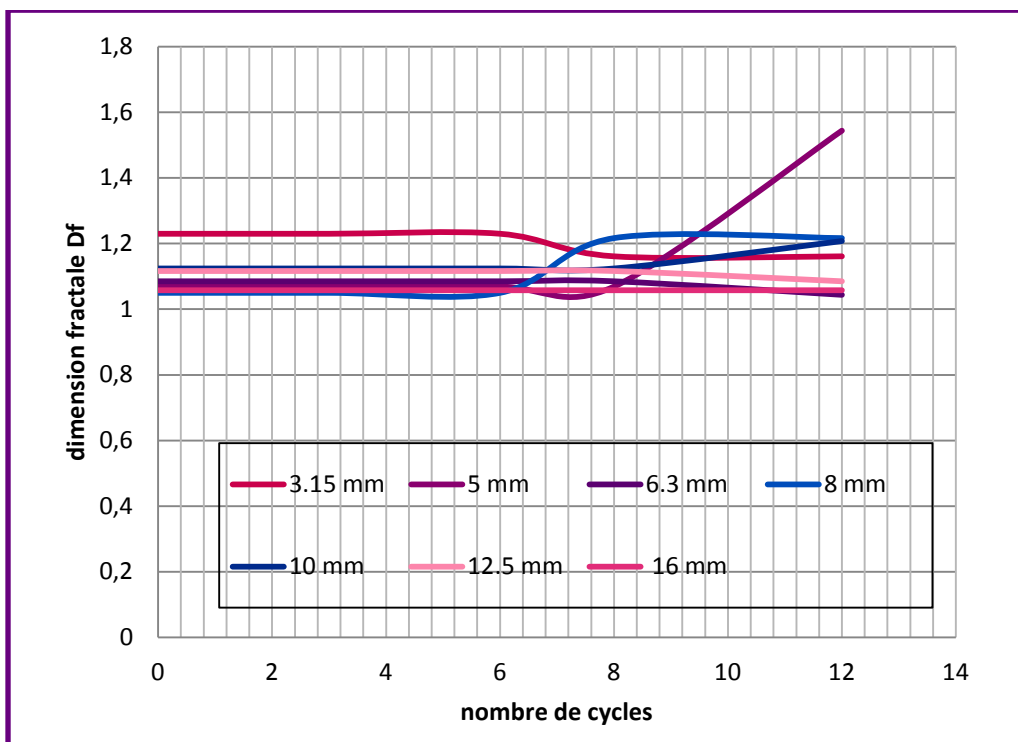


Figure IV-143: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains du schiste de forme anguleuse

Tableau IV-51: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boîtes du schiste allongée

Diamètres des grains	avant	Après 3 jours	Après 3 jours	Après 2 jours	Après 4 jours
16	0.9664	0.9664	0.9664	0.9648	1.0788
12.5	1.0788	1.0788	1.0788	1.0850	0.9664
10	1.0476	1.0476	1.0476	1.1163	1.1610
8	1.0390	1.0390	1.0390	1.0546	1.4037
6.3	1.0522	1.0522	1.0522	1.1610	1.4037
5	1.1610	1.1610	1.1610	1.5850	1.5437
3.15	1.4534	1.4534	1.4534	1.4534	1.4534

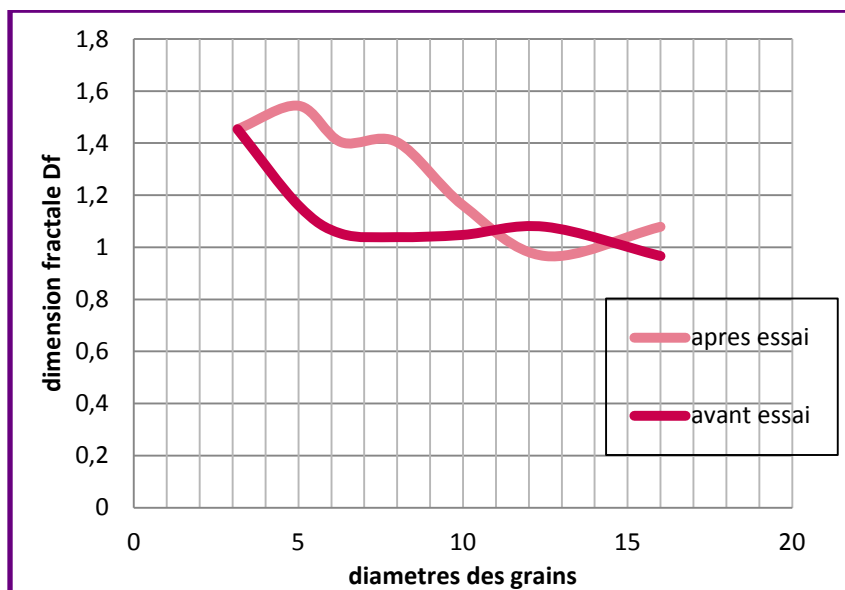


Figure IV-144: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains du schiste de forme allongée

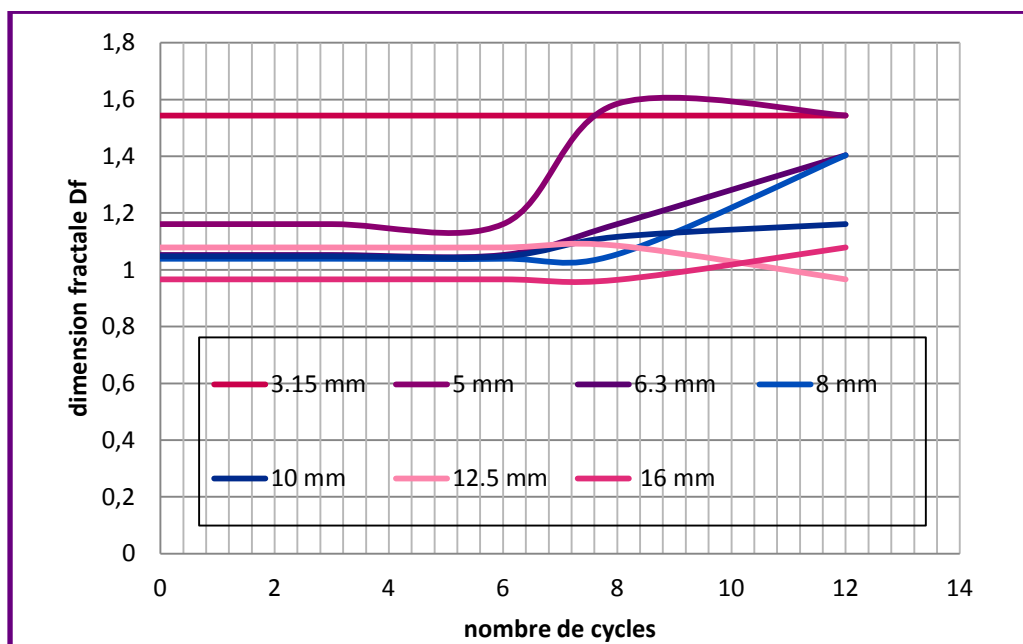


Figure IV-145: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d`essai des grains du schiste de forme allongée

Tableau IV-52: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boîtes du gré sous arrondie

Diamètres des grains	avant	Après 3 jours	Après 3 jours	Après 2 jours	Après 4 jours
16	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
12.5	0.9817	0.9817	0.9817	0.9817	0.9817
10	1.1315	1.1315	1.1315	1.2618	1.2618
8	1.2618	1.2618	1.2618	1.2297	1.1962
6.3	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.1610
5	0.9534	0.9534	0.9534	1.1112	1.1112
3.15	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000

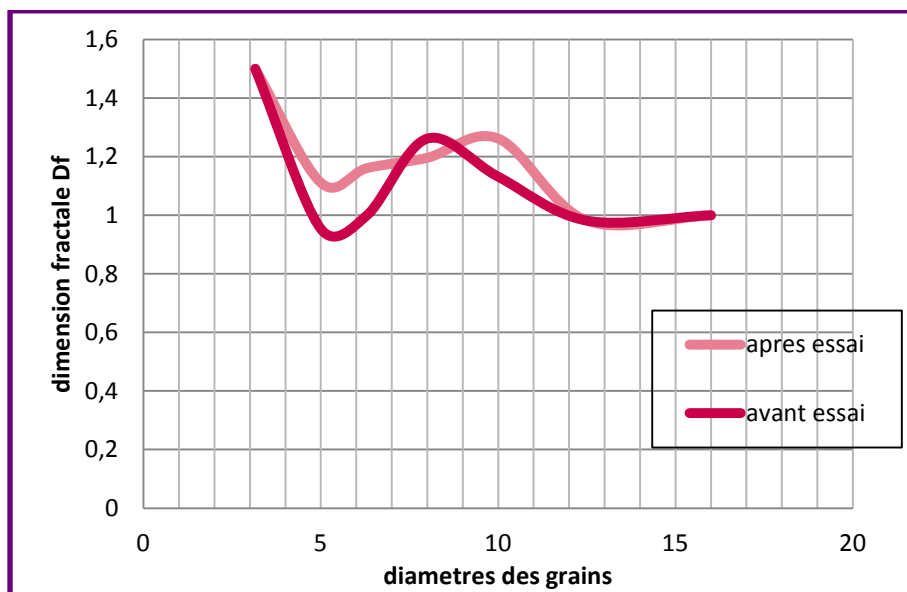


Figure IV-146: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains du gré de forme sous arrondie

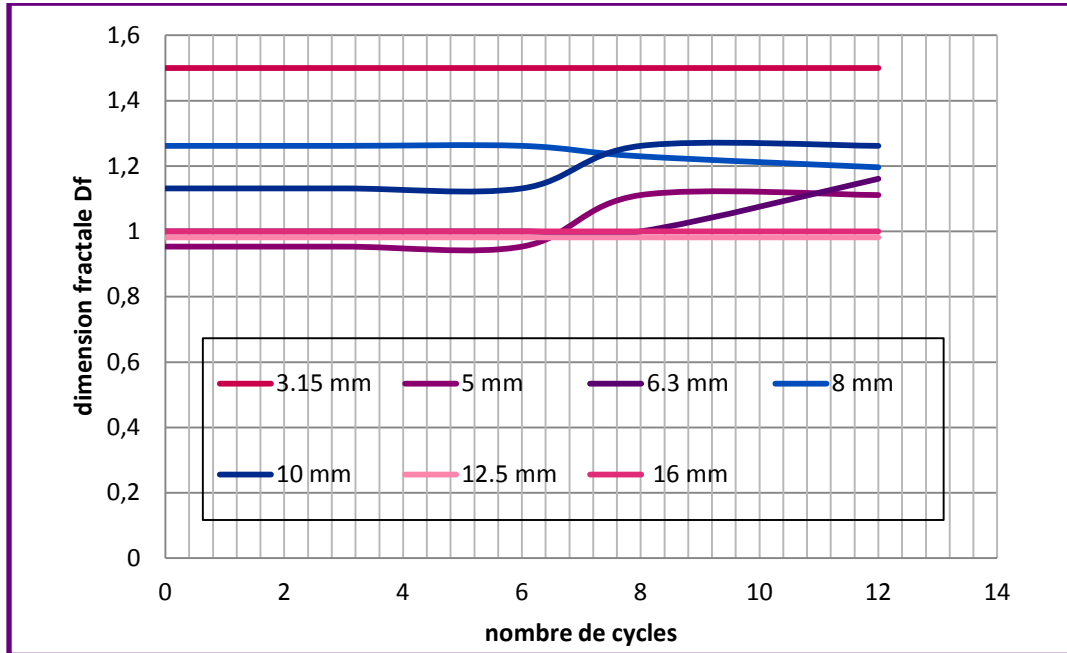


Figure IV-147: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains du gré de forme sous arrondie

Tableau IV-53: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites du gré anguleux

Diamètres des grains	avant	Après 3 jours	Après 3 jours	Après 2 jours	Après 4 jours
16	1.0149	1.0149	1.0149	1.0149	1.0149
12.5	0.9630	0.9630	0.9630	0.9630	0.9630
10	1.2203	1.2203	1.2203	1.2203	1.2010
8	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294	1.0294
6.3	1.1610	1.1610	1.1610	1.1610	1.0850
5	1.3685	1.3685	1.3685	1.2925	1.2513
3.15	1.6610	1.6610	1.6610	1.6610	1.5000

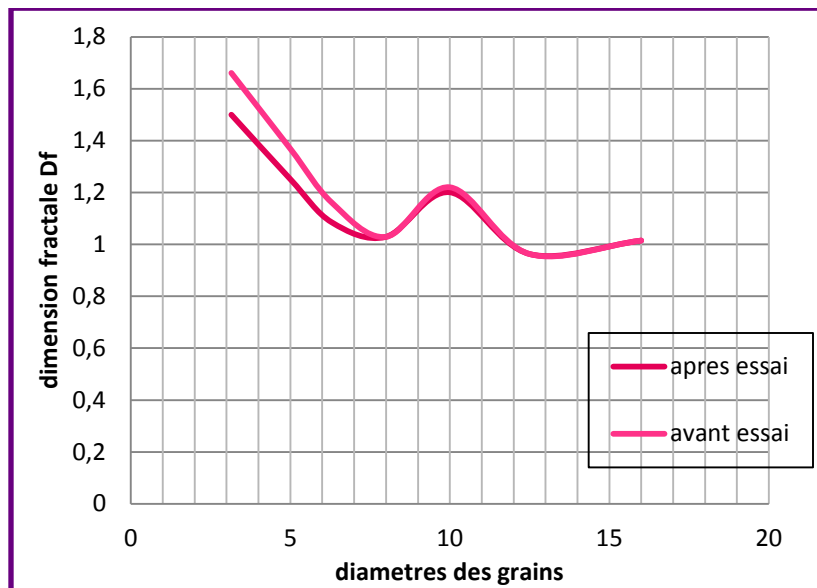


Figure IV-148: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains du gré de forme anguleuse

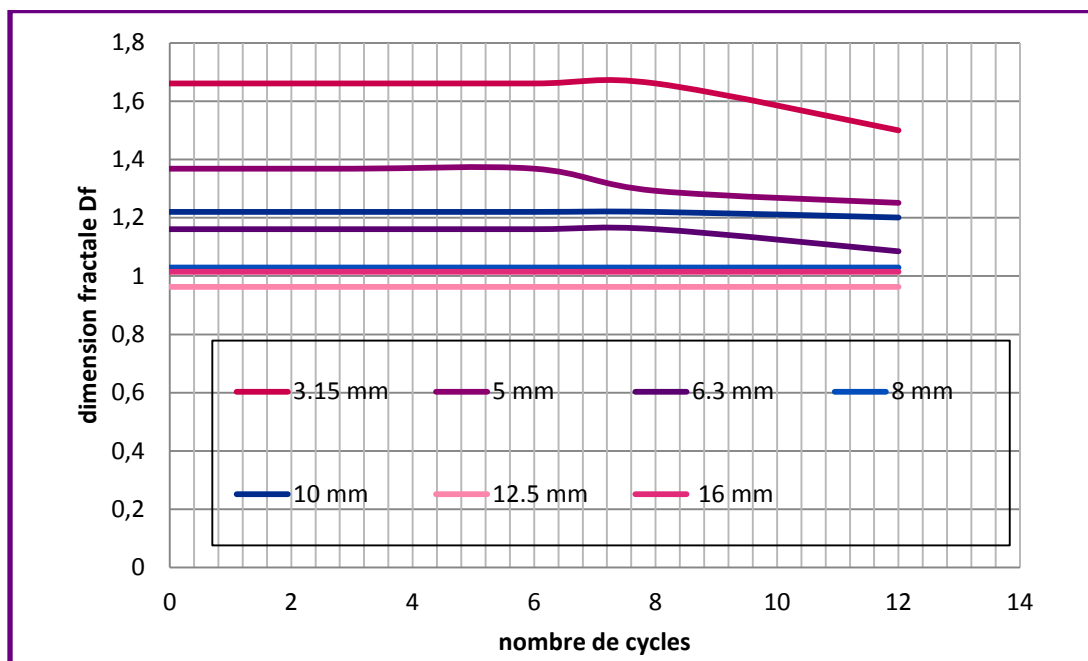


Figure IV-149: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains du gré de forme anguleuse

Tableau IV-54: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites de la pegmatite

Diamètres des grains	avant	Après 3 jours	Après 3 jours	Après 2 jours	Après 4 jours
10	1.0850	1.0850	1.0850	1.0850	1.1846
8	1.2427	1.2427	1.2427	1.2427	1.1610
6.3	1.1008	1.1008	1.1008	1.1610	1.1610
5	1.2075	1.2075	1.2075	1.1610	1.1112
3.15	1.6610	1.6610	1.6610	1.6610	1.6610

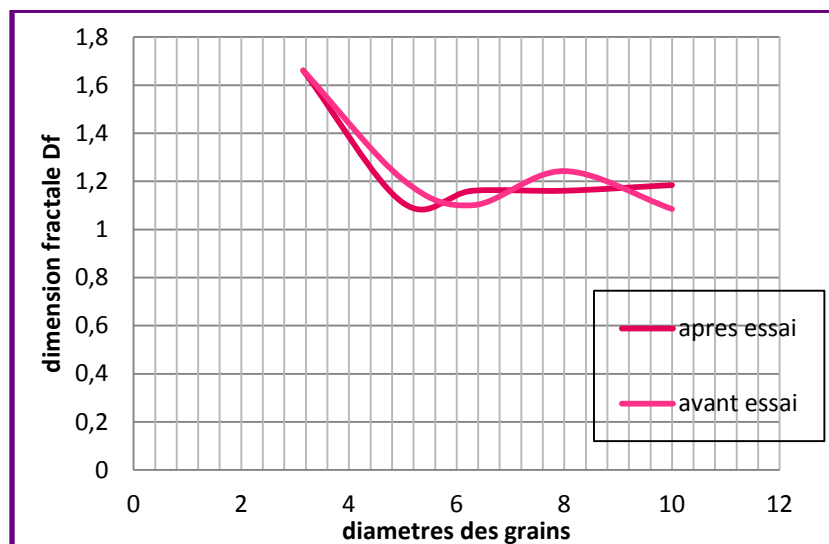


Figure IV-150: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains de pegmatite

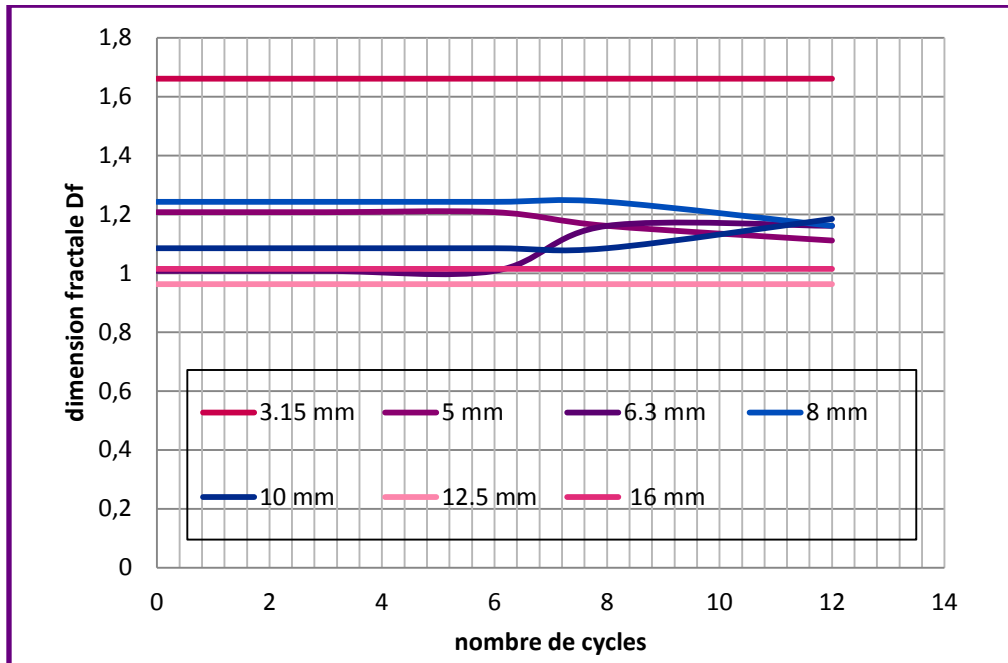


Figure IV-151: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains de la pegmatite

IV-11-4) Essai de dégradabilité

Les résultats de calcul de la dimension fractale portant sur les différents diamètres des 4 matériaux sont représentés ci dessous :

Tableau IV-55: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites de la marne sous arrondie

diamètre des grains	Avant essai	Après le 1 er cycle	Après le 3 Eme cycle	Après le 4 eme cycle
20	1.0577	1.0149	1.1962	1.1962
16	0.9603	0.9860	1.0294	1.1282
12.5	1.0321	1.0321	1.0294	1.0294
10	1.1047	1.1047	1.1610	1.1610

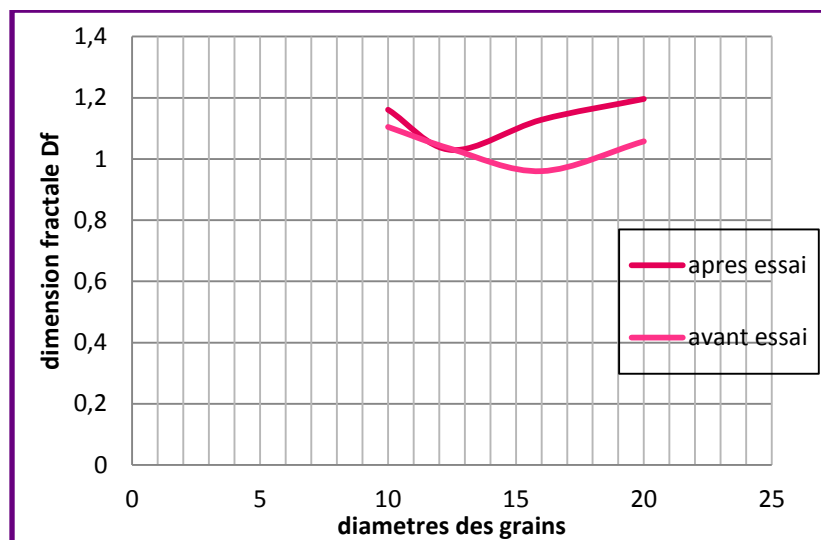


Figure IV-152: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains de marne de forme sous arrondie

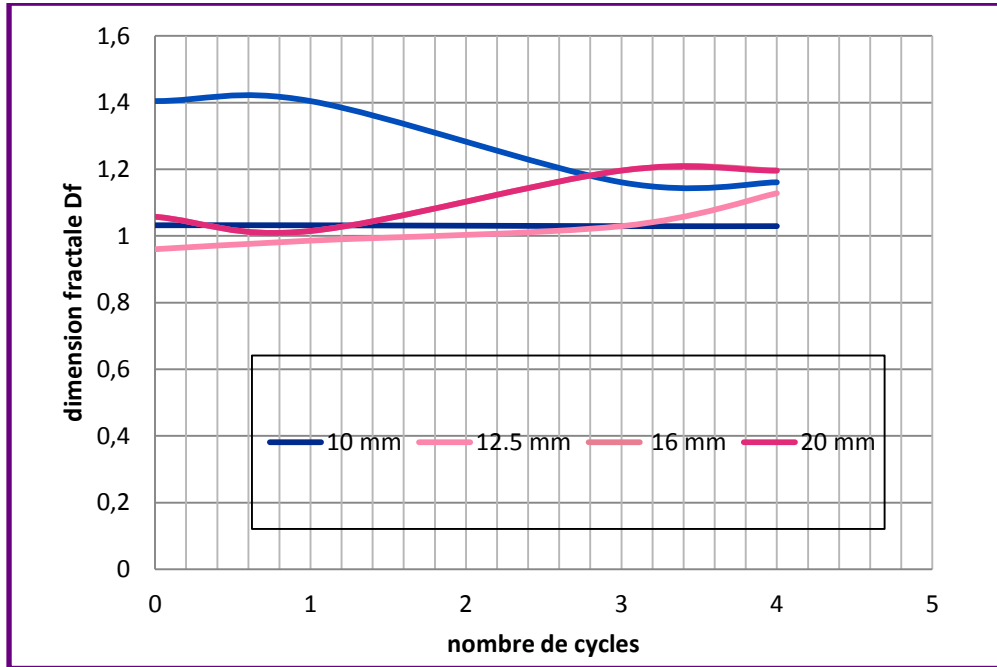


Figure IV-153: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d`essai des grains de marne de forme sous arrondie

Tableau IV-56: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites de la marne anguleuse

diamètre des grains	Avant essai	Après le 1 er cycle	Après le 3 Eme cycle	Après le 4 eme cycle
20	1.0850	1.1464	1.1464	1.1464
16	1.0149	1.0149	1.1112	1.1610
12.5	0.9372	0.9372	1.0850	1.1008
10	1.2722	1.2722	1.2925	1.2925

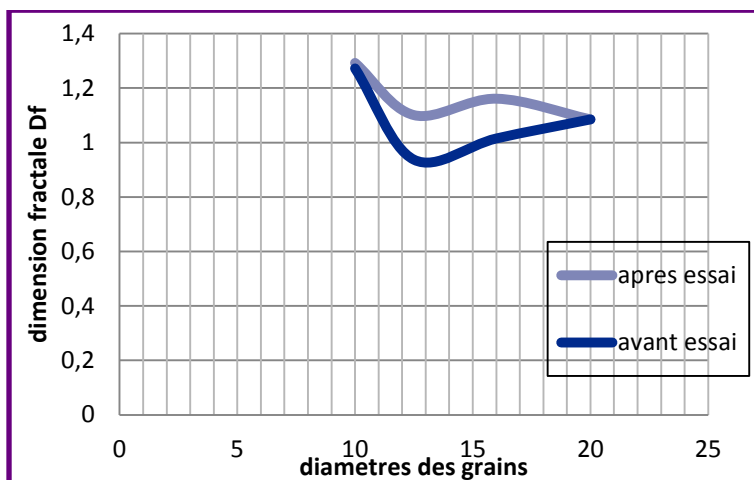


Figure IV-154: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains de marne de forme anguleuse

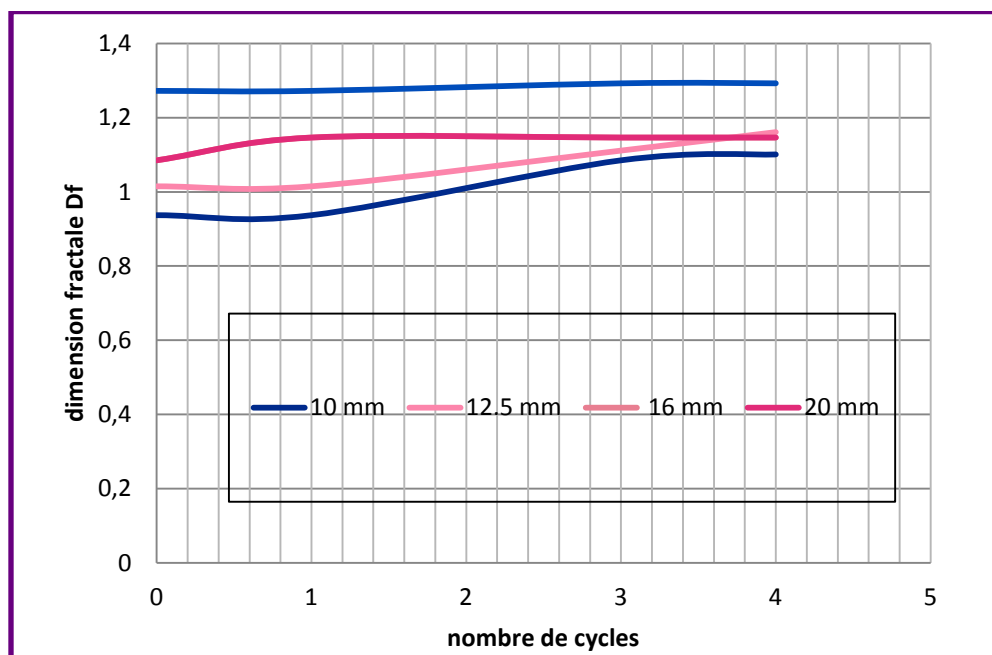


Figure IV-155: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains de marne de forme anguleuse

Tableau IV-57: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites de la marne allongée

diamètre des grains	Avant essai	Après le 1 er cycle	Après le 3 Eme cycle	Après le 4 eme cycle
20	0.9481	1.0137	1.0437	1.0437
16	0.9654	0.9654	1.0646	1.0646
12.5	1.0522	1.0522	1.2925	1.2925
10	1.0000	1.0000	1.0000	1.1610

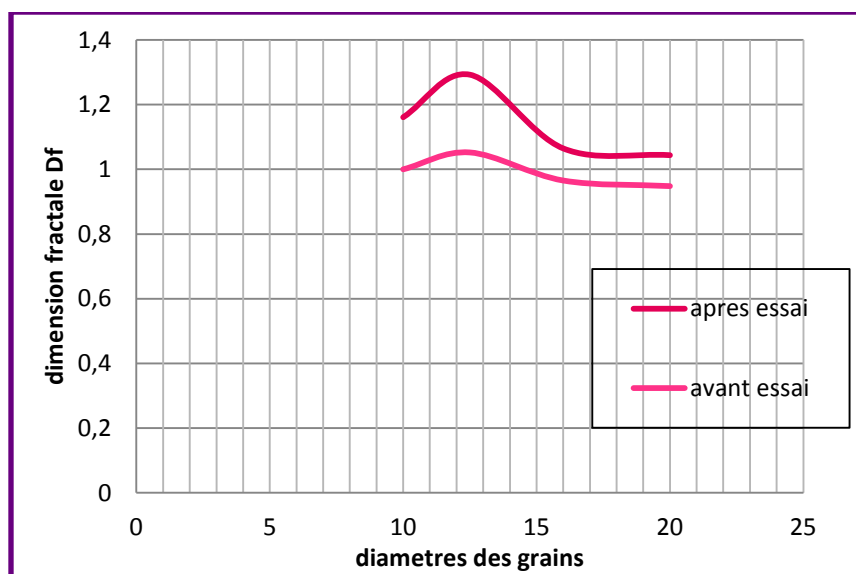


Figure IV-156: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains de marne de forme allongée

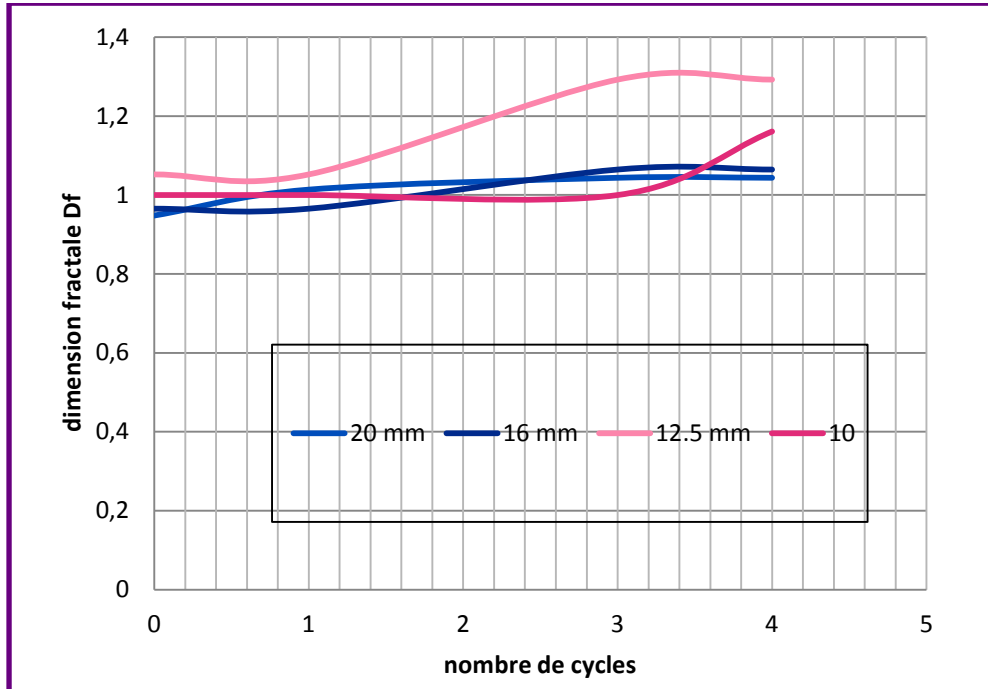


Figure IV-157: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains de marne de forme allongée

Tableau IV-58: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boîtes du schiste sous arrondie

diamètre des grains	Avant essai	Après le 1 er cycle	Après le 3 Eme cycle	Après le 4 eme cycle
20	1.1438	1.1438	1.1112	1.1112
16	1.0272	1.0272	0.9290	0.9290
12.5	1.0178	1.1962	1.1962	1.1610
10	1.0437	1.0437	1.0498	1.0498

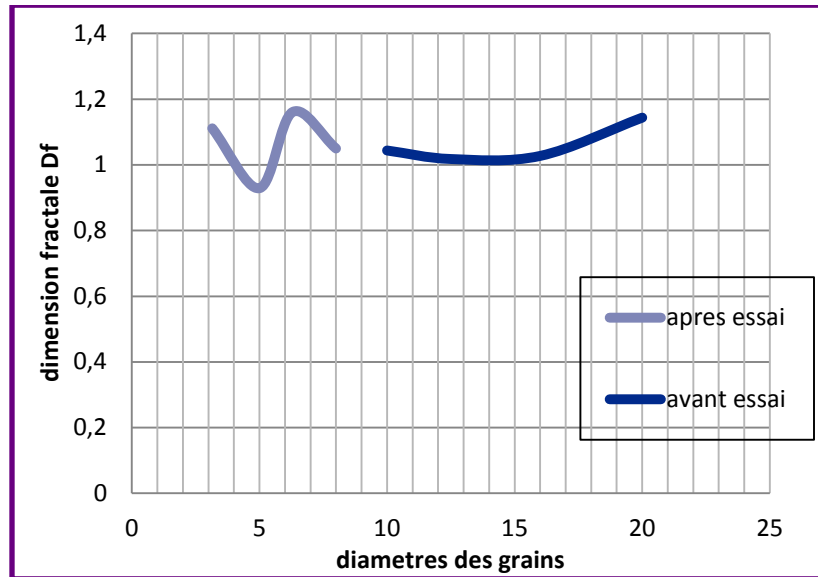


Figure IV-158: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains du schiste de forme sous arrondie

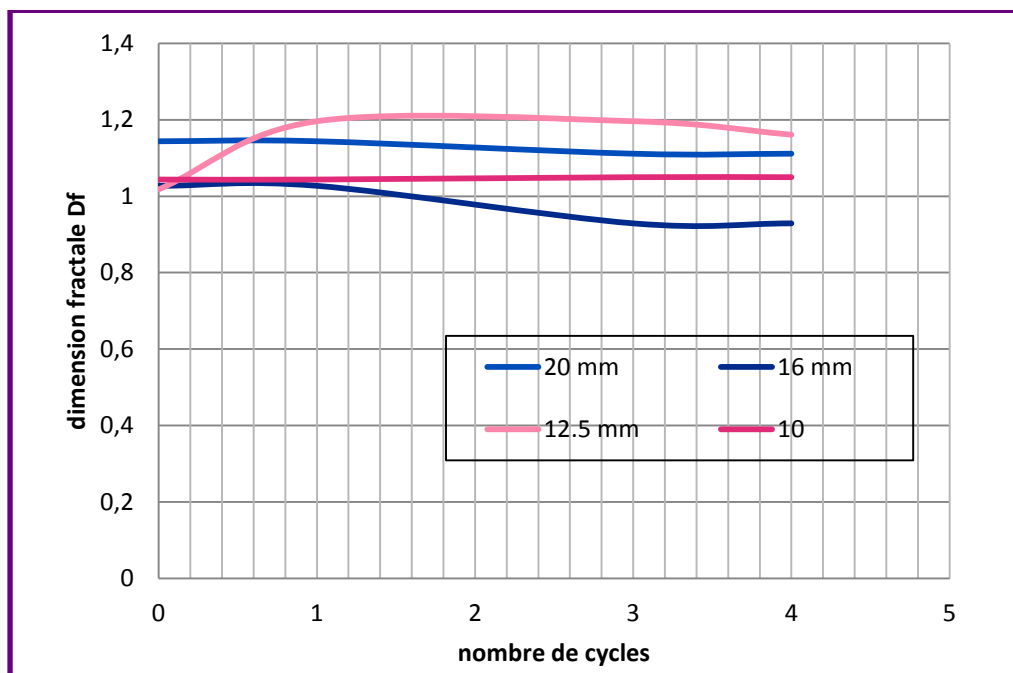


Figure IV-159: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d`essai des grains du schiste de forme sous arrondie

Tableau IV-59: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boîtes du schiste anguleux

diamètre des grains	Avant essai	Après le 1 ^{er} cycle	Après le 3 ^{ème} cycle	Après le 4 ^{ème} cycle
20	1.0543	1.0522	1.1185	1.1962
16	1.0617	1.0617	1.0178	1.0760
12.5	1.1065	1.1065	1.2925	1.2925
10	1.0577	1.2165	1.3390	1.3390

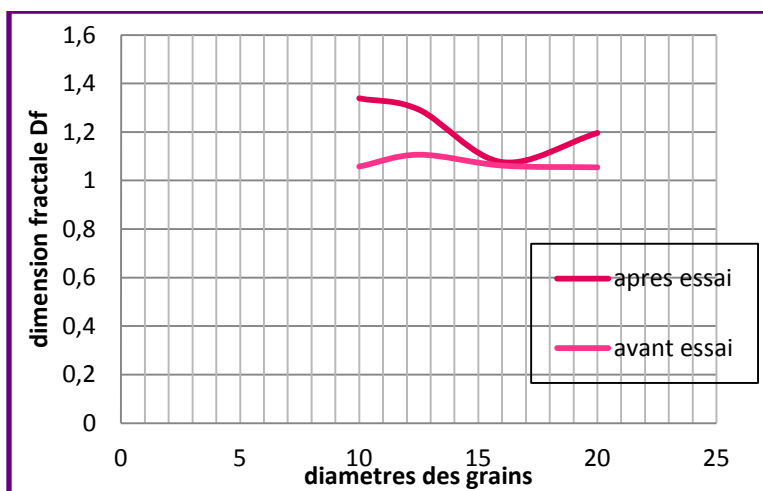


Figure IV-160: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains du schiste de forme anguleuse

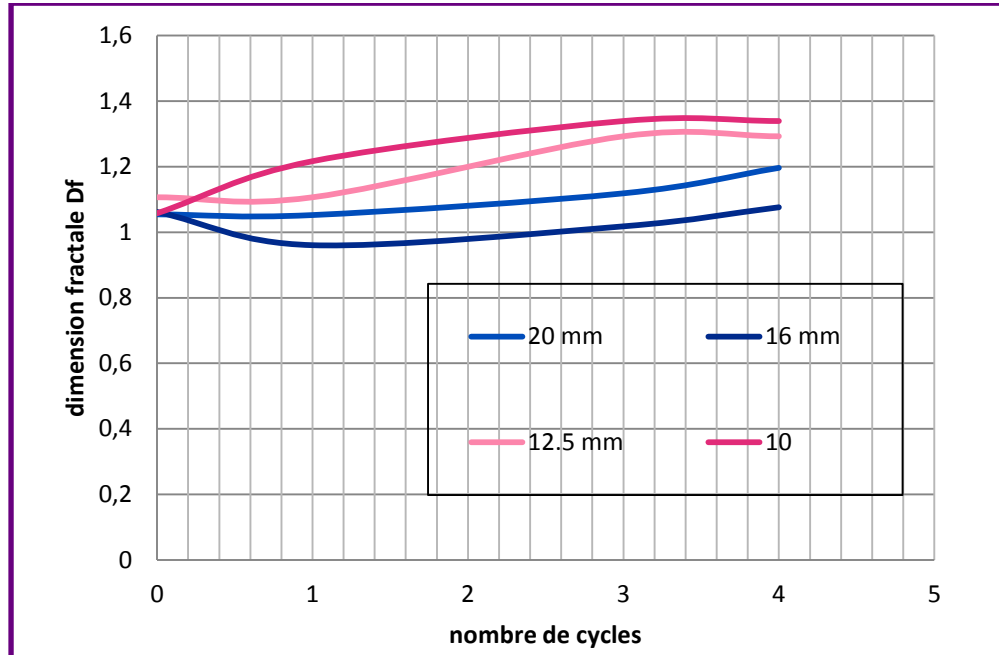


Figure IV-161: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains du schiste de forme anguleuse

Tableau IV-60: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boîtes du schiste allongée

diamètre des grains	Avant essai	Après le 1 ^{er} cycle	Après le 3 ^{ème} cycle	Après le 4 ^{ème} cycle
20	0.9724	1.0688	1.1610	1.1610
16	1.0209	1.0209	1.1047	1.1047
12.5	1.0128	1.1610	1.1610	1.5299
10	1.1008	1.1008	1.1008	1.0178

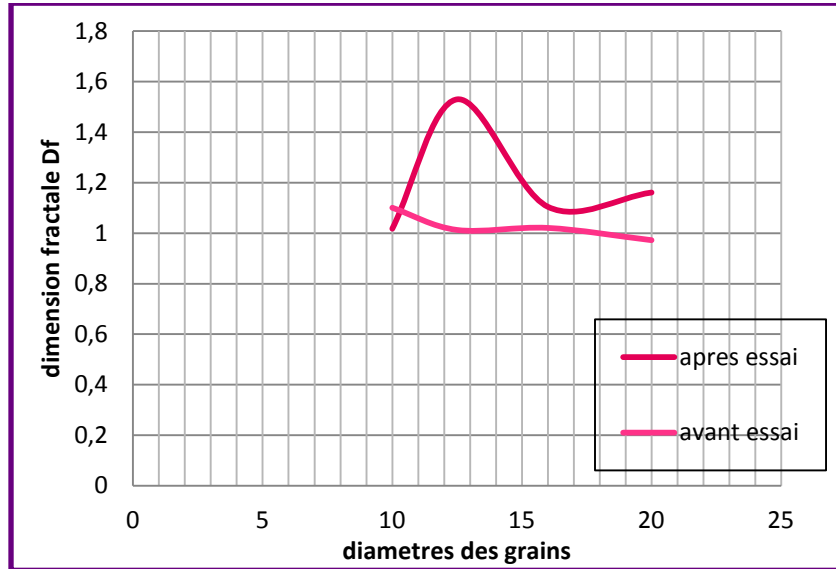


Figure IV-162: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains du schiste de forme allongée

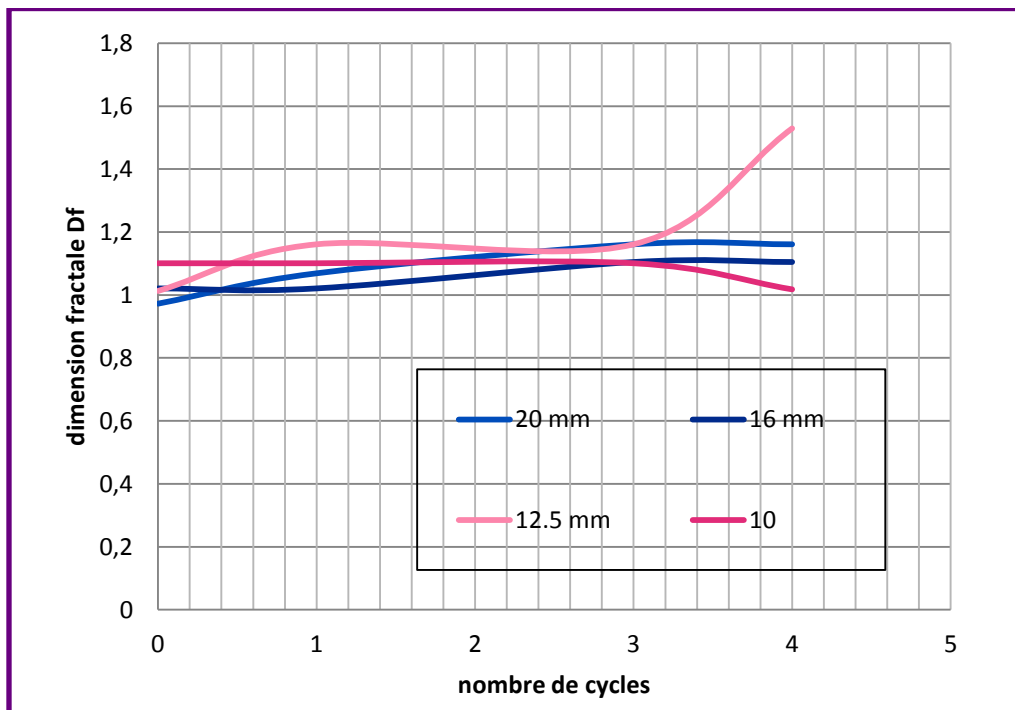


Figure IV-163: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains du schiste de forme allongée

Tableau IV-61: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites du gré sous arrondie

diamètre des grains	Avant essai	Après le 1 er cycle	Après le 3 Eme cycle	Après le 4 eme cycle
20	1.0237	0.9771	0.9771	0.9771
16	0.9717	1.0294	1.0354	1.0294
12.5	0.9771	0.9534	0.9534	0.9534
10	1.0734	1.0000	1.0000	1.0000

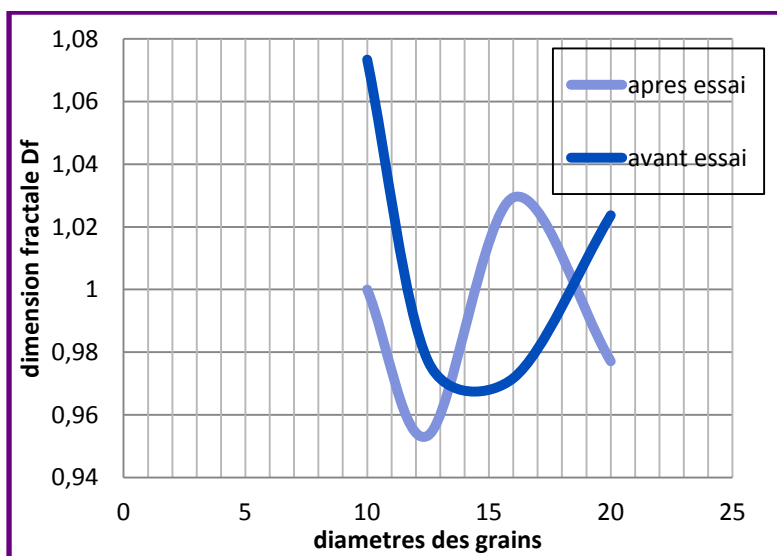


Figure IV-164: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains du gré de forme sous arrondie

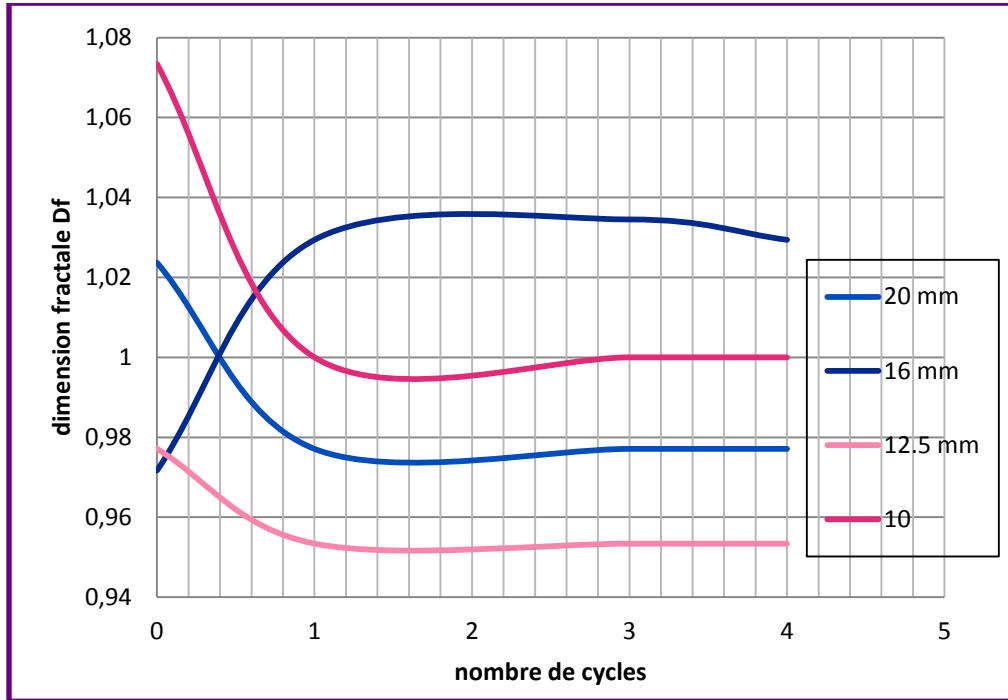


Figure IV-165: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains du gré de forme sous arrondie

Tableau IV-62: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites du gré sous anguleux

diamètre des grains	Avant essai	Après le 1 er cycle	Après le 3 Eme cycle	Après le 4 eme cycle
20	1.0850	1.0715	1.0715	1.0715
16	0.9116	0.9534	0.9534	0.9534
12.5	1.0577	1.0577	1.0577	1.0577
10	1.0000	1.0850	1.0850	1.0850

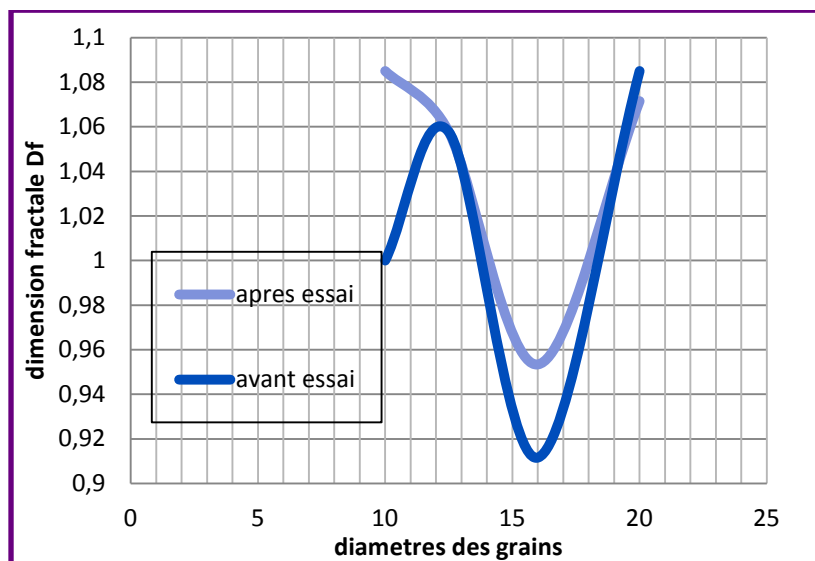


Figure IV-166: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains du gré de forme anguleuse

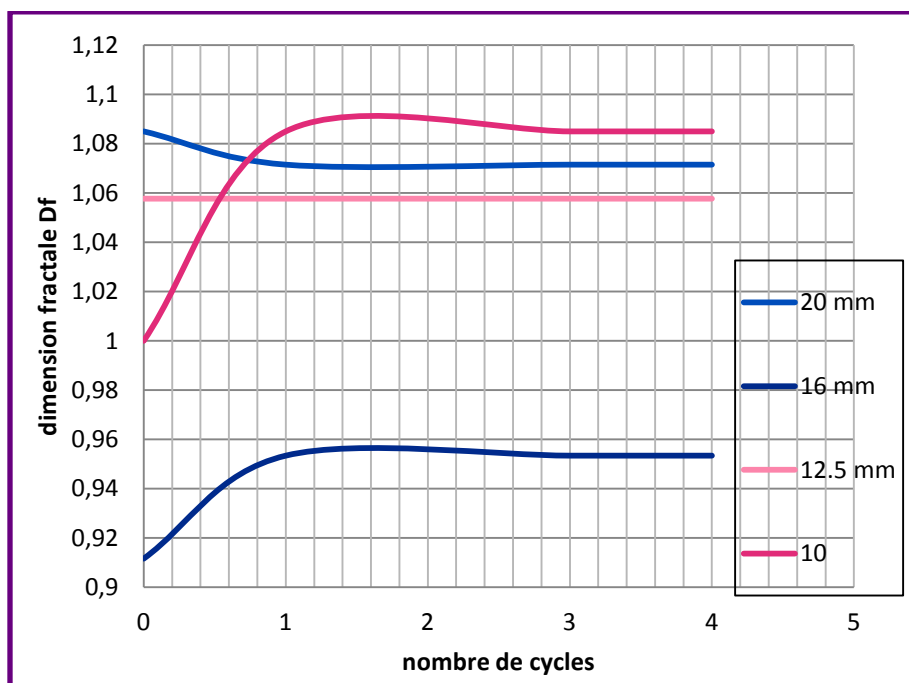


Figure IV-167: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d`essai des grains du gré de forme anguleuse

Tableau IV-63: Valeurs des dimensions fractales calculées par la méthode des boites de la pegmatite

diamètre des grains	Avant essai	Après le 1 er cycle	Après le 3 Eme cycle	Après le 4 eme cycle
12.5	1.2131	1.2131	1.2131	1.2131
10	1.0577	1.0294	1.0294	1.0294

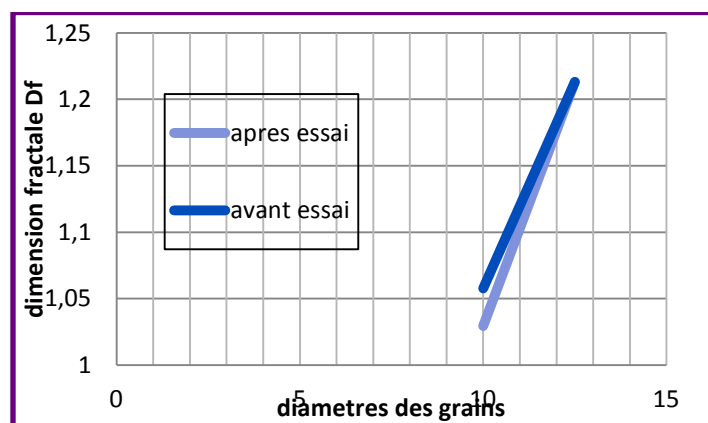


Figure IV-168: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction des diamètres des grains de pegmatite

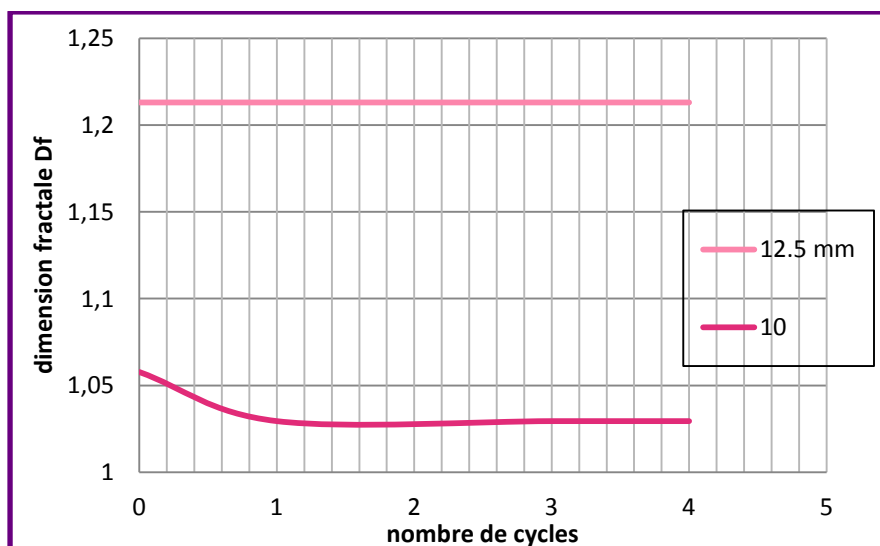


Figure IV-169: Représentation des valeurs de la dimension fractale en fonction du nombre de cycle d'essai des grains de la pegmatite

IV-12) comparaison des résultats obtenue

La comparaison portera sur les différents essais réalisés sur les différentes formes et de taille des grains des quatre matériaux.

IV-12-1) Gel/dégel

Dans le cas de l'essai gel – dégel, les principaux résultats sont portés sur les figures N° : IV-170 et IV-171 pour la marne, sur les figures N° : IV-174 et IV-175 pour le gré, sur les figures N° : IV-172 et IV-173 pour le schiste.

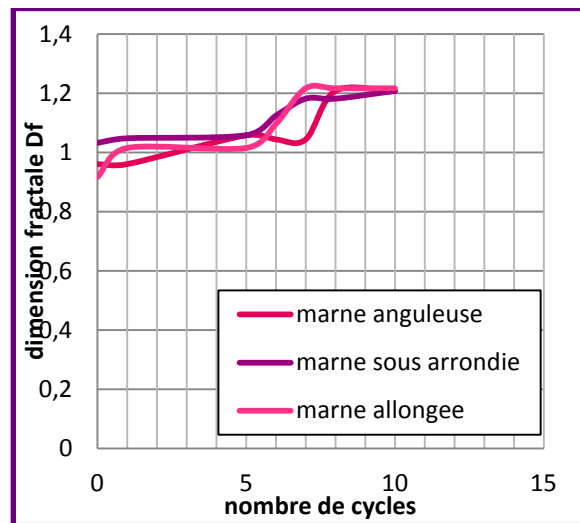
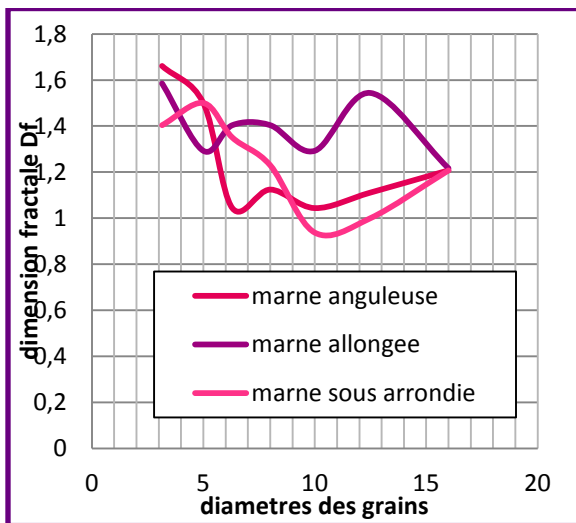


Figure IV-170: Comparaison de la dimension fractale
Des 3 formes de la marne

Figure IV-171: Comparaison de la dimension
fractale des 3 formes d'un grain de 16mm

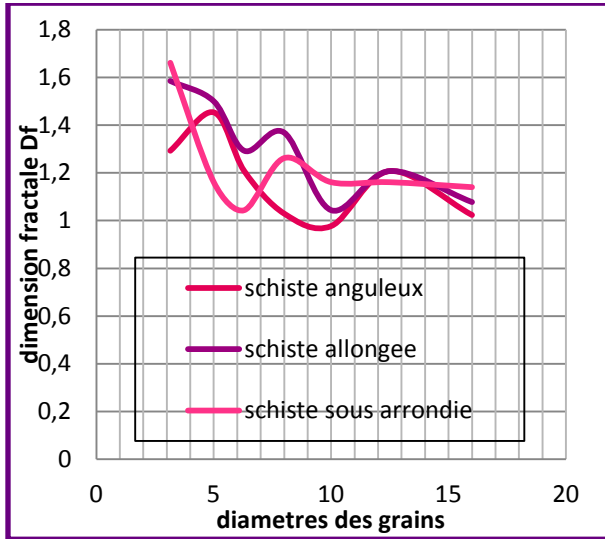


Figure IV-172: Comparaison de la dimension fractale Des 3 formes du schiste

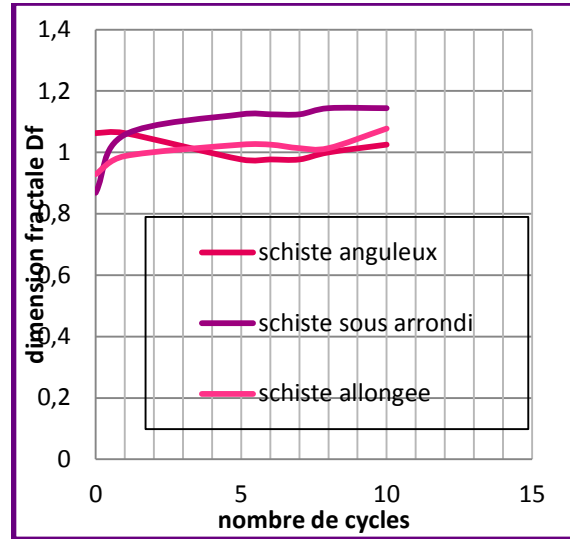


Figure IV-173: Comparaison de la dimension fractale des 3 formes d'un grain de schiste de 16mm

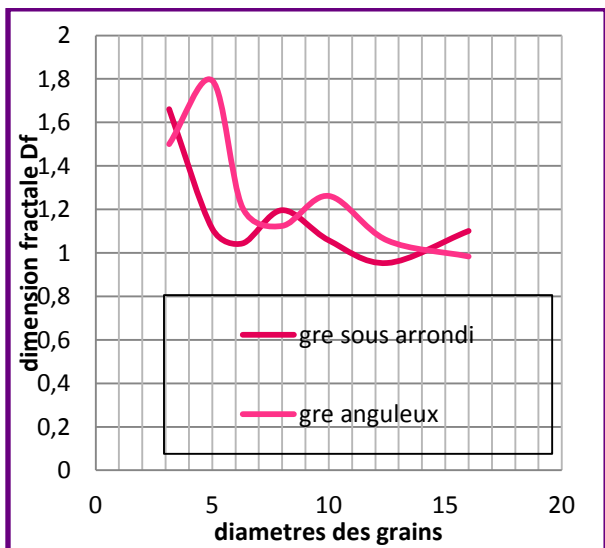


Figure IV-174: Comparaison de la dimension fractale Des 2 formes du gré

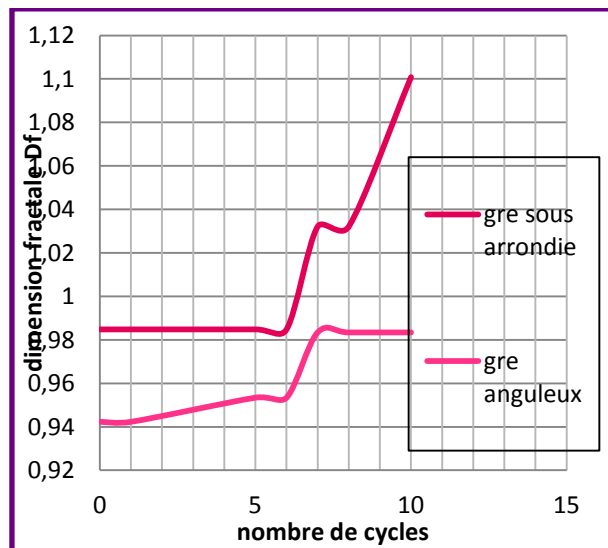


Figure IV-175: Comparaison de la dimension fractale des 2 formes d'un grain du gré de 16mm

IV-12-2) L`altérabilité

Dans le cas d`altérabilité, les principaux résultats sont portés sur les figures N° : IV-176 et IV-177 pour la marne, sur les figures N° : IV -180 et IV-181 pour le gré, sur les figures N° : IV -178 et IV-179 pour le schiste.

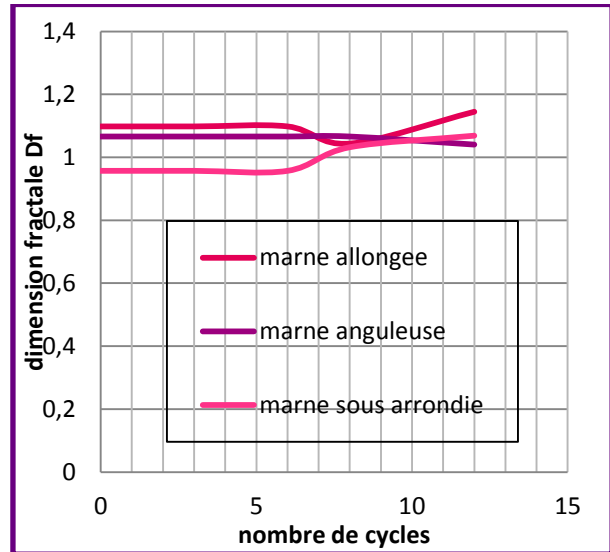
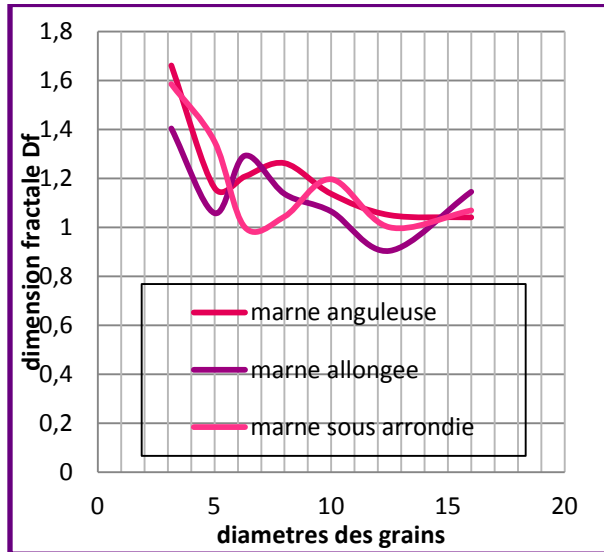


Figure IV-176: Comparaison de la dimension fractale Des 3 formes de la marne

Figure IV-177: Comparaison de la dimension fractale des 3 formes d`un grain de marne de 16mm

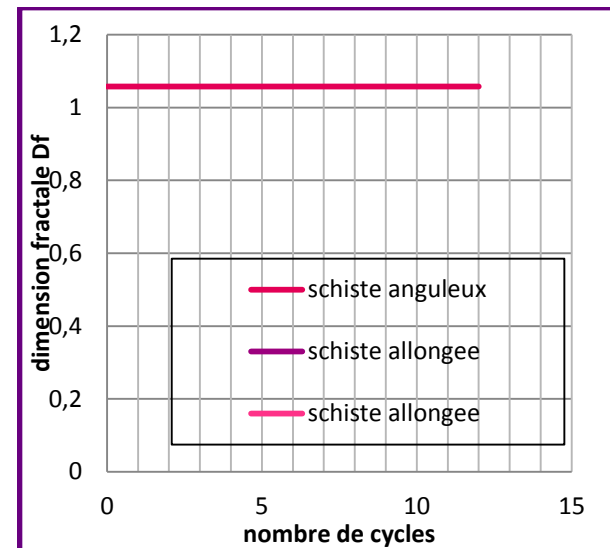
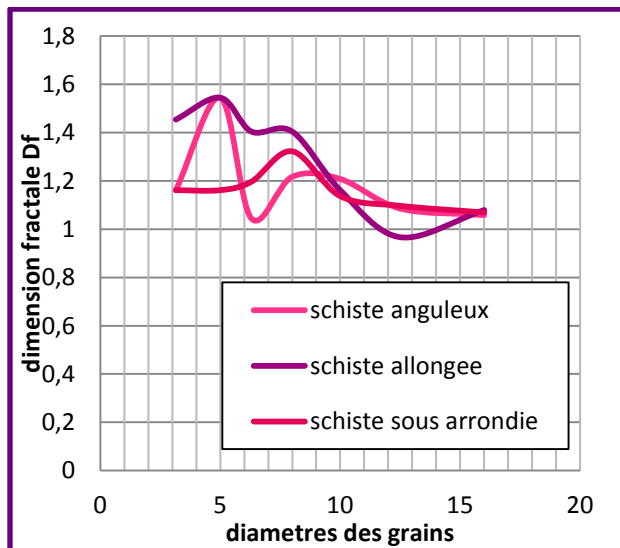


Figure IV-178: Comparaison de la dimension fractale Des 3 formes de schiste

Figure IV-179: Comparaison de la dimension fractale des 3 formes d`un grain de schiste de 16mm

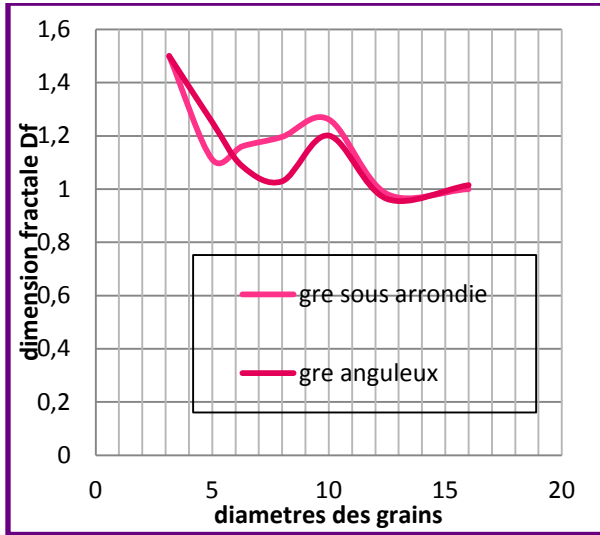


Figure IV-180: Comparaison de la dimension fractale
Des 2 formes de gré

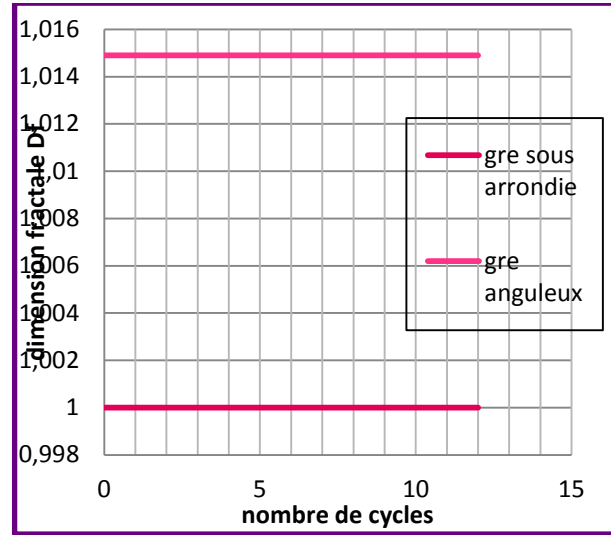


Figure IV-181: Comparaison de la dimension fractale des 2 formes d'un grain gré de 16mm

IV-12-3) Dégradabilité

Dans le cas de dégradabilité, les principaux résultats sont portés sur les figures N° : IV-182 et IV-183 pour la marne, sur les figures N° : IV-186 et IV-187 pour le gré, sur les figures N° IV-184 et IV-185 pour le schiste.

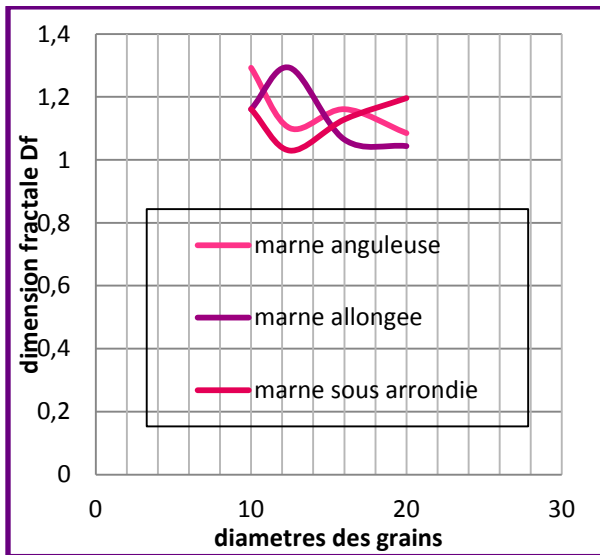


Figure IV-182: Comparaison de la dimension fractale
Des 3 formes de marne

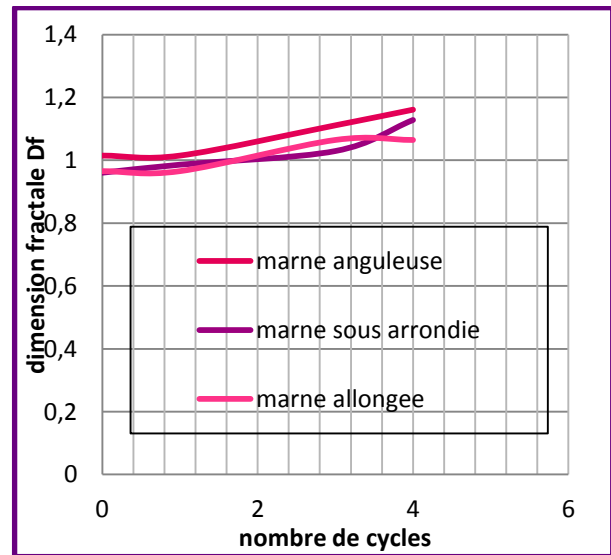


Figure IV-183: Comparaison de la dimension fractale des 3 formes d'un grain de marne de 16mm

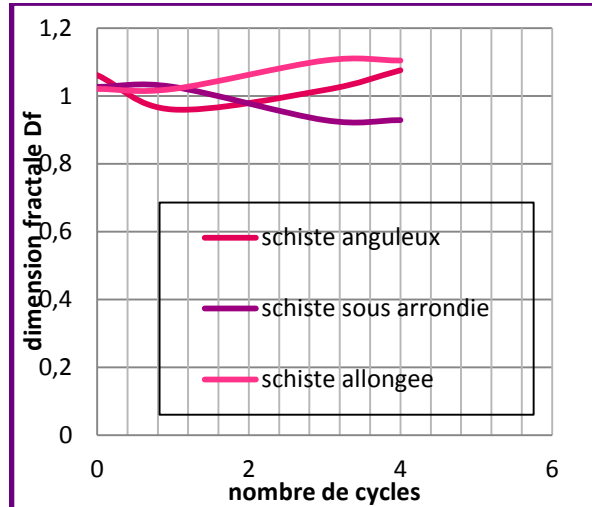
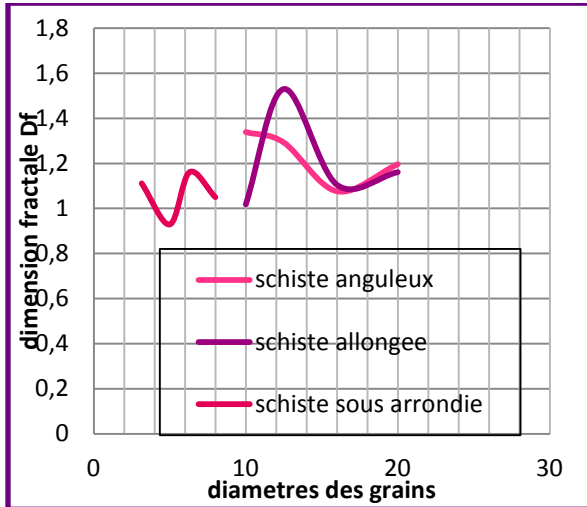


Figure IV-184: Comparaison de la dimension fractale **Figure IV-185:** Comparaison de la dimension

Des 3 formes de schiste

fractale des 3 formes d'un grain de schiste de 16mm

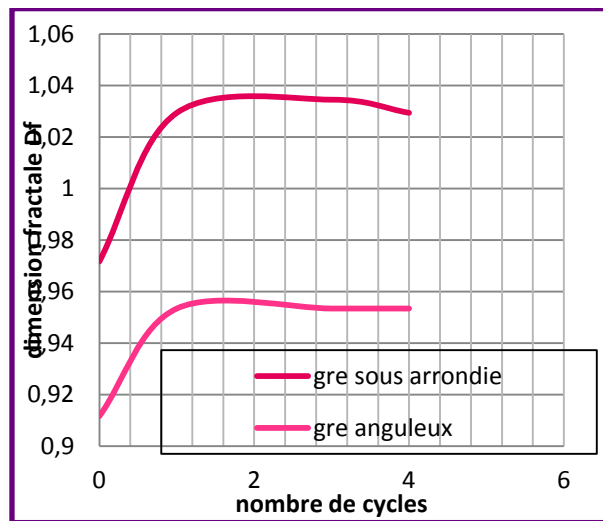
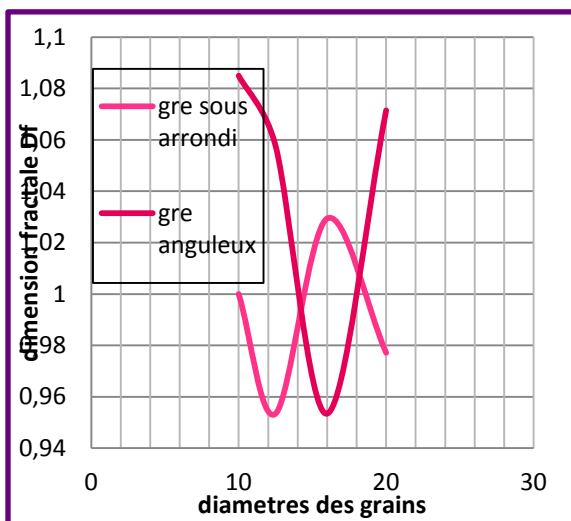


Figure IV-186: Comparaison de la dimension fractale **Figure IV-187:** Comparaison de la dimension

Des 2 formes de gré

fractale des 2 formes d'un grain de gré de 16mm

***Interprétation des résultats**

Le calcul de la dimension fractale par la méthode des boites a pour conséquence de changer l'état de surface (rugosité, aspérités, irrégularités...) au niveau du grain et influe sur le comportement mécanique tant à l'échelle du grain qu'à l'échelle de l'échantillon.

La forme des grains change après chaque cycle d'essai quelque soit sa forme initiale, en commençant par la cassure des aspérités (les grains qui présentent des aspérités sont les premiers à se dégrader). Les grains de forme arrondie tendent vers la forme angulaire et les grains anguleux tendent vers la forme arrondie.

En générale, les grains de petite dimension sont plus résistants que les grains de grande dimension. Plus la taille augmente, plus la probabilité de présence de zones de faiblesse dans le grain augmente. Les microfissures se propagent lorsque les grains sont soumis à un chargement élevé.

La dimension fractale varie en fonction du nombre de cycles pour les trois types d'essai. Cette évolution est presque similaire pour toutes les formes et pour les quatre matériaux. Il y a eu un changement de l'état de surface des grains en fonction du temps. Plus le nombre de cycle augmente, plus la dimension fractale du grain change et cela quelque soit sa forme (fig IV-171,fig IV-173,fig IV-175,fig IV-177,fig IV-179, Fig IV-183,fig IV-185).

Dans la majorité des cas et dans les 3 essais, on a remarqué une augmentation puis diminution de la dimension fractale ; ce qui signifie que le grain devient rugueux lorsque DF augmente puis tend à devenir arrondi lorsque la dimension fractale DF diminue.

Le nombre de grains écrasés est en fonction du nombre de cycles. Plus on augmente le nombre de cycle, plus le nombre de grains écrasés augmente (après chaque cycle, le nombre de grains écrasés devient de plus en plus élevé).

Dans le cas du gré et de la pegmatite, aucune fracture n'a été observée, il y'a eu production de fines de quantité petite. Contrairement à la marne et au schiste où on observe des fractures après chaque cycle d'essai cela signifie que les matériaux les plus dégradables sont le schiste et la marne.

La rupture du gré et de la pegmatite est sous forme d'abrasion dans les trois essais, et sous forme de fracture dans le cas de la marne et schiste dans les essais gel/dégel et dégradabilité ; contrairement à l'essai d'altérabilité ou la rupture de la marne et du schiste est sous forme d'écaillage.

La dimension fractale a diminué en fonction du diamètre du grain dans les trois essais. Ce qui montre que plus le diamètre est grand, plus la dimension fractale est élevée (figIV-figIV70, figIV-172,figIV-76,figIV-78,figIV-80).

Les matériaux les plus dégradables sont la marne et le schiste où l'on a constaté une évolution de la valeur de la dimension fractale ; contrairement au gré et à la pegmatite où elle reste presque constante le long des trois essais.

Les plus grandes valeurs de DF après essais ont été observées sur les matériaux les plus dégradables (schiste et marne) ; ce qui signifie que les grains présentent des faiblesses ou des irrégularités en surface.

L'essai le plus défavorable en terme de dimension fractale est l'essai du gel /dégel où on l'a observé les plus grandes valeurs de DF après essai.

IV-13) conclusion

-La variation de DF est affectée par la dimension des grains, la forme des grains, la nature des grains et le chemin des contraintes.

IV-14) conclusion générale

Le principale but de se travail est de mètre en évidence l`influence des paramètres de la nature (altération, gel,..) sur la dégradation des grains en terme de dimension fractale.

Cette étude conduit dans un premier temps a la réalisation d`une série d`essais qui sont : l`essai gel/dégel, l`essai d`altérabilité ainsi que l`essai de dégradabilité et dans un deuxième temps à mettre en évidence la notion de dimension fractale des grains en fonction de la forme des grains, la classe granulaire, de chaque matériaux et pour chaque essai.

Les principaux résultats obtenus permettent de tirer les conclusions suivantes :

Les matériaux étudiés sont d`un coefficient de dégradabilité $DG < 5 \Rightarrow$ matériaux sont peu dégradables.

La forme, la taille, la classe, et la nature du grain sont des paramètres qui influent sur la dégradation des grains.

Les matériaux les plus dégradables en termes de dimension fractale et en terme d`étalement granulométrique et production des particules fines sont la marne et le schiste à l`essai de gel/dégel. Contrairement à l`essai d`altérabilité qui est le moins défavorable et qui a produit le moins fine, les courbes granulométriques obtenues sont moins étalées et ont présenté moins de dégradation des grains par rapport aux deux autres essais (gel/dégel et dégradabilité) .

La dimension des grains joue un grand rôle dans la dégradation des grains. Plus la dimension des grains est petite, plus il est résistant, ceci a été confirmé par l`influence de la classe ou la plus grande classe (5/10) est la plus défavorable.

Finalemnt la nature minéralogique du matériau influe sur la dégradation des grains de roches. Plus les minéraux sont résistants, plus les grains sont moins altérables, moins dégradables et moins sensibles aux essais gel-dégel.

L`essai/le matériau	La marne	Le schiste	Le gré	La pegmatite
Le gel/dégel	fracture	fracture	Abrasion	Abrasion
Altérabilité	écaillage	écaillage	Abrasion	Abrasion
dégradabilité	fracture	fracture	abrasion	abrasion

Tableau des types de rupture de chaque matériau dans chaque essai



Bibliographie

Les résultats observés dans les 3 essais :



Figure 1 : L`effet du gel sur la marne



Figure 2: l`effet du gel sur le schiste



Figure 3 : Les échantillons étudiés avant et après l`essai gel/dégel



Figure 4 : La marne après l`essai



Figure 5 : le schiste après essai



Figure 6 : La marne et le schiste après l'essai de dégradabilité

L'analyse granulométrique et le calcul des dimensions fractales par la méthode des masses après essai :

Essai d'altérabilité Altérabilité

Cas de Classe 0/5

Tableau 1: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/5 des grains de schiste de forme sous arrondie après essai.

Ø mm	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisats cumulés (gr)	Tamisats cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
5	5.591	05.591	16.980	75.229	01.00	0.75229277
3.15	5.499	11.090	11.481	50.866	00.630	0.50866156
2	3.195	14.285	08.286	36.710	00.400	0.36710824
1	3.395	17.680	04.891	21.669	00.200	0.21669399
0.8	0.998	18.678	03.893	17.247	00.160	0.17247796
0.63	1.297	19.975	02.596	11.501	00.126	0.11501484
0.5	0.499	20.474	02.097	09.290	00.100	0.09290683
0.315	0.499	20.973	01.598	07.079	00.063	0.07079881
0.2	0.300	21.273	01.298	05.750	00.040	0.05750742
0.16	0.100	21.373	01.198	05.307	00.032	0.05307696
0.08	0.399	21.772	00.799	03.539	00.016	0.03539941
0	0.799	22.571	00.00	00.00	00.00	00.00

Tableau 2: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/5 des grains de schiste de forme allongée après essai.

Ø mm	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisats cumulés (gr)	Tamisats cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
5	4.593	04.593	17.981	79.653	01.00	0.79653584
3.15	5.598	10.191	12.383	54.855	00.630	0.54855143
2	3.495	13.686	08.888	39.372	00.400	0.3937273
1	2.995	16.681	05.893	26.105	00.200	0.26105254
0.8	1.200	17.881	04.693	20.789	00.160	0.20789404
0.63	2.097	19.978	02.596	11.499	00.126	0.11499956
0.5	0.300	20.278	02.296	10.171	00.100	0.10170993
0.315	0.399	20.677	01.897	08.403	00.063	0.08403473
0.2	0.399	21.076	01.498	06.635	00.040	0.06635953
0.16	0.100	21.176	01.398	06.193	00.032	0.06192965
0.08	0.599	21.775	00.799	03.539	00.016	0.0353947
0	0.799	22.574	00.00	00.00	00.00	00.00

Tableau 3: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/5 des grains de schiste de forme anguleuse après essai

Ø mm	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisats cumulés (gr)	Tamisats cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
5	4.493	04.493	17.878	79.915	01.00	0.79915963
3.15	5.698	10.191	12.180	54.445	00.630	0.54445487
2	3.494	13.685	08.686	38.827	00.400	0.38827053
1	3.195	16.880	05.491	24.545	00.200	0.2454517
0.8	1.398	18.278	04.093	18.296	00.160	0.18296008
0.63	1.897	20.175	02.196	09.816	00.126	0.0981628
0.5	0.300	20.475	01.896	08.475	00.100	0.08475258
0.315	0.499	20.974	01.397	06.245	00.063	0.06244692
0.2	0.399	21.373	00.998	04.461	00.040	0.04461133
0.16	0.100	21.473	00.898	04.014	00.032	0.04014125
0.08	0.399	21.872	00.499	02.230	00.016	0.02230566
0	0.499	22.371	00.00	00.00	00.00	00.00

Tableau 4 : Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/5 de la marne sous-arrondie après essai

Ø mm	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisats cumulés (gr)	Tamisats cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
5	4.692	4.692	19.076	80.259	01.00	0.80259172
3.15	6.788	11.48	12.288	51.699	00.630	0.51699764
2	3.295	14.775	08.993	37.836	00.400	0.37836587
1	3.200	17.975	05.793	24.373	00.200	0.24373107
0.8	0.998	18.973	04.795	20.174	00.160	0.20174184
0.63	1.200	20.173	03.595	15.125	00.126	0.15125379
0.5	0.599	20.772	02.996	12.605	00.100	0.12605183
0.315	0.699	21.471	02.297	09.664	00.063	0.09664254
0.2	0.599	22.07	01.698	07.144	00.040	0.07144059
0.16	0.300	22.37	01.398	05.881	00.032	0.05881858
0.08	0.799	23.169	00.599	02.520	00.016	0.02520195
0	0.599	23.768	00.00	00.00	00.00	00.00

Tableau 5: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/5 de la marne anguleuse après essai.

Ø mm	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisats cumulés (gr)	Tamisats cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
5	5.591	5.591	17.669	75.963	01.00	0.75963027
3.15	5.777	11.368	11.892	51.126	00.630	0.51126397
2	3.499	14.867	8.393	36.083	00.400	0.36083405
1	3.399	18.266	4.994	21.470	00.200	0.21470335
0.8	1.100	19.366	3.894	16.741	00.160	0.16741187
0.63	1.597	20.963	2.297	09.875	00.126	0.09875322
0.5	0.599	21.562	1.698	07.300	00.100	0.07300086
0.315	0.300	21.862	1.398	06.010	00.063	0.06010318
0.2	0.499	22.361	0.899	03.865	00.040	0.03865004
0.16	0.200	22.561	0.699	03.005	00.032	0.03005159
0.08	0.499	23.06	0.200	00.859	00.016	0.00859845
0	0.200	23.26	00.00	00.00	00.00	00.00

Tableau 6: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/5 de la marne allongée après essai.

Ø mm	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisats cumulés (gr)	Tamisats cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
5	5.092	05.092	18.378	78.304	01.00	0.78304218
3.15	6.189	11.281	12.189	51.934	00.630	0.51934384
2	3.399	14.680	08.790	37.452	00.400	0.37452066
1	3.694	18.374	05.096	21.712	00.200	0.21712825
0.8	1.100	19.474	03.996	17.025	00.160	0.17025991
0.63	1.499	20.973	02.497	10.639	00.126	0.10639114
0.5	0.300	21.273	02.197	09.360	00.100	0.09360886
0.315	0.599	21.872	01.598	06.808	00.063	0.06808692
0.2	0.499	22.371	01.099	04.682	00.040	0.04682573
0.16	0.200	22.571	00.899	03.830	00.032	0.03830422
0.08	0.500	23.071	00.399	01.700	00.016	0.01700043
0	0.399	23.470	00.00	00.00	00.00	00.00

Cas de la Classe 5/10**Tableau 7:** Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 5/10 de la marne allongée après essai.

Ø mm	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisats cumulés (gr)	Tamisats cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
10	9.898	09.898	12.48	55.7690589	01.00	0.56537102
8	4.692	14.590	07.788	34.80203772	00.800	0.35281326
6.3	06.190	20.780	01.598	7.140941997	00.630	0.07239286
5	00.898	21.678	00.700	3.128072214	00.500	0.03171152
3.15	00.300	21.978	00.400	1.787469836	00.315	0.01812087
2	00.200	22.178	00.200	0.893734918	00.200	0.00906043
1	00.20	22.378	00.00	00.00	00.100	00.00
0.8	00.00	22.378	00.00	00.00	00.080	00.00
0.63	00.00	22.378	00.00	00.00	00.063	00.00
0.5	00.00	22.378	00.00	00.00	00.050	00.00
0.315	00.00	22.378	00.00	00.00	0.0315	00.00
0.2	00.00	22.378	00.00	00.00	00.020	00.00
0.16	00.00	22.378	00.00	00.00	00.016	00.00
0.08	00.00	22.378	00.00	00.00	00.008	00.00
0	00.00	22.378	00.00	00.00	00.00	00.00

Tableau 8: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 5/10 de la marne anguleuse après essai.

Ø mm	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisats cumulés (gr)	Tamisats cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
10	7.688	7.688	14.577	65.470	01.00	0.66928375
8	8.486	16.174	06.091	27.356	00.800	0.27966024
6.3	3.694	19.868	02.397	10.765	00.630	0.1100551
5	00.00	19.868	02.397	10.765	00.500	0.1100551
3.15	1.198	21.066	01.199	05.385	00.315	0.05505051
2	0.799	21.865	00.400	01.796	00.200	0.01836547
1	0.300	22.165	00.100	00.449	00.100	0.00459137
0.8	0.100	22.265	00.00	00.00	00.080	00.00
0.63	00.00	22.265	00.00	00.00	00.063	00.00
0.5	00.00	22.265	00.00	00.00	00.050	00.00
0.315	00.00	22.265	00.00	00.00	0.0315	00.00
0.2	00.00	22.265	00.00	00.00	00.020	00.00
0.16	00.00	22.265	00.00	00.00	00.016	00.00
0.08	00.00	22.265	00.00	00.00	00.008	00.00
0	00.00	22.265	00.00	00.00	00.00	00.00

Tableau9: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 5/10 de la marne sous arrondie après essai.

Ø mm	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisats cumulés (gr)	Tamisats cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
10	8.400	8.4	13.791	62.14681628	01.00	0.6307629
8	8.000	16.4	5.791	26.09616511	00.800	0.26486462
6.3	5.192	21.592	0.599	2.699292506	00.630	0.02739663
5	0.499	22.091	0.100	0.45063314	00.500	0.00457373
3.15	00.00	22.091	0.100	0.45063314	00.315	0.00457373
2	00.100	22.191	00.00	00.00	00.200	00.00
1	00.00	22.191	00.00	00.00	00.100	00.00
0.8	00.00	22.191	00.00	00.00	00.080	00.00
0.63	00.00	22.191	00.00	00.00	00.063	00.00
0.5	00.00	22.191	00.00	00.00	00.050	00.00
0.315	00.00	22.191	00.00	00.00	0.0315	00.00
0.2	00.00	22.191	00.00	00.00	00.020	00.00
0.16	00.00	22.191	00.00	00.00	00.016	00.00
0.08	00.00	22.191	00.00	00.00	00.008	00.00
0	00.00	22.191	00.00	00.00	00.00	00.00

Tableau 10: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 5/10 du schiste anguleux après essai.

Ø mm	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisats cumulés (gr)	Tamisats cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
10	7.587	7.587	13.878	64.65408805	01.00	0.64932391
8	4.393	11.98	9.485	44.18821337	00.800	0.44378421
6.3	6.290	18.27	3.195	14.88469602	00.630	0.14948767
5	2.396	20.666	0.799	3.722338691	00.500	0.03738361
3.15	0.699	21.365	0.100	0.46587468	00.315	0.0046788
2	0.100	21.465	00.00	00.00	00.200	00.00
1	00.00	21.465	00.00	00.00	00.100	00.00
0.8	00.00	21.465	00.00	00.00	00.080	00.00
0.63	00.00	21.465	00.00	00.00	00.063	00.00
0.5	00.00	21.465	00.00	00.00	00.050	00.00
0.315	00.00	21.465	00.00	00.00	0.0315	00.00
0.2	00.00	21.465	00.00	00.00	00.020	00.00
0.16	00.00	21.465	00.00	00.00	00.016	00.00
0.08	00.00	21.465	00.00	00.00	00.008	00.00
0	00.00	21.465	00.00	00.00	00.00	00.00

Tableau 11: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 5/10 du schiste sous arrondie après essai.

Ø mm	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisats cumulés (gr)	Tamisats cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
10	9.989	09.989	11.393	53.28313535	01.00	0.53558669
8	2.696	12.685	08.697	40.67439903	00.800	0.40884731
6.3	6.500	19.185	02.197	10.27499766	00.630	0.10328131
5	1.498	20.683	00.699	3.269104855	00.500	0.0328601
3.15	0.599	21.282	00.100	0.467683098	00.315	0.00470102
2	0.100	21.382	00.00	00.00	00.200	00.00
1	00.00	21.382	00.00	00.00	00.100	00.00
0.8	00.00	21.382	00.00	00.00	00.080	00.00
0.63	00.00	21.382	00.00	00.00	00.063	00.00
0.5	00.00	21.382	00.00	00.00	00.050	00.00
0.315	00.00	21.382	00.00	00.00	0.0315	00.00
0.2	00.00	21.382	00.00	00.00	00.020	00.00
0.16	00.00	21.382	00.00	00.00	00.016	00.00
0.08	00.00	21.382	00.00	00.00	00.008	00.00
0	00.00	21.382	00.00	00.00	00.00	00.00

Tableau 12: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 5/10 du schiste allongée après essai.

Ø mm	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisats cumulés (gr)	Tamisats cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
10	7.188	07.188	14.077	66.1979779	01.00	0.6647306
8	5.491	12.679	8.586	40.37620503	00.800	0.40543986
6.3	6.190	18.869	2.396	11.2673407	00.630	0.11314162
5	2.196	21.065	0.200	0.940512579	00.500	0.00944421
3.15	0.200	21.265	00.00	00.00	00.315	00.00
2	00.00	21.265	00.00	00.00	00.200	00.00
1	00.00	21.265	00.00	00.00	00.100	00.00
0.8	00.00	21.265	00.00	00.00	00.080	00.00
0.63	00.00	21.265	00.00	00.00	00.063	00.00
0.5	00.00	21.265	00.00	00.00	00.050	00.00
0.315	00.00	21.265	00.00	00.00	0.0315	00.00
0.2	00.00	21.265	00.00	00.00	00.020	00.00
0.16	00.00	21.265	00.00	00.00	00.016	00.00
0.08	00.00	21.265	00.00	00.00	00.008	00.00
0	00.00	21.265	00.00	00.00	00.00	00.00

Essai Gel /dégel**Cas de la Classe 0/5****Tableau 13:** Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/5du schiste sous-arrondie après essai.

Ø mm	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisats cumulés (gr)	Tamisats cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
5	5.092	05.092	17.674	77.633	01.00	0.78304018
3.15	5.891	10.983	11.783	51.757	00.630	0.52204156
2	3.395	14.378	08.388	36.844	00.400	0.37162731
1	2.895	17.273	05.493	24.128	00.200	0.24336538
0.8	1.298	18.571	04.195	18.426	00.160	0.18585796
0.63	2.097	20.668	02.098	09.215	00.126	0.09295113
0.5	0.499	21.167	01.599	07.023	00.100	0.07084312
0.315	0.499	21.666	01.100	04.831	00.063	0.0487351
0.2	0.300	21.966	00.800	03.514	00.040	0.03544371
0.16	0.300	22.266	00.500	02.196	00.032	0.02215232
0.08	0.300	22.566	00.200	00.878	00.016	0.00886093
0	0.200	22.766	00.00	00.00	00.00	00.00

Tableau 14: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/5du schiste allongée après essai.

Ø mm	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisats cumulés (gr)	Tamisats cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
5	5.092	05.092	17.573	77.533	01.00	0.77846195
3.15	5.691	10.783	11.882	52.424	00.630	0.52635776
2	3.295	14.078	08.587	37.886	00.400	0.38039337
1	3.395	17.473	05.192	22.907	00.200	0.22999911
0.8	1.098	18.571	04.094	18.063	00.160	0.18135909
0.63	2.097	20.668	01.997	08.811	00.126	0.08846461
0.5	0.599	21.267	01.398	06.168	00.100	0.06192965
0.315	0.499	21.766	00.899	03.966	00.063	0.03982458
0.2	0.399	22.165	00.500	02.206	00.040	0.02214938
0.16	0.100	22.265	00.400	01.765	00.032	0.0177195
0.08	0.300	22.565	00.100	00.441	00.016	0.00442988
0	0.100	22.665	00.00	00.00	00.00	00.00

ANNEXES

Tableau 15: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/5du schiste anguleux après essai.

Ø mm	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisats cumulés (gr)	Tamisats cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
5	3.894	03.894	19.270	83.189	01.00	0.86138304
3.15	5.691	09.585	13.579	58.621	00.630	0.60699119
2	4.593	14.178	08.986	38.792	00.400	0.40168075
1	3.195	17.373	05.791	25.000	00.200	0.25886192
0.8	1.298	18.671	04.493	19.396	00.160	0.20084037
0.63	1.897	20.568	02.596	11.207	00.126	0.11604309
0.5	0.599	21.167	01.997	08.621	00.100	0.08926736
0.315	0.499	21.666	01.498	06.466	00.063	0.06696169
0.2	0.399	22.065	01.099	04.744	00.040	0.0491261
0.16	0.200	22.265	00.899	03.881	00.032	0.04018596
0.08	0.399	22.664	00.500	02.158	00.016	0.02235036
0	0.500	23.164	00.00	00.00	00.00	00.00

Tableau 16: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/5de la marne sous arrondie après essai.

Ø mm	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisats cumulés (gr)	Tamisats cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
5	5.491	05.491	18.472	77.085	01.00	0.7771794
3.15	6.090	11.581	12.382	51.671	00.630	0.52095254
2	3.594	15.175	08.788	36.673	00.400	0.36974083
1	3.295	18.470	05.493	22.922	00.200	0.23110905
0.8	1.000	19.470	04.493	18.749	00.160	0.18903568
0.63	1.397	20.867	03.096	12.919	00.126	0.13025917
0.5	0.499	21.366	02.597	10.837	00.100	0.10926456
0.315	0.599	21.965	01.998	08.337	00.063	0.08406261
0.2	0.499	22.464	01.499	06.255	00.040	0.06306799
0.16	0.300	22.764	01.199	05.003	00.032	0.05044598
0.08	0.600	23.364	00.599	02.499	00.016	0.02520195
0	0.599	23.963	00.00	00.00	00.00	00.00

Tableau 17: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/5 de la marne anguleuse après essai.

Ø mm	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisats cumulés (gr)	Tamisats cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
5	5.292	05.292	18.677	77.921	01.00	0.80296647
3.15	6.799	12.091	11.878	49.555	00.630	0.51066208
2	3.494	15.585	08.384	34.978	00.400	0.36044712
1	3.394	18.979	04.990	20.818	00.200	0.21453138
0.8	1.098	20.077	03.892	16.237	00.160	0.16732588
0.63	1.197	21.274	02.695	11.243	00.126	0.11586414
0.5	0.499	21.773	02.196	09.162	00.100	0.09441101
0.315	0.599	22.372	01.597	06.662	00.063	0.06865864
0.2	0.499	22.871	01.098	04.580	00.040	0.0472055
0.16	0.200	23.071	00.898	03.746	00.032	0.03860705
0.08	0.499	23.570	00.399	01.664	00.016	0.01715391
0	0.399	23.969	00.00	00.00	00.00	00.00

Tableau 18: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 0/5 de la marne allongée après essai.

Ø mm	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisats cumulés (gr)	Tamisats cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
5	5.092	05.092	18.874	78.753	01.00	0.80417554
3.15	5.990	11.082	12.884	53.759	00.630	0.54895611
2	4.193	15.275	08.691	36.263	00.400	0.37030251
1	3.399	18.674	05.292	22.081	00.200	0.22547934
0.8	1.098	19.772	04.194	17.499	00.160	0.17869621
0.63	1.497	21.269	02.697	11.253	00.126	0.11491265
0.5	0.599	21.868	02.098	08.754	00.100	0.08939071
0.315	0.699	22.567	01.399	05.837	00.063	0.05960801
0.2	0.300	22.867	01.099	04.585	00.040	0.04682573
0.16	0.200	23.067	00.899	03.751	00.032	0.03830422
0.08	0.300	23.367	00.599	02.499	00.016	0.02552194
0	0.599	23.966	00.00	00.00	00.00	00.00

Cas de la Classe 5/10**Tableau 19:** Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 5/10 de la marne allongée après essai.

Ø mm	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisats cumulés (gr)	Tamisats cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
10	7.288	07.288	14.969	67.255	01.00	0.67812811
8	3.894	11.182	11.075	49.759	00.800	0.50172148
6.3	5.683	16.865	05.392	24.226	00.630	0.24426928
5	2.895	19.760	02.497	11.218	00.500	0.11311951
3.15	1.398	21.158	01.099	04.937	00.315	0.04978708
2	0.599	21.757	00.500	02.246	00.200	0.02265108
1	0.200	21.957	00.300	01.347	00.100	0.01359065
0.8	0.100	22.057	00.200	00.898	00.080	0.00906043
0.63	00.00	22.057	00.200	00.898	00.063	0.00906043
0.5	0.100	22.157	00.100	00.449	00.050	0.00453022
0.315	00.00	22.157	00.100	00.449	0.0315	0.00453022
0.2	00.00	22.157	00.100	00.449	00.020	0.00453022
0.16	00.00	22.157	00.100	00.449	00.016	0.00453022
0.08	0.100	22.257	000.00	00.00	00.008	00.00
0	00.00	22.257	00.00	00.00	00.00	00.00

Tableau 20: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 5/10 de la marne anguleuse après essai.

Ø mm	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisats cumulés (gr)	Tamisats cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
10	6.19	06.19	15.891	71.966	01.00	0.72961433
8	5.599	11.789	10.292	46.610	00.800	0.47254362
6.3	4.900	16.689	05.392	24.419	00.630	0.24756657
5	2.596	19.285	02.796	12.662	00.500	0.12837466
3.15	0.998	20.283	01.798	08.142	00.315	0.0825528
2	0.599	20.882	01.199	05.430	00.200	0.05505051
1	0.799	21.681	00.400	01.811	00.100	0.01836547
0.8	0.100	21.781	00.300	01.358	00.080	0.0137741
0.63	00.00	21.781	00.300	01.358	00.063	0.0137741
0.5	0.100	21.881	00.200	00.905	00.050	0.00918274
0.315	00.00	21.881	00.200	00.905	0.0315	0.00918274
0.2	0.100	21.981	00.100	00.453	00.020	0.00459137
0.16	00.00	21.981	00.100	00.452	00.016	0.00459137
0.08	0.100	22.081	00.00	00.00	00.008	00.00
0	00.00	22.081	00.00	00.00	00.00	00.00

Tableau 21: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 5/10 de la marne sous arrondie après essai.

Ø mm	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisats cumulés (gr)	Tamisats cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
10	9.685	9.685	12.386	56.11888904	01.00	0.56650201
8	5.192	14.877	7.194	32.59480767	00.800	0.32903403
6.3	6.294	21.171	0.900	4.077749083	00.630	0.04116356
5	0.400	21.571	0.500	2.265416157	00.500	0.02286864
3.15	0.100	21.671	0.400	1.812332926	00.315	0.01829491
2	0.100	21.771	0.300	1.359249694	00.200	0.01372119
1	00.00	21.771	0.300	1.359249694	00.100	0.01372119
0.8	00.00	21.771	0.300	1.359249694	00.080	0.01372119
0.63	00.200	21.971	0.100	0.453083231	00.063	0.00457373
0.5	00.00	21.971	0.100	0.453083231	00.050	0.00457373
0.315	0.100	22.071	00.00	00.00	0.0315	00.00
0.2	00.00	22.071	00.00	00.00	00.020	00.00
0.16	00.00	22.071	00.00	00.00	00.016	00.00
0.08	00.00	22.071	00.00	00.00	00.008	00.00
0	00.00	22.071	00.00	00.00	00.00	00.00

Tableau 22: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 5/10 du schiste anguleux après essai.

Ø mm	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisats cumulés (gr)	Tamisats cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
10	5.292	5.292	16.084	75.24326347	01.00	0.75253825
8	5.800	11.092	10.284	48.11002994	00.800	0.48116783
6.3	4.592	15.684	05.692	26.62799401	00.630	0.26631732
5	2.596	18.28	03.096	14.48353293	00.500	0.14485566
3.15	2.396	20.676	00.700	3.274700599	00.315	0.0327516
2	0.500	21.176	00.200	0.935628743	00.200	0.0093576
1	0.100	21.276	00.100	0.467814371	00.100	0.0046788
0.8	00.00	21.276	00.100	0.467814371	00.080	0.0046788
0.63	0.100	21.376	00.00	00.00	00.063	00.00
0.5	00.00	21.376	00.00	00.00	00.050	00.00
0.315	00.00	21.376	00.00	00.00	0.0315	00.00
0.2	00.00	21.376	00.00	00.00	00.020	00.00
0.16	00.00	21.376	00.00	00.00	00.016	00.00
0.08	00.00	21.376	00.00	00.00	00.008	00.00
0	00.00	21.376	00.00	00.00	00.00	00.00

Tableau 23: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 5/10 du schiste sous arrondie après essai.

Ø mm	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisats cumulés (gr)	Tamisats cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
10	9.085	9.085	12.189	57.29529003	01.00	0.57300677
8	9.000	18.085	03.189	14.9901288	00.800	0.14991538
6.3	1.890	19.975	01.299	6.106044937	00.630	0.06106619
5	0.600	20.575	00.699	3.285700856	00.500	0.0328601
3.15	0.499	21.074	00.200	0.940114694	00.315	0.00940203
2	0.100	21.174	00.100	0.470057347	00.200	0.00470102
1	00.00	21.174	00.100	0.470057347	00.100	0.00470102
0.8	0.100	21.274	00.00	00.00	00.080	00.00
0.63	00.00	21.274	00.00	00.00	00.063	00.00
0.5	00.00	21.274	00.00	00.00	00.050	00.00
0.315	00.00	21.274	00.00	00.00	0.0315	00.00
0.2	00.00	21.274	00.00	00.00	00.020	00.00
0.16	00.00	21.274	00.00	00.00	00.016	00.00
0.08	00.00	21.274	00.00	00.00	00.008	00.00
0	00.00	21.274	00.00	00.00	00.00	00.00

Tableau 24: Pourcentage des tamisât cumulés pour la granulométrie 5/10 du schiste allongée après essai.

Ø mm	Refus (gr)	refus cumulés (gr)	tamisats cumulés (gr)	Tamisats cumulés (%)	r/rL	M(R<r)/MT
10	02.995	2.795	18.476	86.860	01.00	0.87245597
8	03.895	6.69	14.581	68.548	00.800	0.68853001
6.3	07.688	14.378	06.893	32.405	00.630	0.32549464
5	02.200	16.578	04.693	22.062	00.500	0.22160835
3.15	04.193	20.771	00.500	02.350	00.315	0.02361052
2	00.200	20.971	00.300	01.410	00.200	0.01416631
1	00.100	21.071	00.200	00.940	00.100	0.00944421
0.8	00.100	21.171	00.100	00.470	00.080	0.0047221
0.63	00.00	21.171	00.100	00.470	00.063	0.0047221
0.5	00.00	21.171	00.100	00.470	00.050	0.0047221
0.315	00.00	21.171	00.100	00.470	0.0315	0.0047221
0.2	00.00	21.171	00.100	00.470	00.020	0.0047221
0.16	00.00	21.171	00.100	00.470	00.016	0.0047221
0.08	0.100	21.271	00.00	00.00	00.008	00.00
0	00.00	21.471	00.00	00.00	00.00	00.00

Les courbes de tendance du calcul de la dimension fractale par la méthode des masses :

Cas de la 0/16

Essai gel dégel

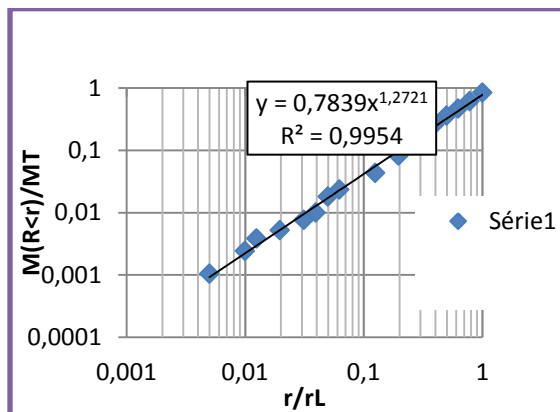


Figure7 : schiste de forme sous arrondie

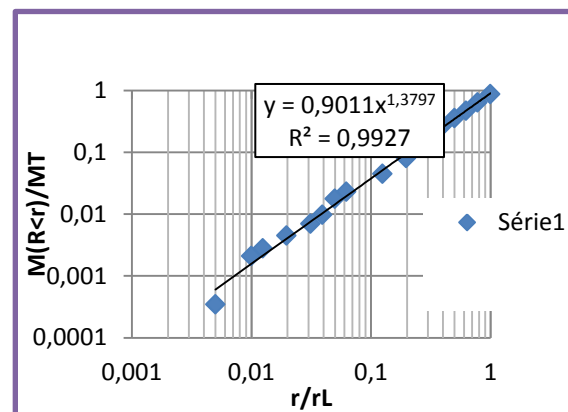


Figure 8: schiste de forme allongée

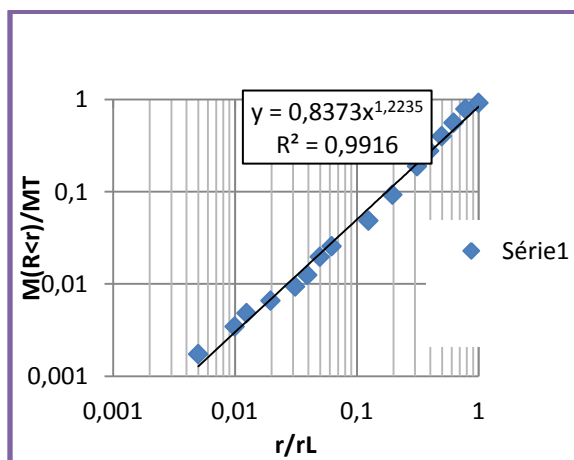


Figure9: schiste de forme anguleuse

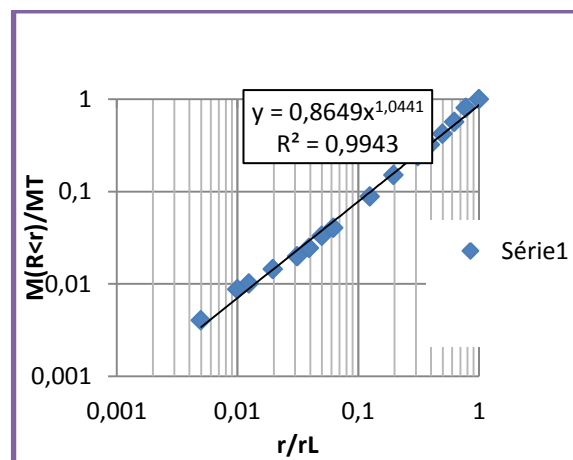


Figure 10: marne de forme sous arrondie

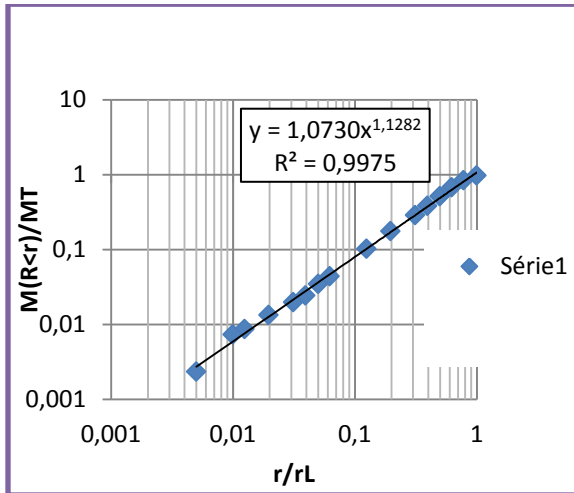


Figure11: marne de forme anguleuse

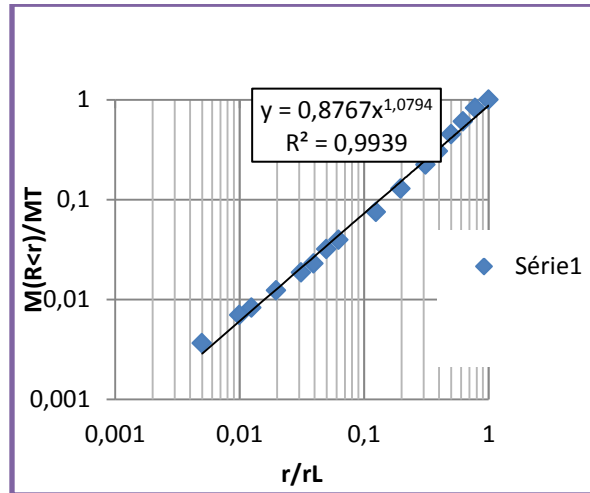


Figure 12 : marne de forme allongée

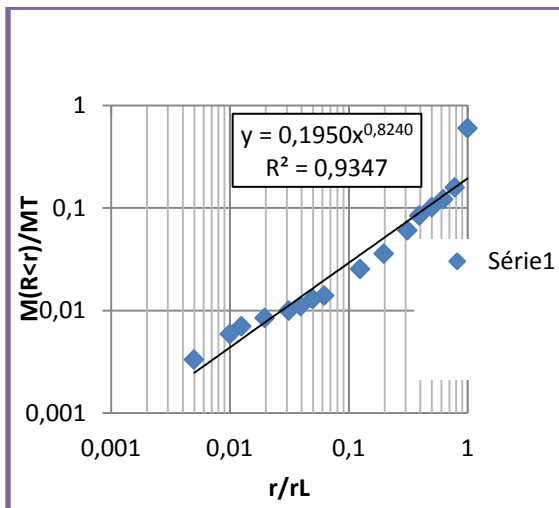


Figure13 : gré de forme anguleuse

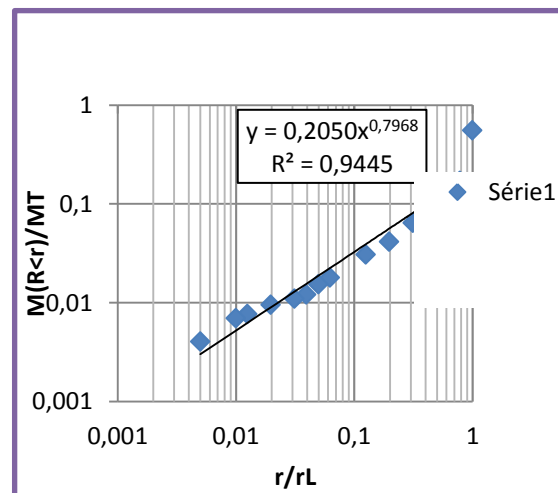


Figure 14 : gré de forme sous arrondie

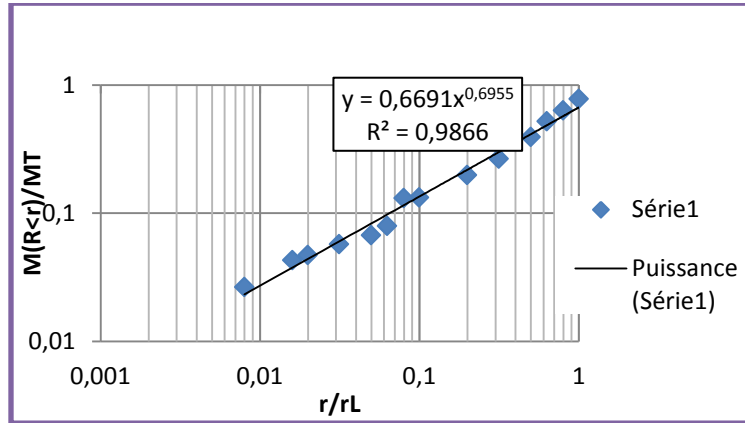


Figure 15 : la pegmatite

Essai d`altérabilité

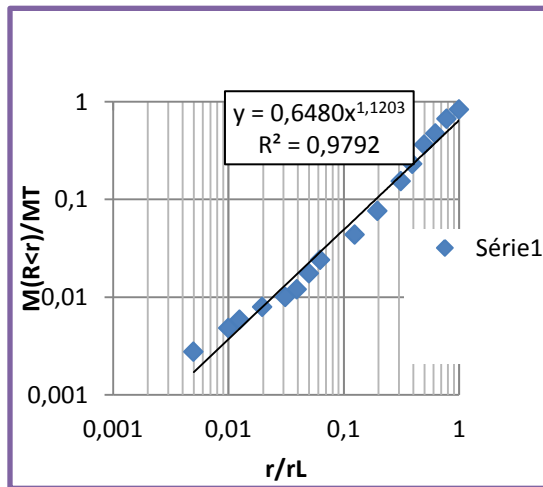


Figure 16 : schiste de forme sous arrondie

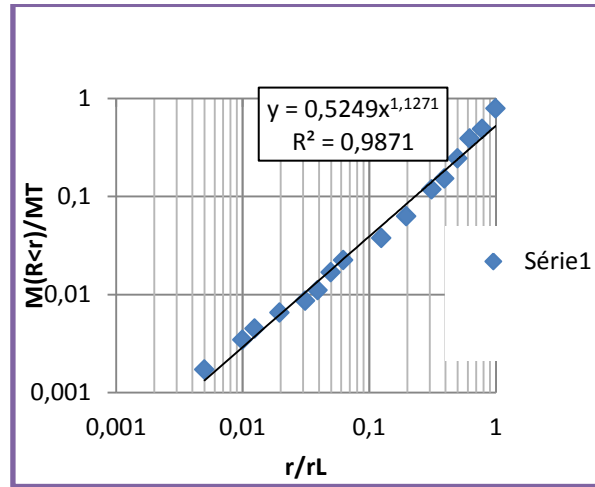


Figure 17 : schiste de forme allongée

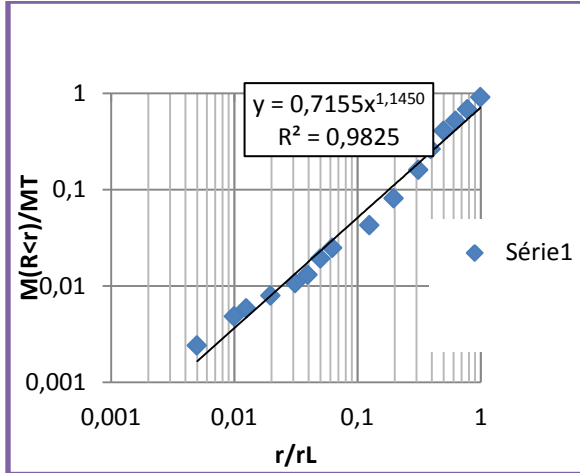


Figure 18 : schiste de forme anguleuse

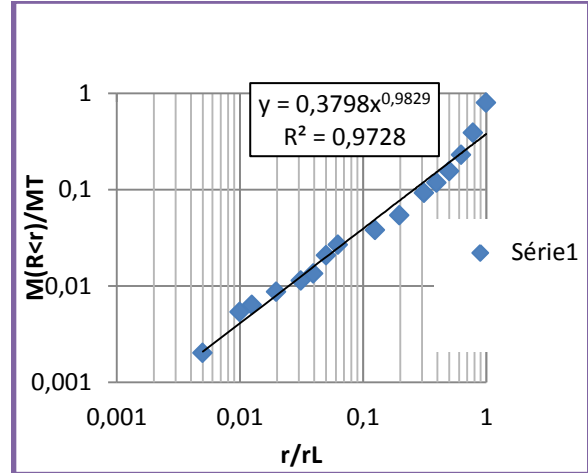


Figure 19 : marne de forme sous arrondie

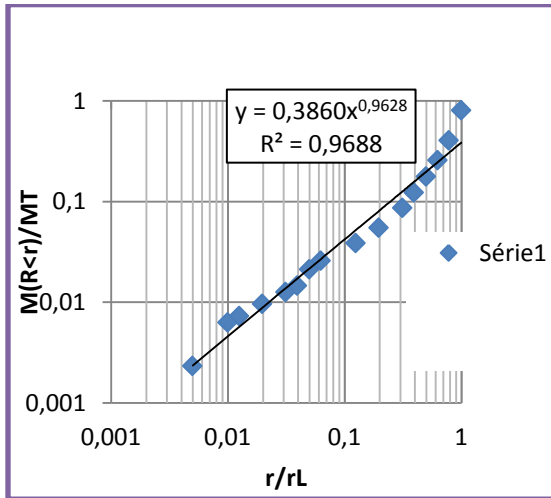


Figure 20 : marne de forme anguleuse

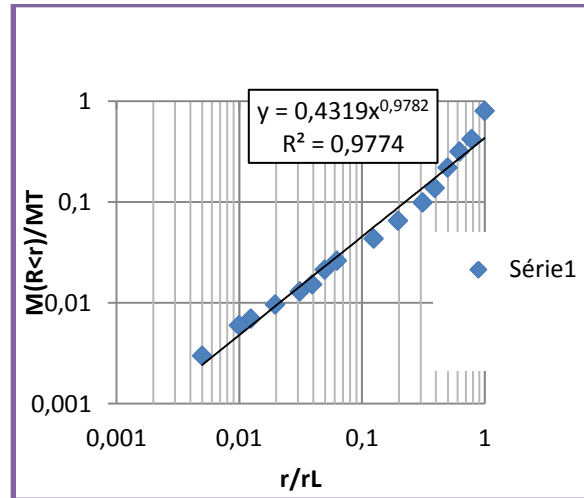


Figure 21 : marne de forme allongée

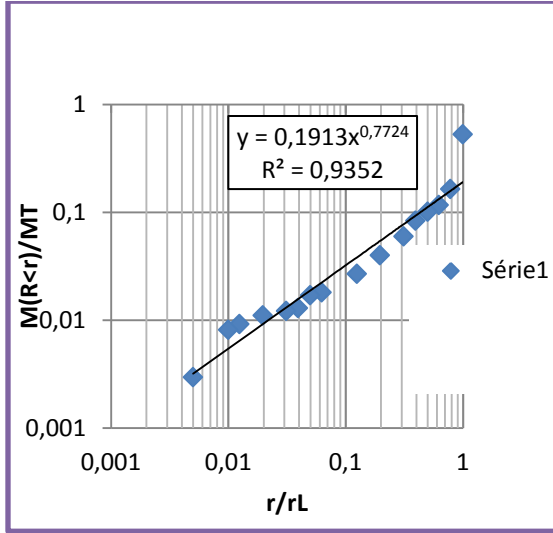


Figure 22 : gré de forme anguleuse

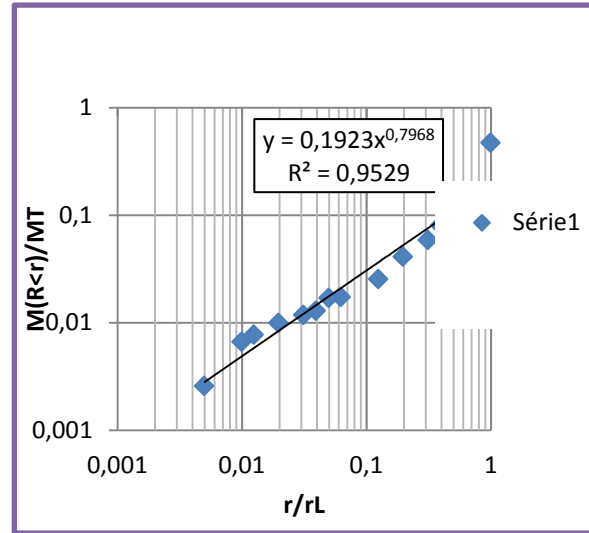


Figure 23 : gré de forme sous arrondi

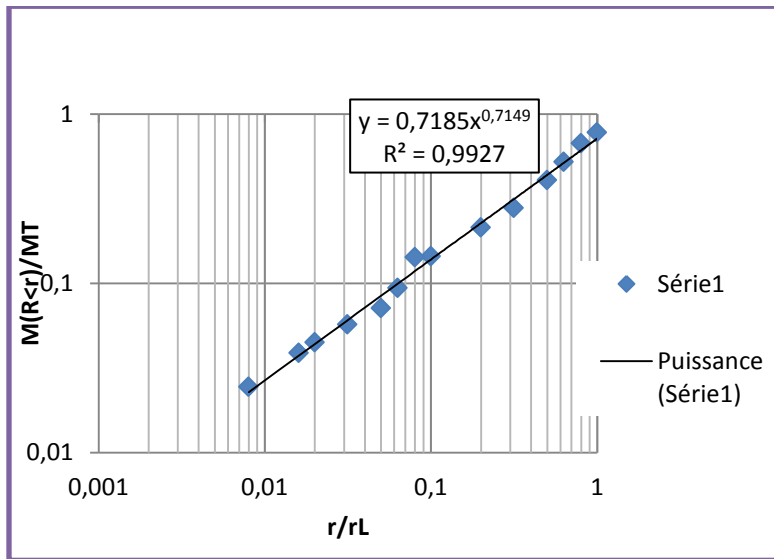


Figure 24 : la pegmatite

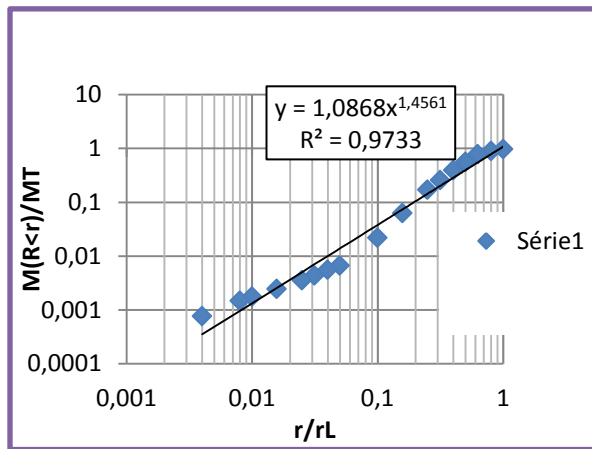
Essai de dégradabilité

Figure 25 : schiste de forme sous arrondie

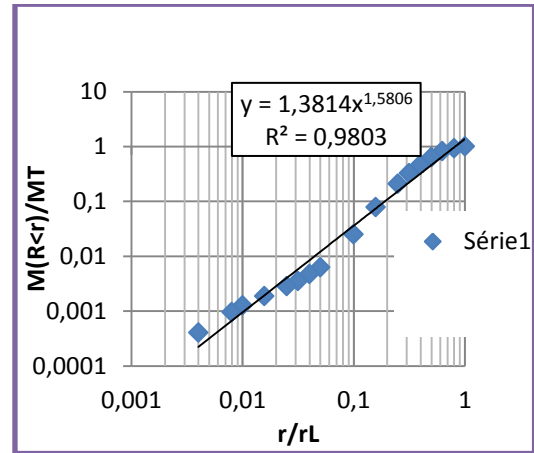


Figure 26 : schiste de forme allongée

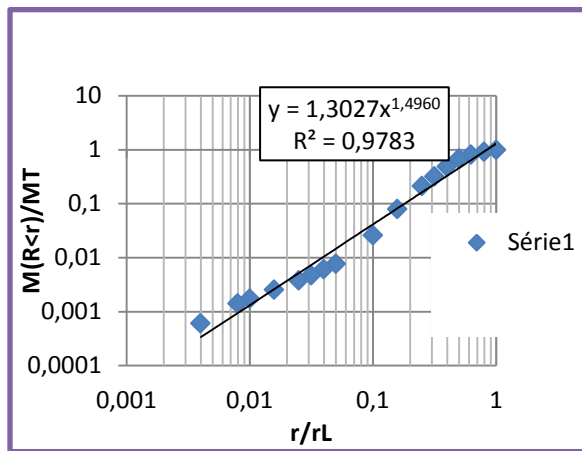


Figure 27: schiste de forme anguleuse

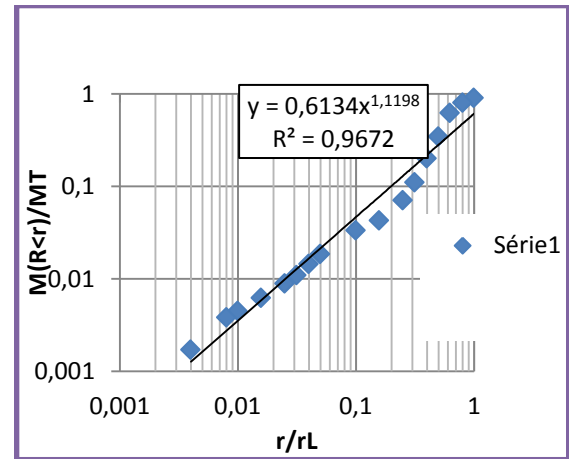


Figure 28 : marne de forme sous arrondie

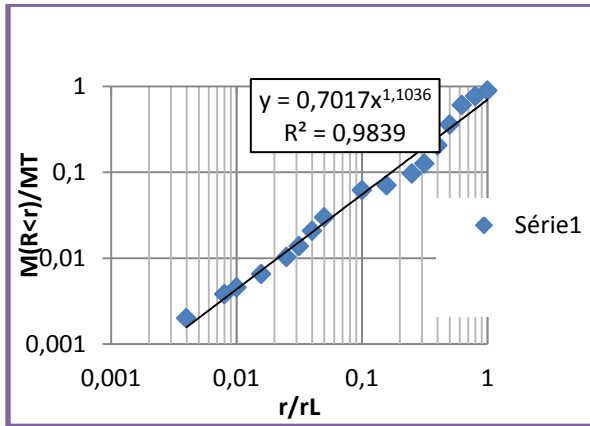


Figure 29: marne de forme allongée

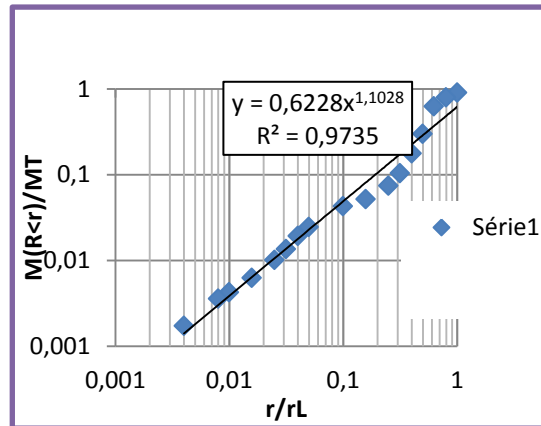


Figure 30 : marne de forme anguleuse

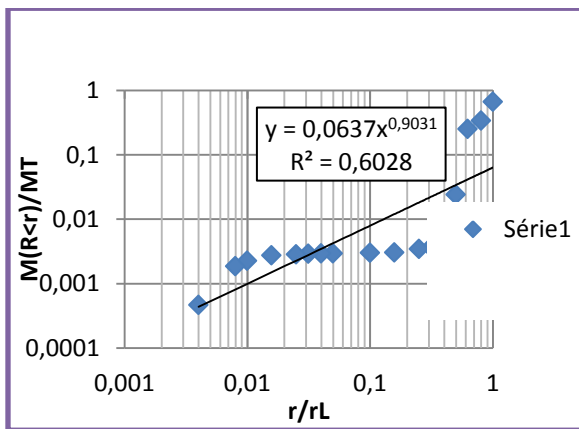


Figure 31: gré de forme anguleuse

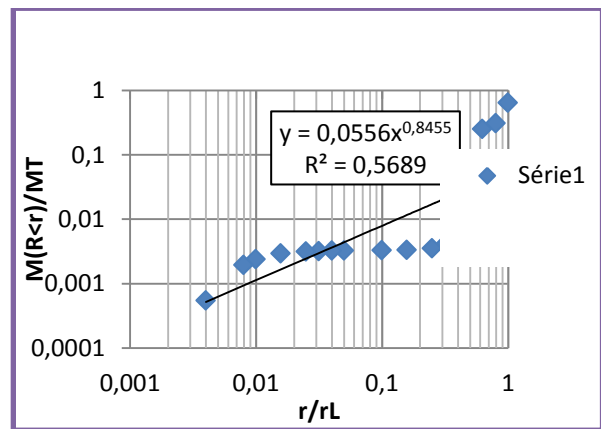


Figure 32 : gré de forme sous arrondie

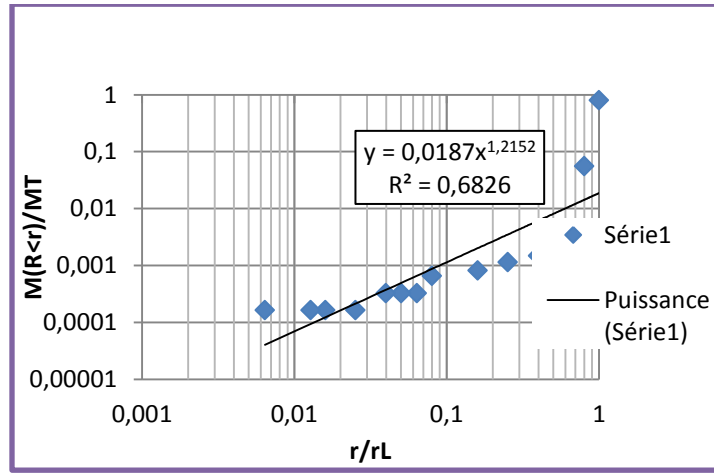


Figure 33 : la pegmatite

Cas de La classe 0/5

L`essai gel/dégel

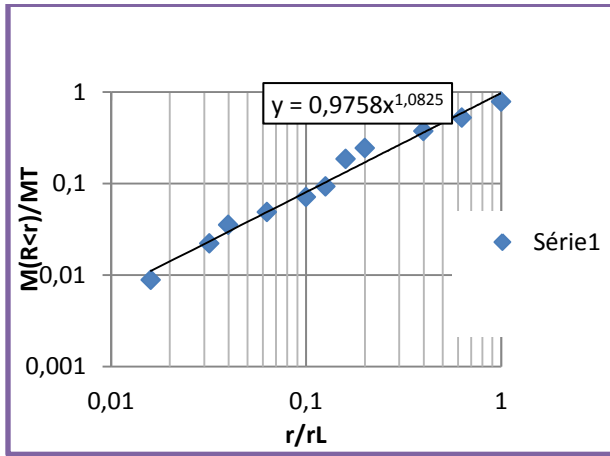


Figure 34 : schiste de forme sous arrondie

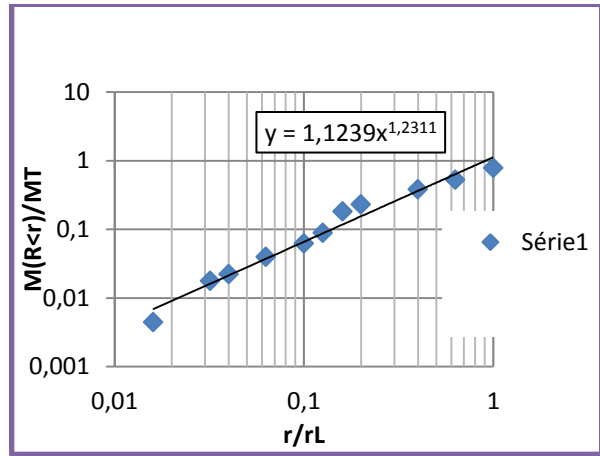


Figure 35: schiste de forme allongée

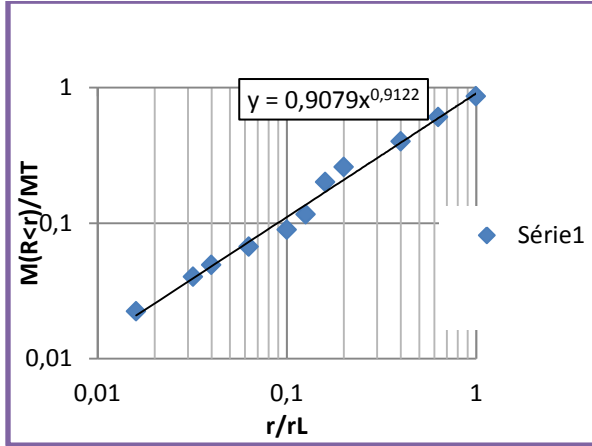


Figure 36 : schiste de forme anguleuse

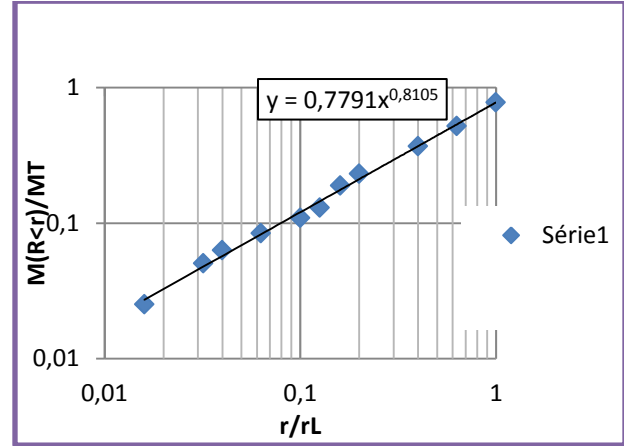


Figure 37 : marne de forme sous arrondie

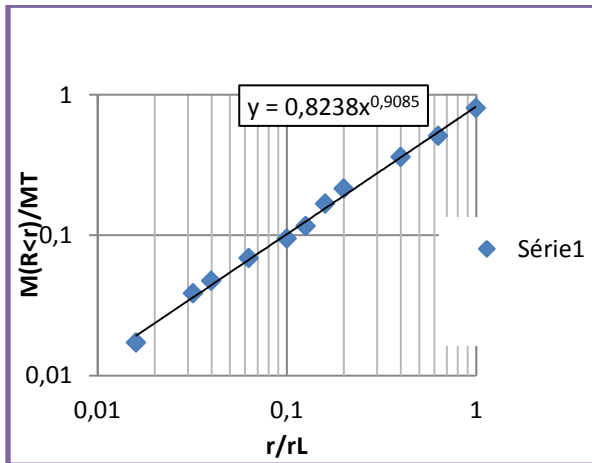


Figure 38 : marne de forme anguleuse

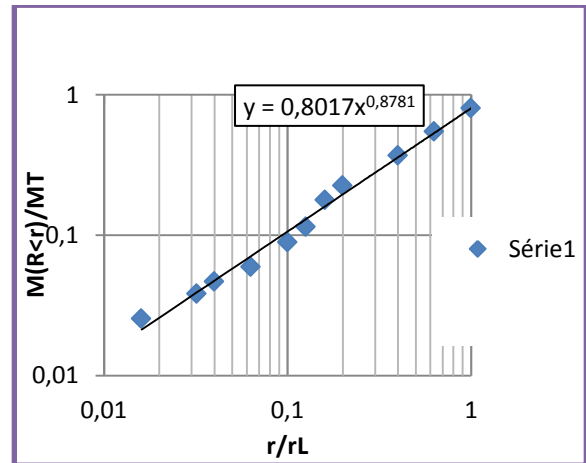
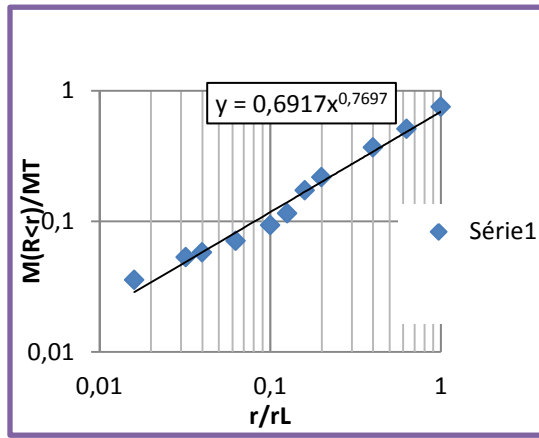
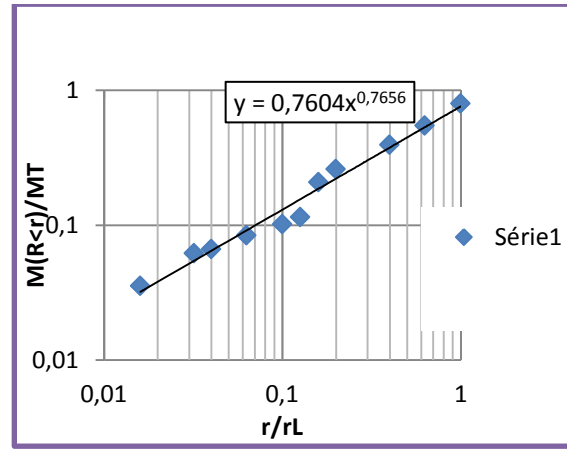
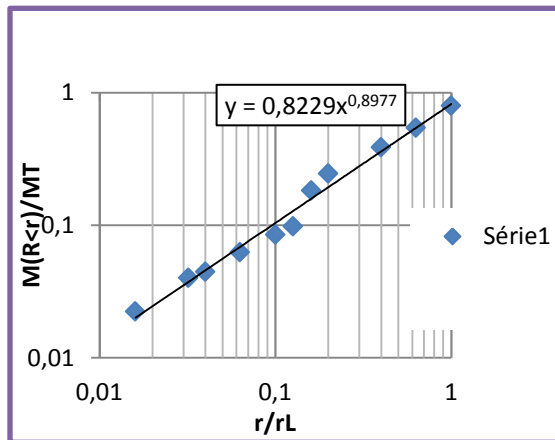
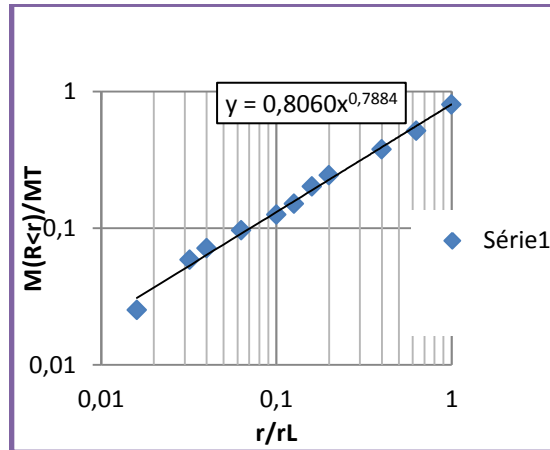


Figure 39 : marne de forme allongée

Essai d'altérabilité**Figure 40:** schiste de forme sous arrondie**Figure 41 :** schiste de forme allongée**Figure 42 :** schiste de forme anguleuse**Figure 43 :** marne de forme sous arrondie

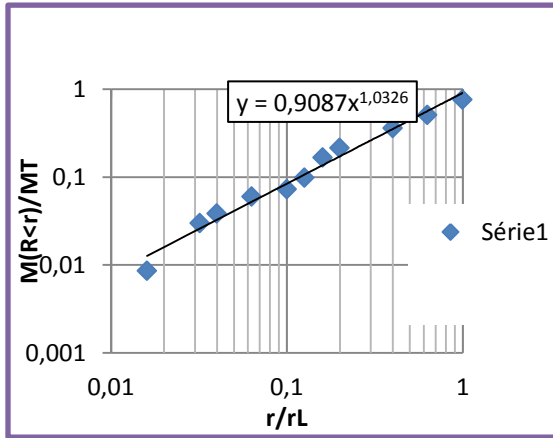


Figure 44: marne de forme anguleuse

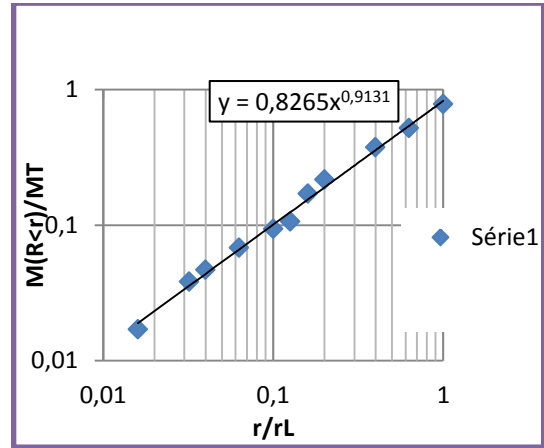


Figure 45: marne de forme allongée

Cas de la Classe 5/10

Essai gel/ dégel

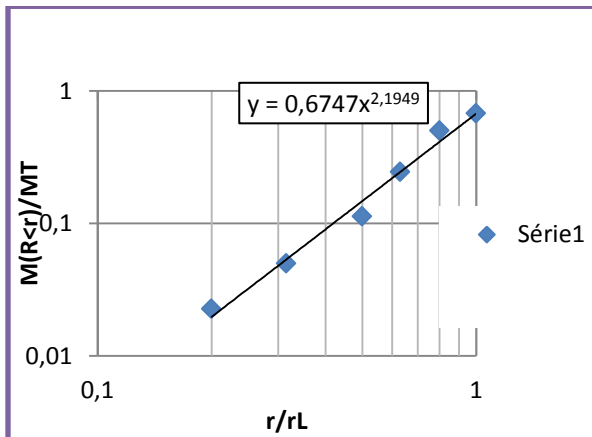


Figure 46: marne de forme allongée

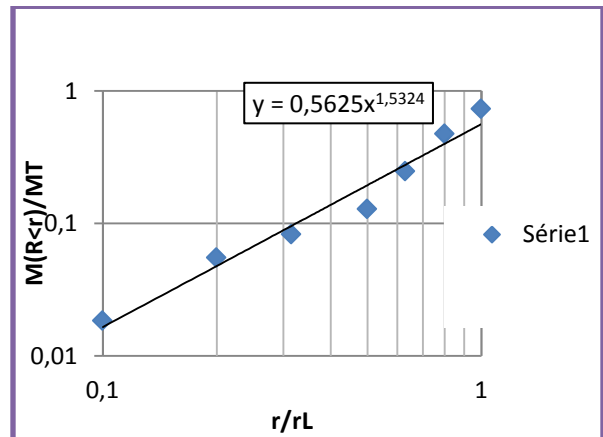


Figure 47 : marne de forme anguleuse

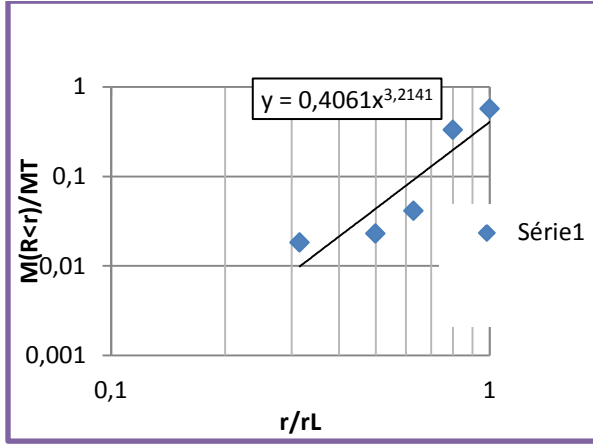


Figure 48 : marne de forme sous arrondie

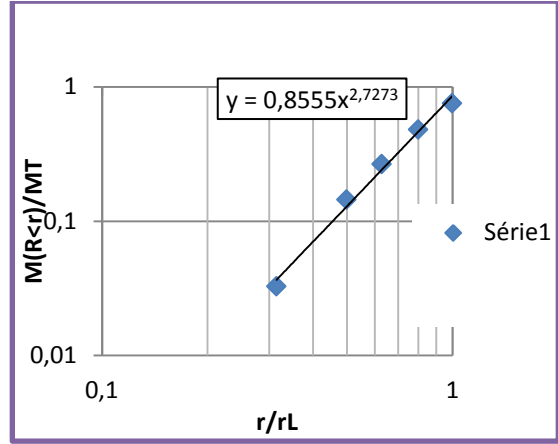


Figure 49 : schiste de forme anguleuse

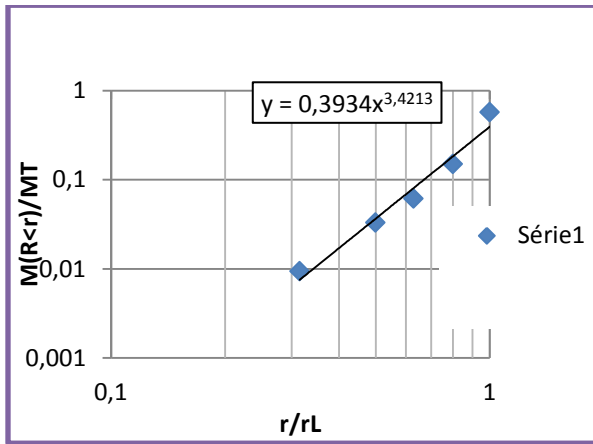


Figure 50 : schiste de forme sous arrondie

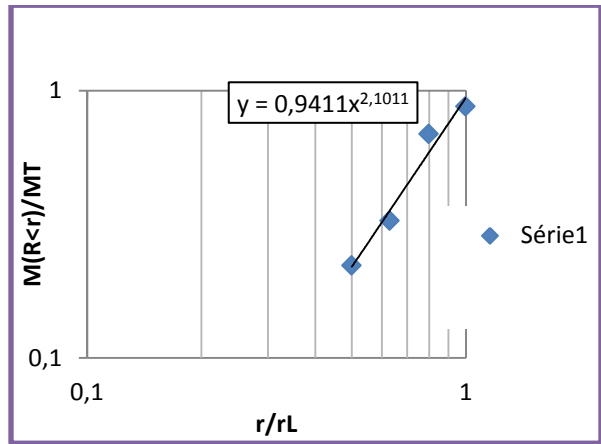
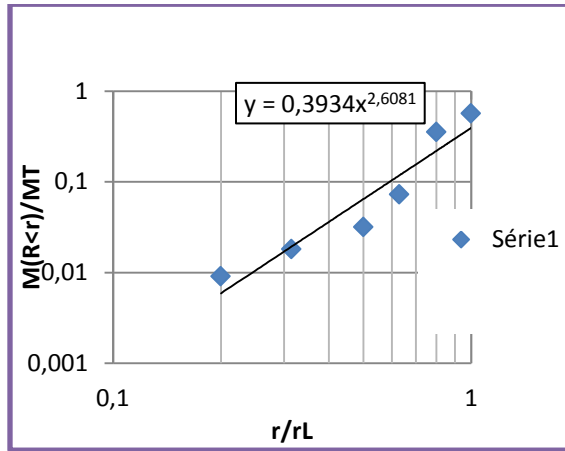
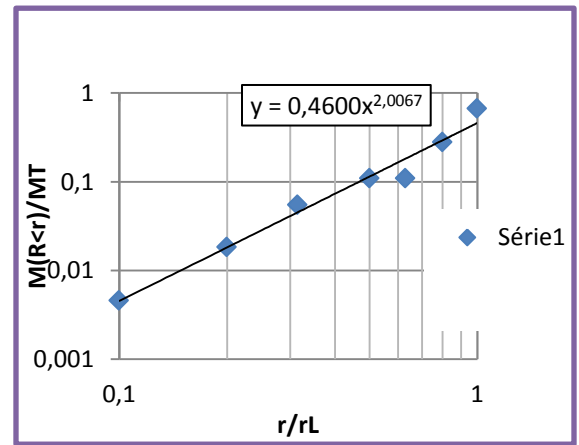
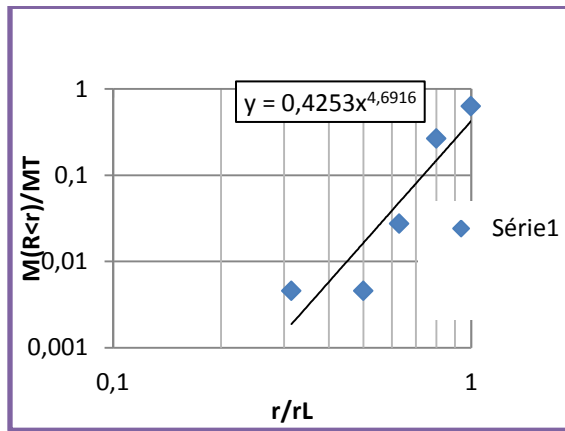
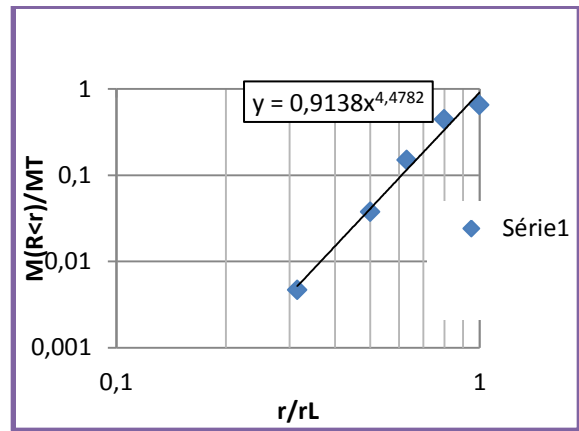


Figure 51 : schiste de forme allongée

Essai d'altérabilité**Figure 52 :** marne de forme allongée**Figure 53 :** marne de forme anguleuse**Figure 54 :** marne de forme sous arrondie**Figure 55:** schiste de forme anguleuse

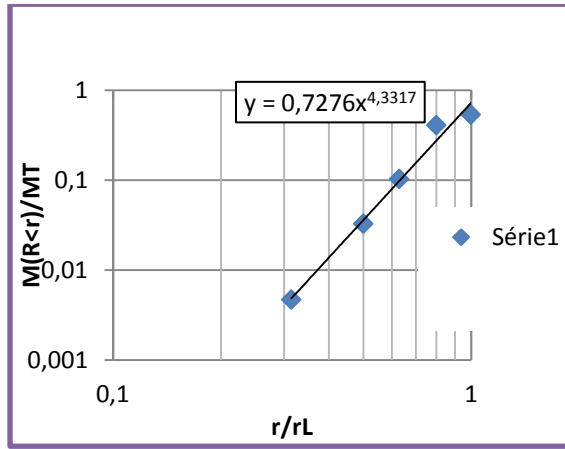


Figure 56 : schiste de forme sous arrondie

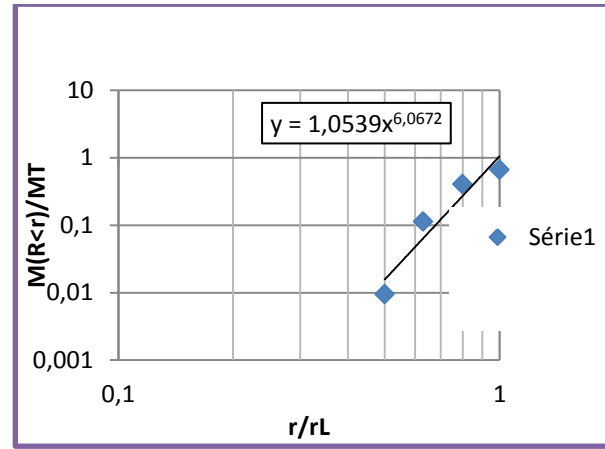


Figure 57 : schiste de forme allongée



Bibliographie