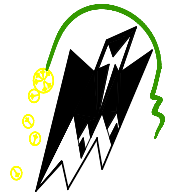


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté du génie de la construction
Département de Génie Civil



Mémoire de fin d'étude

*En vue d'obtention du diplôme Master en Génie Civil.
Spécialité : Géotechnique.*

Thème

*Etude de la fractalité des sols argileux
sous l'effet des réchauffements
climatiques*



Présenté par :

TOUADI Nawal

Devant le jury :

M^r MELBOUCI. B

Président

M^{me} BOUZEBODJA. A

Promotrice

M^r DEHMOUS. H

Examineur

2021/2022

Remerciements

Je remercie, tout d'abord, l'unique ALLAH de nous avoir donné le courage et la patience pour bien mener ce travail.

Je présente mes remerciements les plus sincères à notre promotrice Mme BOUZEBODJA Aldjia pour ces orientations et conseils tous le longs de notre travail.

Je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce projet

Je remercie le responsable de laboratoire de recherche géotechnique

M^r EL AACHEBI Kamel.

Mes vifs remerciements iront aussi aux membres du jury qui me feront l'honneur de juger ce travail et de l'enrichir par leur proposition.

Mes sincères remerciements vont à toute ma famille pour leur aide, leur encouragement, leur amour et leur compréhension.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A ma très chère mère

Mon cher père

La raison de ma vie et ma réussite, qui malgré tous les mots qui existent au monde, aucune dédicace n'est capable de refléter l'estime que j'ai pour eux.

A mes chère sœurs Samia, Karima et Fadila ; A mes chers frères

Omar et Abdennour.

Mes amies surtout : Sara, Khaled, Hassina et Lila, Rachida et ma

chère amie Zahra.

A toute la promotion 2022 d'université Mouloud Mammeri.

Nawal

Liste des symboles et notations

Notation	Définition
W	Teneur en eau (%).
WL	Limite de liquidité (%).
WP	Limite de plasticité (%).
IP	Indice de plasticité (%).
IC	Indice de consistance (%).
AC	Indice de consistance (%).
ρ_S	La masse volumique des particules solides (g/cm^3).
VBS	La valeur de bleu de sol
DFR	Dimension fractale de rugosité
DF	Dimension fractale
W_w	Masse de l'eau (g).
W_s	Masse de l'échantillon à l'état sec (g).
m_1	Masse du pycnomètre vide (g).
m_2	Masse du pycnomètre plein d'eau (g).
m_3	Masse du pycnomètre avec le matériau (g).
m_4	Masse du pycnomètre avec le matériau et l'eau (g).
m_s	Masse sèche (g).
m_h	Masse humide (g).
ρ_w	Masse volumique de l'eau égale à 1 (g/cm^3).
ρ_s	La masse volumique des particules solides (g/cm^3).
ρ_d	Masse volumique du sol sec (g/cm^3).
ρ_h	Masse volumique humide (g/cm^3).
Sr	Degrés de saturation (%).
V_s	Volume des grains solides (cm^3)
V_v	Volume des vides (cm^3)
V_w	Volume de l'eau (cm^3).
e	Indice des vides.

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Les effets des changements climatiques sur les sols.

Figure I.1 : Les composantes du système climatique (Mazar. A, 2014).....	1
Figure I.2 : Les types de climats (la climatologie.free.fr).....	3
Figure I.3 : Le Sebaou depuis le village d'Akaoudj	7
Figure I.4 : wilaya de Tizi-Ouzou.....	8
Figure I.5 : Global surface température relative de 1880 à 2020 (Climat _ en 1988, 2020 était bien prédit – {Sciences ² }. mhtml. Le Monde.fr).....	9

Chapitre II : Les sols fins et leurs structures

Figure II.1 : Fissure sur les murs et fissure diagonales (DERRICHE et <i>al.</i> , 2002).....	13
Figure II.2 : Cisaillement au niveau de nœuds (DERRICHE et <i>al.</i> , 2002).....	13
Figure II.3 : Cisaillement au niveau des nœuds (Derriche Z et <i>al.</i> , 2002).....	14
Figure II.4 : Dégradation des routes (FREEAH .2006).....	14
Figure II.5 : Structure d'une argile. (P. Andrianne, 2003).....	16
Figure II.6 : Couches tétraédriques, octaédriques (MADJNOUN.A, 2014)	16
Figure II.7: a) Schéma de la structure de la kaolinite (LAMBE.A, 1953)	
b) Vue isométrique de la structure atomique de l'atomique de la kaolinite (MADJNOUN.A, 2014).....	17
Figure II.8 : photographie d'une kaolinite prise au microscope électronique à balayage (DJONKAMLA.Y, 2010)	18
Figure II.9 : schéma de la structure de l'illite (LAMBE.A ,1953)	19
Figure II.10 : Photographie d'une illite prise au microscope à balayage (Grim, 1959). Grim, R. E. (1959). Physico-chemical properties of soils: Clay minerals. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 85(1959), 1-17	19
Figure II.11: Photographie au MEB de la texture matricielle (a : Argile Verte de Romainville) et la texture agrégé (b : Argile de Bavent) (VINCENT.L et Al. 2009)	32

Chapitre III : Détermination de la dimension fractale

Figure III.1 : objet fractal et non- fractal (R. LOPES, <i>Analyses fractale et multifractale en imagerie médicale : Outils, validations et applications</i> . Thèse de Doctorat, Université de Lille 1, (2009). V. TOPPETS, <i>Morphologie, croissance et remaniement du tissu osseux</i> . Article de synthèse de l'université de Liège, (2004).....	26
Figure III.2 : courbe de Von koch (L. PAULHAC, <i>Outils et méthodes d'analyse d'images 3D texturées : Application à la segmentation des images échographiques</i> . Thèse de Doctorat, Université François Rabelais de Tours, (2009)	27
Figure III.3 : Ensemble de Mandelbrot (R. JENNANE, <i>Caractérisation multidimensionnelle de l'architecture osseuse</i> . Thèse de Doctorat, Institut de PRISME, Polytech' Orléans, (2009) ..	28

Figure III.4 : Dessin de l'ensemble de Julia (R. JENNANE, Caractérisation multidimensionnelle de l'architecture osseuse. Thèse de Doctorat, Institut de PRISME, Polytech' Orléans, (2009)	29
Figure III.5 : Ensemble de fractal non uniforme.	
D. Driss, Identification des pathologies du tissu osseux par traitement d'image. Mémoire de magister, UMMTO, (2006)	30
Figure III.6 : Fractale naturel (nuage)	30
E. LESPESSAILLES and al, <i>Imagerie de la microarchitecture osseuse</i> . Revu de rhumatisme, vol. 73, p.435-443, (2006).	
Figure III.7 : Fractals aléatoires.....	31
Pr. LEHEUP, <i>Les tissus osseux</i> . Cours de Babamab-PROD.	
J_Y DEVEUX, <i>L'imagerie par résonnancema gnétique</i> . P & M – Paris 6, (2006).	
Figure III.8 : Exemple de fractals aléatoires (BOUZEBOUJJA.A, 2016).....	31
Figure III.9 : Application de la dimension fractale par (Box- couting).....	34
Figure III.10 : Droite de la dimension fractale par la méthode des boites	34
Figure III.11 : (a) Le grain de sable après l'analyse de l'image, le reste des figures contient les polygones tracés sur le grain avec une taille de mesure (b) 2 mm, (c)1mm et (d) 0.25mm... .	35
Figure III.12 : Calcul de la dimension fractale (a) Totale (b) Texturale (D1) et structurale (D2)	36
Figure III.13 : Calcul du périmètre et de la surface d'un grain ($\Phi= 6.3$ mm) à l'aide de logiciel Auto-CAD 2009 (Bouzeboudja. A, 2016)	36
Figure III.14 : Application de la méthode d'Area–Perimeter d'un gros grain de sable d'origine d'une pierre calcaire	38
Figure III.15 : Schéma représentant la méthode des lignes parallèles.....	38
Figure III.16 : Courbe de la dimension fractale de la méthode des lignes parallèles.....	39
Figure III.17 : Détermination de la dimension fractale DFFR par la méthode des masses (Bouzboudja. A, 2016).....	40
Figure III.18 : Technique de Comptage Différentiel de Boîtes (CDB) (Sarkar et Chaudhuri, 1992).....	41
Figure III.19 : Deux pixels appartenant à deux cubes différents d'altitude 3 alors que leur distance suivant (oz) est inférieure à 3 (Li et al. 2009).	43
Figure III.20 : Nombre N_s de cubes qui couvre l'image (Pleshanov et al., 2010)	44
Chapitre IV : Les essais d'identification des sols étudiés	
Figure IV.1 : Image satellite qui montre les d'échantillonnage.....	48
Figure IV.2 : Limite limites d'Atterberg (Santamarina, 2001).....	51
Figure IV.3 : La fermeture de la rainure (Cheheb.F ,2016).....	52
Figure IV.4 : La confection du rouleau (Cheheb.F ,2016).....	53
Figure IV.5 : La fissuration et brisure du rouleau (Cheheb.F ,2016).....	53

Figure IV.6 : Matériel d'essai au bleu de méthylène (résultats de l'essai à la tâche)	55
--	----

Chapitre V : Etude des effets climatiques au laboratoire

Figure V.1 : Préparations des échantillons	58
Figure V.2 : l'étuve	59
Figure V.3 : Mouillage des échantillons à l'aide d'une seringue	60
Figure V.4 : Echantillon Azazga (Bouzeguene) avant essai	60
Figure V.5 : Echantillon Azazga(Handou) avant essai	60
Figure V.6 : Echantillon Azeffon avant essai	60
Figure V.7 : Echantillon Sud-ouest avant essai	61
Figure V.8 : Echantillon Sidi Naamane avant essai	61
Figure V.9 : Echantillon Azazga (Bouzeguene) après 1^{er} cycle	61
Figure V.10 : Echantillon Azazga(Handou) 1^{er} cycle	61
Figure V.11 : Echantillon Azeffoun après 1^{er} cycle	62
Figure V.12 : Echantillon Sud-ouest après 1^{er} cycle	62
Figure V.13 : Echantillon Sidi Naamane après 1^{er} cycle	62
Figure V.14 : Echantillon Azazga (Bouzeguene) après 2^{er} cycle	62
Figure V.15 : Echantillon Azazga (Handou)après 2^{er} cycle	63
Figure V.16 : Echantillon Azeffoun après 2^{er} cycle	63
Figure V.17 : Echantillon Sud-ouest après 2^{er} cycle	63
Figure V.18 : Echantillon Sidi Naamane après 2^{er} cycle	63
Figure V.19 : Echantillon Azazga (Bouzeguene) après 3^{er} cycle	64
Figure V.20 : Echantillon Azazga (Handou) après 3^{er} cycle	64
Figure V.21 : Echantillon Azeffoun après 3^{er} cycle	64
Figure V.22 : Echantillon Sud-ouest après 3^{er} cycle	64
Figure V.23 : Echantillon Sidi Naamane après 3^{er} cycle	65
Figure V.24 : Echantillon Azazga(Bouzeguene) après 4^{er} cycle	65
Figure V.25 : Echantillon Azazga (Handou) après 4^{er} cycle	65
Figure V.26 : Echantillon Azeffoun après 4^{er} cycle	65
Figure V.27 : Echantillon Sud- ouest après 4^{er} cycle	66
Figure V.28 : Echantillon Sidi Naamane après 4^{er} cycle	66
Figure V.29 : Variation des masses des échantillons durant l'essai	67
Figure V.30 : Images de l'échantillon de Azazga(Bouzeguene)	68
Figure V.31 : Images de l'échantillon de site Azazga(Hendou)	69
Figure V.32 : Images de l'échantillon de site Azeffoun	70
Figure V.33 : Images de l'échantillon de site sud-ouest	71

Figure V.34 : Images de l'échantillon de site Sidi Naamane	72
Figure V.35 : variation des masses bondant l'essai	73
Chapitre VI. Les résultats du calcul de la dimension fractale en 2D	
Figure VI.1 : Exemple du calcul DFR par le logiciel MATLAB R2010b.....	75
Figure VI.2 : variation de la dimension en fonction des étapes de l'essai pour les échantillons Azazga (Bouzegane)	76
Figure VI.3 : variation de la dimension en fonction des étapes de l'essai pour les échantillons Azazga (Hendou)	76
Figure VI.4 : variation de la dimension en fonction des étapes de l'essai pour les échantillons azeffoun.....	77
Figure VI.5 : variation de la dimension en fonction des étapes de l'essai pour les échantillons sud-ouest	78
Figure VI.6 : variation de la dimension en fonction des étapes de l'essai pour les échantillons Sidi Naamane	78
Figure VI.7 : variation de la dimension en fonction des étapes de l'essai pour les échantillons Azazga (Bouzeguene)	79
Figure VI.8 : variation de la dimension en fonction des étapes de l'essai pour les échantillons Azazga (Hendou)	80
Figure VI.9 : variation de la dimension en fonction des étapes de l'essai pour les échantillons d'Azeffoun	80
Figure VI.10 : variation de la dimension en fonction des étapes de l'essai pour les échantillons sud-ouest	81
Figure VI.11 : variation de la dimension en fonction des étapes de l'essai pour les échantillons Sidi Naamane	82
Chapitre VII : Chapitre VI. Les résultats du calcul de la dimension fractale en 2D	
Figure VII.1 : variation de la dimension fractale de l'échantillon de Azazga (Bouzeguene) en fonction des cycles de dégradabilité.....	83
Figure VII.2 : variation de la dimension fractale de l'échantillon de Azazga (Handou) en fonction des cycles de dégradabilité.....	84
Figure VII.3 : variation de la dimension fractale de l'échantillon d'Azeffoun en fonction des cycles de dégradabilité	85
Figure VII.4 : variation de la dimension fractale de l'échantillon de Sud-Ouest en fonction des cycles de dégradabilité.....	85
Figure VII.5 : variation de la dimension fractale de l'échantillon de Sidi Naamane en fonction des cycles de dégradabilité.....	86
Figure VII.6 : variation de la dimension fractale de l'échantillon d'Azazga(Bouzeguene) en fonction des cycles de canicule	87
Figure VII.7 : variation de la dimension fractale de l'échantillon d'Azazga(Handou) en fonction des cycles de canicule	87
Figure VII.8 : variation de la dimension fractale de l'échantillon de Azeffoun en fonction des cycles de canicule.....	88

Figure VII.9 : variation de la dimension fractale de l'échantillon de Sud-Ouest en fonction des cycles de canicule	89
Figure VII.10 : variation de la dimension fractale de l'échantillon de Sidi Naamane en fonction des cycles de canicule	90

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II : Les sols fins et leurs structures

Tableau II.1 : Minéraux argileux.....	19
Tableau II.2 : Tableau récapitulatif des différentes argiles selon leur composition chimique (En pourcentage R. Bouabid, M. Badraouf).....	20
Tableau II.3 : Caractéristiques physiques générales des argiles.....	21

Chapitre III : Détermination de la dimension fractale

Tableau II.1 : t représente les étapes de construction de la courbe de Von koch D. Driss, Identification des pathologies du tissu osseux par traitement d'image.Mémoire de magister, UMMTO, (2006).....	27
--	----

Chapitre IV: Les essais réalisés sur les sols étudiés

Tableau IV.1 : La zone et la profondeur des carottes des matériaux étudiés	48
Tableau IV.2 : l'état de saturation du matériau d'après TERZAGHI.....	50
Tableau IV.3 : l'indice de consistance.....	54
Tableau IV.4: Désignation du sol en fonction de son VBS	55
Tableau IV.5 : Résultats des valeurs au bleu de méthylène	55
Tableau IV.6: Les résultats des différents essais d'identifications.....	56
Tableau IV.7: analyse chimiques du sol	57

Chapitre V: Etude des effets climatiques au laboratoire

Tableau V.1 : Procédure de mouillage des échantillons	59
Tableau V.2 : Les masses des échantillons avant et après l'essai.....	66
Tableau V.3 : Variation de la masse des échantillons pendant l'essai de canicules.....	73

Chapitre VI : Les résultats du calcul de la dimension fractale en 2D

Tableau VI.1 : Résultats du calcul de la dimension fractale Azazga (Bouzguene).....	75
Tableau VI.2 : Résultats du calcul de la dimension fractale Azazga (Hendou)	76
Tableau VI.3 : Résultats du calcul de la dimension fractale d'Azeffoun	77
Tableau VI.4 : Résultats du calcul de la dimension fractale de sud-ouest.....	77
Tableau VI.5 : Résultats du calcul de la dimension fractale de Sidi Naamane	78
Tableau VI.6 : Résultats du calcul de la dimension fractale d'Azazga (Bouzguene).....	79
Tableau VI.7 : Résultats du calcul de la dimension fractale d'Azazga (Hendou).....	79
Tableau VI.8 : Résultats du calcul de la dimension fractale d'Azeffoun	80
Tableau VI.9 : Résultats du calcul de la dimension fractale de sud-ouest.....	81
Tableau VI.10 : Résultats du calcul de la dimension fractale de Sidi Naamane	81

Chapitre VII : Les résultats du calcul de la dimension fractale en 3D

Tableau VII.1 : Résultats du calcul de la dimension fractale Azazga (Bouzeguene).....	83
Tableau VII.2 : Résultats du calcul de la dimension fractale de Azazga (Handou).....	84
Tableau VII.3 : Résultats du calcul de la dimension fractale de Azeffoun	84
Tableau VII.4 : Résultats du calcul de la dimension fractale de sud-ouest	85
Tableau VII.5 : Résultats du calcul de la dimension fractale de sidi Naamane	86
Tableau VII.6 : Résultats du calcul de la dimension fractale d'Azazga (Bouzegane)	86
Tableau VII.7 : Résultats du calcul de la dimension fractale d'Azazga (hendou)	87
Tableau VII.8 : Résultats du calcul de la dimension fractale d'Azeffoun.....	88
Tableau VII.9 : Résultats du calcul de la dimension fractale de Sud-ouest	88
Tableau VII.10 : Résultats du calcul de la dimension fractale de Sidi Naamane.....	89

SOMMAIRE

Remerciements

Dédicaces

Liste des symboles et notations

Liste des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre I : Les effets des changements climatiques sur les sols.

I. Introduction.....	1
II. Le climat.....	1
II.1 Météorologie.....	1
II.2 Principaux éléments du climat.....	2
II.3 Notion de climat.....	2
III. Classification climatique.....	2
1) Notion de climat.....	2
2) Le climat subtropicaux.....	2
3)Le climat tempéré.....	3
4) Le climat polaire.....	3
5) Le climat désertique.....	3
IV. Changement climatique.....	4
V. Les indicateurs du changement climatique.....	4
V.1 Impacts du changement climatique.....	5
❖ L'Algérie est-elle touchée par le réchauffement climatique ?.....	5
VI. Le climat et ses effets sur le matériau étudié.....	7
VI.1. Situation géographies de Tizi-Ouzou.....	7
VI.2 Le climat en Tizi-Ouzou.....	8
VII. Analyse climatique.....	9
VIII. Conclusion.....	10

Chapitre II : Les sols fins et leurs structures

Introduction	11
I. Généralités sur les sols	11
I.1.1 composition de sol	11
II. Propriétés physiques des sols	12
II.1.1 Définition	12
➤ La roche	12
➤ Les sols	12
II.2 Eléments constitutifs d'un sol	12
III. Les désordres dans les sols	12
❖ Cas des bâtiments	13
❖ Cas des chaussées	14
IV. Généralités sur les argiles	15
IV.1 Origine et définition des argiles	15
IV.1.1 Les roches mères	15
IV.1.2 La topographie	15
IV.2 La structure des argiles	16
IV.3 Minéraux argileux inter-stratifiés	16
IV.4 Famille minéralogique	17
IV.4.1 Classification selon la structure chimique	17
1) La kaolinite $[\text{Si}_2 \text{Al}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4]$	17
2) La montmorillonite $[\text{Si}_4 \text{Al} (2-x) \text{Mg}_x \text{O}_{10} (\text{OH})_2, n\text{H}_2\text{O}]$	18
3) Les illites $[\text{Si} (4-x) \text{Al}_x \text{Al}_2 \text{O}_{10} (\text{OH})_{2x} \text{K}]$	18
IV.4.2. Classification selon la structure chimique	20
1) Verte	20
2) Blanche	20
3) Rose	20
V. Les minéraux argileux et le système « argile – eau »	21
V.1 Caractéristique physique des argiles	21
V.2 Caractéristiques mécanique des argiles	21
V.3 Caractéristique hydraulique des argiles	22
V.4 Texture des argiles	22

V.5 Effet du temps sur le comportement des argiles.....	23
V.6 Conclusion.....	24

Chapitre III. Détermination de la dimension fractale

I. Introduction.....	25
II. Formulation du concept de fractal	25
III. Définition d'un objet fractal	25
IV. Classification des objets fractals	26
IV.1 Fractales déterministes	26
1) Les systèmes de fonctions itérés (IFS : Iterated Function System).....	26
➤ La courbe de Helge Von Koch	26
IV.1.2 Fractales réalisées grâce à une suite de points	28
IV.1.2.1 Ensemble de Mandelbrot	28
IV.1.2.2 Ensemble de Julia.....	29
IV.1.3 Fractals non uniformes	29
IV.2 Fractale non déterministe	30
1) Objets fractals naturels	30
a) Fractals aléatoires.....	30
V. Caractéristique d'un objet fractal	31
VI. Dimension fractale	31
VII. Intérêt de la dimension fractale	32
VIII. Méthodes utilisées pour le calcul de la dimension fractale d'un grain de sol	33
VIII.1. Méthodes Basées sur les comptages de boîtes	33
VIII.1.1. Méthode de box-counting ou BC	33
VIII.1.2 méthode du diviseur	35
VIII.1.3 Surface-Périmètre (Area-Perimeter).....	37
VIII.1.4 Méthode des lignes parallèles.....	38
VIII.1.5 Méthode des masses	39
VIII.1.6 La méthode de de Comptage Différentiel de Boîtes (CDB).....	40
VIII.2 Conclusion.....	45

Chapitre IV. Les essais d'identification des sols étudiés

I. Introduction.....	46
II. Origine des matériaux utilisés	46
III. Caractéristiques physiques et chimiques	48
III.1 Caractéristiques physiques	48
III.1.1 Teneur en eau naturelle W.....	48
III.1.2 Masse volumique des sols	49
1) Masse volumique des grains solides des sols selon la norme (NF 94 – 054).....	49
2) Masse volumique humide de sol (NF P 94 - 053).....	49
3) Masse volumique du sol sec ρ_d (NF P 94 – 064)	49
III.1.3 : indice des vides et degré de saturation	50
❖ Indice des vides (e)	50
❖ Degré de saturation S_r	50
III.1.4 : les limites d'ATTERBERG	50
III.1.4.1 La procédure de l'essai.....	51
a) La détermination de la limite de liquidité	51
b) La détermination de la limite de plasticité	52
c) L'indice de plasticité	53
d) L'indice de consistance (NF P 94 – 068)	54
IV. Valeur au bleu de méthylène.....	54
• Interprétation des résultats	55
IV.1 Analyse chimique.....	57
V. Conclusion.....	57

Chapitre V. Etude des effets climatiques au laboratoire

I. Introduction	58
II. préparation des échantillons.....	58
III. Essai de dégradabilité.....	58
III.2 Appareillage et matériel d'essai	58
III.3 Déroulement d'essai	59
IV. Les différentes images obtenus ou courbes de cet essai	60
IV.1 Les différentes images obtenus après l'essai	61

IV.2 Les résultats obtenus	66
• Interprétation des résultats	67
V. Essai de Canicules	67
V.1 Principe d'essai.....	67
V.2 déroulement de l'essai	68
V.3 Les images retenues des échantillons	68
V.4 : résultats obtenus	72
V.5 : Interprétation des résultats	73
VI. Conclusion	73

Chapitre VI. Les résultats du calcul de la dimension fractale en 2D

I. Introduction.....	74
II. Application de la méthode de Box Counting.....	74
III. Résultats et interprétations	75
❖ Résultats de l'essai de dégradabilité.....	75
❖ Résultats de l'essai de Canicules	79
• Interprétations des résultats	82
IV. Conclusion	82

Chapitre VII. Les résultats du calcul de la dimension fractale en 3D

I. Introduction.....	83
II. Résultats et interprétations.....	83
❖ Résultats de l'essai de dégradabilité.....	83
❖ Résultats de l'essai de Canicules.....	86
• Interprétations des résultats	90
III. Conclusion.....	90

Conclusion générale

Références bibliographiques

Introduction générale

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.

A cause des brusques changements de temps actuels, le rôle que jouent les processus atmosphériques sur les sols a été important dans toutes les études des grandes recherches. Le climat a un effet direct sur le comportement des sols. Qui est un facteur important dans la plupart des problèmes géotechniques tels que le gonflement, le gel, la percolation, le tassement et le glissement, etc. Beaucoup de pays souffrent de changement du volume et de la texture des sols en particulier les sols fins.

Le phénomène de gonflement de certaines formations géologiques argileuses, ayant de forts indices de plasticité, pose de sérieux problèmes dans plusieurs pays du monde. Les sols gonflants occasionnent des désordres importants aux ouvrages qu'ils supportent lors d'un apport important d'eau extérieur. Tous les types de structures fondés en surface sur ces sols (bâtiments, ouvrages de soutènement, remblais, etc.), les réseaux routiers ainsi que les ouvrages enterrés (tunnels, pieux, canalisations, fondations profondes, etc.), subissent des dommages. Les exemples des désordres liés à la présence d'argiles gonflantes sont nombreux et variés, par exemple des fissures qui apparaissent clairement sur les constructions et sur les routes (des fissures au niveau des poteaux, des murs de remplissage et des fondations).

Dans ce travail de recherche, nous explorons la possibilité de mettre en relation le climat et le sol et comprendre mieux l'influence des changements climatiques sur le sol étudié avec une étude analytique par un logiciel MATLAB.

Ce mémoire s'articule principalement en deux parties : une recherche bibliographique et une étude expérimentale et numérique. Il est subdivisé en sept chapitres :

Chapitre I : est consacré au climat ; Principaux éléments du climat ; Notion de climat ; Classification et Changement climatique ; Les effets du climat sur la région des matériaux étudiés.

Chapitres II : consacré à définir les propriétés physiques et les éléments constitutifs des sols ; Généralités sur les argiles ; Classification selon la structure chimique ; Caractéristique physique mécanique et hydraulique des argiles et leur textures et Effet du temps sur le comportement des argiles.

Chapitre III : consacré à la détermination de la dimension fractale qui consiste à définir les différentes méthodes de calcul de la dimension fractale.

Chapitre IV : c'est les essais d'identification effectués sur les sols étudiés dans ce mémoire et leurs résultats.

Chapitre V : étudie les effets climatiques au laboratoire en appliquant l'essai de dégradabilité et l'essai de canicule.

Chapitre VI : est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats obtenus après chaque essai pour notre matériau (argile) et au calcul de la dimension fractale avec application de la méthode de Box Counting en 2D.

Chapitre VII : est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats obtenus après chaque essai pour notre matériau étudié et au calcul de la dimension fractale avec application de la méthode de différentiel Box Counting en 3D.

chapitre 1

Chapitre I : Les effets des changements climatiques sur les sols

I. Introduction

Les changements climatiques sont des changements aux conditions météorologiques normales dans une région. Au cours des dernières décennies, le climat de la terre a vu sa température augmenter. Ce changement se répercute sur les climats locaux à travers le monde.

Dans notre travail on va étudier les réactions des sols argileux aux changements climatiques.

II. Le climat

Le terme (climat) décrit l'état moyen et les variations de paramètres tels que la température, les précipitations dans une région sur une période de trente ans. Par climat, on entend la description statistique de l'ensemble des conditions météorologiques pour un lieu déterminé sur une période de plusieurs décennies.

Les régions continentales du globe connaissent un climat qui dépend de leur latitude et de la distance qui les sépare des principaux plans d'eau de la terre (Figure I.1).

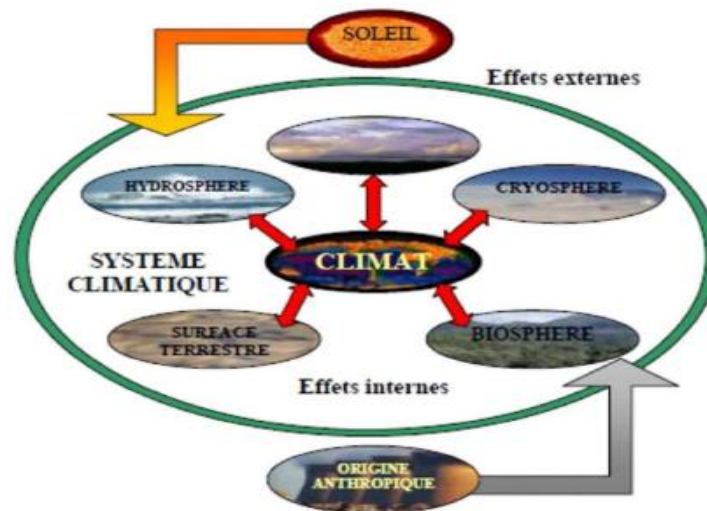


Figure I.1 : Les composantes du système climatique (Mazar. A, 2014).

II.1. Météorologie

La météo (ou le temps) est ce qui se passe maintenant, ou est susceptible de se produire demain ou dans un avenir très proche (Ramamasy et Baas, 2007). Alors que la météorologie est la science étudiant les phénomènes atmosphériques et les lois qui les régissent en vue d'une meilleure prévision du temps et d'une prédiction avisée de ses conséquences sur l'environnement et les activités humaines (Mazoyer et al., 2002).

La distinction entre la discipline de la météorologie et de la climatologie se fait progressivement durant la première moitié du XX^{ème} siècle. La météorologie étudie les processus physiques qui déterminent l'évolution et rend compte des phénomènes essentiellement observés dans sa partie la plus basse. Ces phénomènes interactifs avec les milieux connexes de l'atmosphère (océan, cryosphère, biosphère, etc.) sont analysés et traités à toutes les échelles du temps (Pinson, 2016).

II.2. Principaux éléments du climat

Le climat est le temps « moyen » pour un lieu ou une région donné. Il définit les conditions météorologiques typiques pour une zone donnée sur la base de moyennes à long terme. Le temps est la condition atmosphérique actuelle dans un endroit donné. Cela inclut des variables telles que la température, les précipitations, le vent ou l'humidité. Le climat est donc un sous-ensemble de la météorologie (Ramamasy et Baas, 2007 ; Pinson, 2016). Plus rigoureusement, le climat est déterminé grâce à la moyenne et la variabilité de certains paramètres sur une période de temps allant de plusieurs mois à plusieurs milliers ou millions d'années. Ces paramètres (variables de surface telles que la température, les précipitations et le vent) sont habituellement moyennés sur une période de 30 ans (Lescarmontier et al., 2019).

II. 3 Notion de climat

Au sens étroit du terme, le climat désigne généralement le « temps moyen » ; il s'agit plus précisément d'une description statistique en fonction de la moyenne et de la variabilité de grandeurs pertinentes sur des périodes variant de quelques mois à des milliers, voire à des millions d'années. Ces grandeurs sont le plus souvent des variables de surface telles que la température, les précipitations et le vent. Dans un sens plus large, le climat est la description statistique de l'état du système climatique (Dumas. P et al., 2005).

III. Classification climatique

Il existe 5 principaux types de climat (Figure I.2) :

III.1 Le climat tropical : c'est le type de climat présent entre les tropiques (Cancer et capricorne), allant jusqu'à 14° de latitude nord et sud, et où la température moyenne mensuelle ne descend pas en dessous de 18°C tout au long de l'année.

III.2 Le climat subtropicaux : le climat subtropical humide se caractérise par des étés chaud (moyennes de températures supérieures à 22°C) et humides, et par des hivers relativement

courts durant lesquels les moyennes de températures peuvent rester douces autour de 18°C ou plus fraîches jusqu'à 3°C.

III.3 Le climat tempéré : le terme de "climat tempéré" désigne, dans le langage courant les 30° et les 60° de latitude, voire tous les climats situés un tropique et un cercle polaire.

III.4 Le climat polaire : le climat polaire est un type de climat caractérisé par des températures froides toute l'année, sans chaleur estivale et avec des hivers glaciaux. Les températures moyenne du mois le plus chaud ne sont jamais supérieures à 10°C, ce qui correspond à la limite des arbres.

III.5 Le climat désertique : que l'on trouve dans certaines régions de l'Afrique, du Nord de l'Océanie, du Sud de l'Eurasie et du Sud-ouest des États-Unis. Le temps y est très sec et chaud. Il y a, par contre, de très grandes différences de températures entre le jour et la nuit les températures moyennes de ces régions sont variées de 28° C à 11°C.

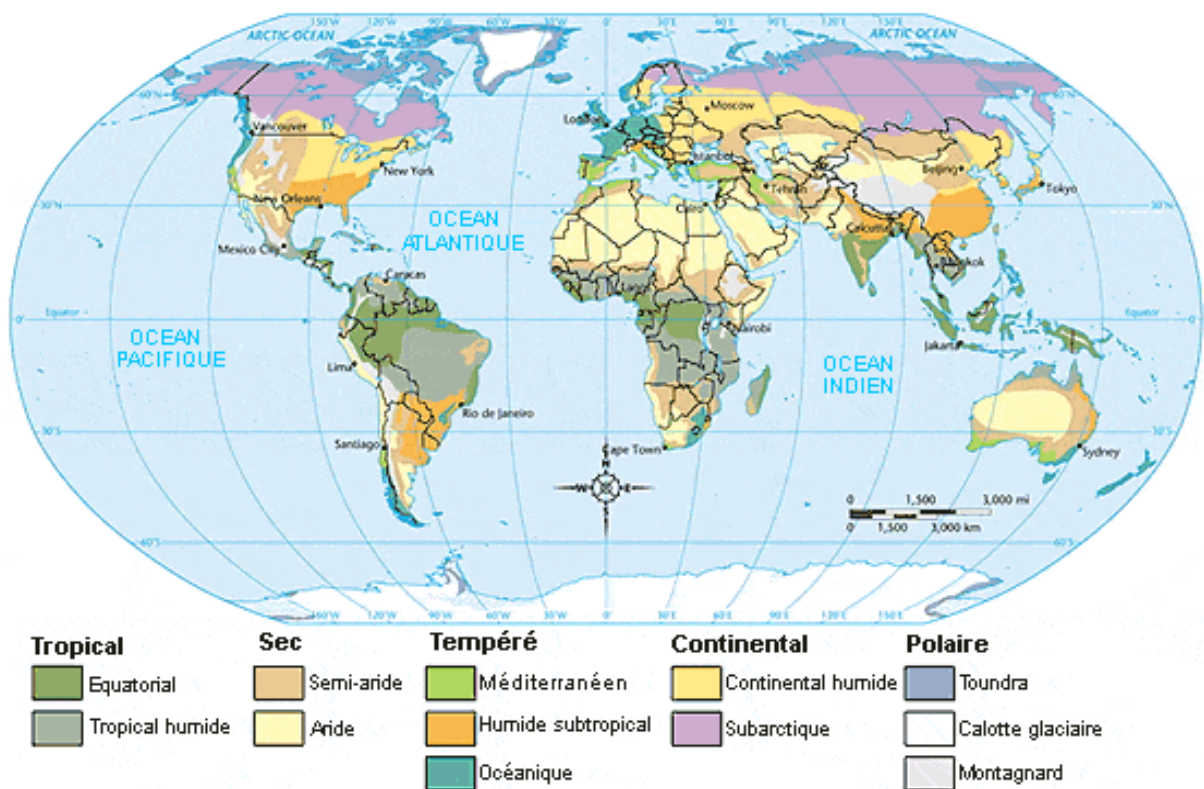


Figure I.2 : Les types de climats (la. climatologie.free.fr).

IV. Changement climatique

Selon le GIEC (2007), le changement climatique, correspond à une modification durable de la décennie au million d'années, des paramètres statistiques (paramètres moyens, variabilité) du climat global de la Terre ou de ses divers climats régionaux. Ces changements peuvent être dus à des processus intrinsèques à la Terre, à des influences extérieures, ou plus récemment, aux activités humaines. Dans les travaux du GIEC, le terme « changement climatique » fait référence à tout changement dans le temps, qu'il soit dû à la variabilité naturelle ou aux activités humaines. Au contraire, dans la Convention cadre des Nations Unies sur le changement climatique, le terme désigne uniquement les changements dus aux activités humaines. Le GIEC a confirmé dans son 4ème rapport que l'augmentation de concentration des GES dans l'atmosphère résultait de l'activité humaine, notamment de la consommation et la production d'énergie, et qu'en conséquence, les températures devraient sensiblement augmenter au cours des prochaines années.

La Méditerranée, en particulier, devraient être plus touchée par le changement climatique que la plupart des autres régions du monde au cours du 21ème siècle. Les spécialistes du climat anticipent, une augmentation de la température de l'air de 2,2 °C à 5,1 °C pour les pays de l'Europe du Sud et de la région méditerranéenne sur la période 2080-2099 par rapport à la période 1980-1999. La future période sera caractérisée, probablement, par (Giannakopoulos et al, 2005 ; Giec, 2007)

Le changement climatique global, avère des difficultés dans les modèles climatiques et les méthodes de descente d'échelles à simuler des distributions de pluies courantes et extrêmes, en développant et en testant de nouvelles approches méthodologiques (Brigode, 2013).

V. Les indicateurs du changement climatique

- 1- L'augmentation de la température de surface sur la Terre ;
- 2- La température des océans ;
- 3- La réduction de la surface des glaces océaniques arctiques ;
- 4- Le recul des glaciers continentaux ;
- 5- Les calottes polaires de l'Antarctique et du Groenland ;
- 6- Le niveau moyen des océans ;
- 7- Les indicateurs biologiques.

V.1 Impacts du changement climatique

L'énergie se trouve au cœur de la problématique du changement climatique d'une part, c'est le principal secteur émetteur de GES, et les émissions de CO₂ dans le futur pourraient augmenter bien plus vite que la moyenne mondiale. La croissance incontrôlée des émissions de GES est en train de réchauffer la planète, et pour conséquences, la fonte des glaciers, l'augmentation des précipitations, la multiplication de phénomènes météorologiques extrêmes, et le décalage des saisons. L'accélération du changement climatique, ajouté à la croissance de la population mondial, menace partout la sécurité alimentaire (Gerald et al., 2009).

Les risques d'extinction d'espèces et de la biodiversité sont prévus avec une confiance plus élevée au fur et à mesure que le réchauffement se met en place. Avec une augmentation supplémentaire de la température par rapport au niveau des 20 dernières années, on peut dire avec une fiabilité moyenne que 20 à 30 % des espèces animales et végétales identifiées jusque-là sont confrontées à un risque accru d'extinction. Le niveau des impacts négatifs s'accroît avec l'augmentation de la température (Yahiaoui, 2015).

❖ L'Algérie est-elle touchée par le réchauffement climatique ?

Comme bien des pays d'Afrique, les conséquences d'un temps extrême ou qui n'est pas de saison n'ont pas épargnées l'algérien. Connue pour son climat aride et semi-aride, la région est extrêmement sujette aux changements climatique. Ces 50 dernières années, un accroissement d'évènement dus au temps extrême été observé.

Parmi les phénomènes enregistrés dans des études climatologiques de la météorologie nationale qui témoignent de ce changement, on compte un accroissement de la fréquence des pluies torrentielles, surtout sur les hauts plateaux (par ex. Ghardaïa et Béchar en 2009-2010), qui ont entraîné des inondations pour la première fois. En 2020, les chutes de pluie quotidiennes dépasseront peut-être la moyenne annuelle normale au sud du pays.

Autres phénomènes extrêmes qui se sont produits : cyclogenèse, sécheresse vague de chaleur et tempêtes de sable. Les scientifiques ont estimé que les chutes de pluie vont diminuer d'environ 20 pour cent dans les années avenir.

Les experts de l'institut hydrométéorologique de formation et de recherche prévoient un raccourcissement de la saison des pluies et une hausse des températures d'environ 1° à 1.5° en 2020, ce qui aurait des conséquences fatales pour 30 pour cent des espèces animales, ils

estiment également que les températures vont augmenter de 3°C supplémentaires en 2050 à cause du réchauffement mondial.

Les chutes de neige ont baissé de 40 pour cent dans plusieurs régions d'Algérie, comme à Tlemcen, Ouarsenis et Djurdjura. Une autre conséquence est la grande raréfaction des ressources en eau.

Les chutes de températures la journée et la nuit et les vagues de chaleur. La flore et la faune terrestre et marine ont été grandement touchées par cette hausse : le changement des conditions environnementales est favorable et/ou défavorable à certains facteurs écologiques par rapport à d'autres, ce qui entraîne un changement des environnements et les espèces de la flore et de la faune qui les constituent. Le changement s'exprime par la raréfaction et /ou la disparition des espèces au détriment d'autres, la désertification et la pollution, ce qui entraîne la dégradation de l'environnement.

D'autres aspects des conséquences du réchauffement mondial sur les régions côtières de l'Algérie comprennent le haut niveau de la mer et les vagues dangereuses (des tempêtes plus fréquentes en 1980, 1989, 1995 et 2001), provoquant l'érosion et la disparition des plages : par ex. les plages à l'ouest d'Alger, la plage de Bejaia, de Boumerdes et d'Oran. De tels phénomènes provoquent la perte de plages (par ex. West Beach à Sidi Fredj, à l'Ouest d'Alger), et par conséquent une perte de l'écotourisme et de l'intérêt économique, de l'intrusion saline (salinisation des sols et de la nappe phréatique) et de l'inondation des régions côtières à basse altitude.

L'Algérie a été l'un des premiers pays d'Afrique à ratifier toutes les sections des accords internationaux sur la protection de l'environnement (y compris le protocole de Kyoto et la convention de Barcelone). Toutefois, leur mise en application et leur surveillance sont inadéquates. Par exemple, le ministère de l'aménagement et du tourisme organise des conférences et des séminaires presque tous les ans pour parler des problèmes écologiques. Des accords, des lois en application est très limitée en ce qui concerne l'espace (souvent seulement dans la capitale) et le temps.

L'Algérie est grandement impliquée dans les problèmes « du réchauffement mondial et écologiques » sur les fronts politique et économique. Toutefois, les actions prises pour remédier à la situation sont presque non-existantes.

D'après les experts météorologiques et de l'environnement d'Algérie, il sera nécessaire à l'avenir de penser à développer des sources d'énergie renouvelable, de transport public et

de techniques d'isolation dans le secteur de la construction, ainsi que de mettre en place des systèmes de surveillance et d'alerte pour les sécheresses et les vagues de chaleur dans les villes vulnérables. D'après moi, pour y arriver, il est nécessaire de commencer à intensifier les efforts de travail de proximité et de prise de conscience sur la protection de l'environnement, la lutte contre toutes formes de pollution, et la mise en place d'une culture de protection de la nature et de ses ressources parmi les citoyens et les décideurs.

VI. Le climat et ses effets sur la région des matériaux étudiés

A cause des brusques changements de temps actuels, le rôle que jouent les processus atmosphériques sur les sols a été important dans toutes les études de la grande recherche. Pourtant les sols et la végétation constituent une partie importante de la «machine climatique» terrestre. C'est pourquoi on va tenter de mieux comprendre la relation complexe qui lie «le sol» et «le climat».

Et dans notre cas nous allons étudier des matériaux prélevés de Tizi-Ouzou, qui est une zone très importante par rapport à son emplacement géologique.

VI.1. Situation géographiques de Tizi-Ouzou

La wilaya de Tizi-Ouzou présente un relief montagneux fortement accidenté qui s'étale sur une superficie de 2 994 km². Elle comprend une chaîne côtière composée des Daïras de Tizirt, Azeffoune, un massif central situé entre l'oued Sebaou et la dépression de Draa El Mizane Ouadhias (Figure. I.3).

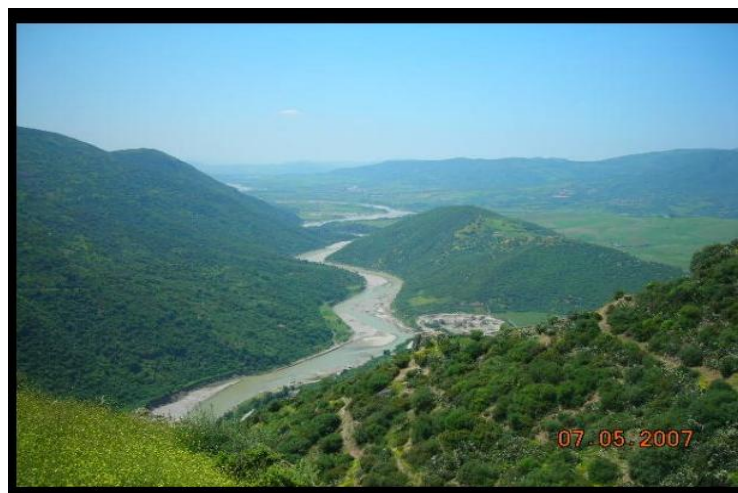


Figure I.3 : Le Sebaou depuis le village d'Akaoudj.

La Wilaya de Tizi Ouzou est limitée par (Figure. I.4) :

- à l'ouest par la wilaya de Boumerdès ;

- au sud par la wilaya de Bouira ;
- à l'est par la wilaya de Béjaïa ;
- au nord par la mer Méditerranée.



Figure I.4 : Wilaya de Tizi-Ouzou (Annuaire Statistique 2018).

VI.2 Le climat de Tizi-Ouzou

Tizi-Ouzou se situe dans la zone du climat méditerranéen. En raison des massifs montagneux qui entourent la ville, il neige chaque année en hiver entre décembre pour les hautes altitudes (600 m et plus), et en février pour les basses altitudes. En été, la chaleur peut être suffocante car l'air marin se heurte au relief montagneux qui l'empêche d'atteindre la ville. À partir de novembre les températures sont de 5°C au minimum. L'hiver à Tizi-Ouzou dans les années précédentes sont marqués par des records de température, en 2012, par exemple, les températures ont dépassé les 17 °C. La température la plus élevée jamais enregistrée à Tizi-Ouzou date de juillet 1901 avec 50 °C, et la température la plus basse date de février 1982 avec -11 °C.

Tizi-Ouzou, bénéficie d'un climat tempéré chaud. A Tizi-Ouzou, les précipitations sont plus importantes en hiver qu'en été. Selon la classification de Köppen-Geiger, le climat est de type Csa. (Climat tempéré chaud avec été sec « méditerranéen ») Tizi-Ouzou affiche une température annuelle moyenne de 17.9 °C. La moyenne des précipitations annuelles atteints 896 mm.

VII. Analyse climatique

L'analyse de l'évolution du climat impose de disposer d'observations globales de toutes les composantes du système climatique (atmosphère, océans, terres émergées et glaces), sur de longues périodes.

A l'échelle globale, on a déjà noté :

- Une hausse des températures moyennes de l'atmosphère et de l'océan.
- Une élévation du niveau moyen de la mer.
- Une fonte massive de neige et de glace.

Plus particulièrement, les années entre (1995 et 2006) sont les années les plus chaudes jamais enregistrées depuis que les températures de la surface du globe sont mesurées (1850).

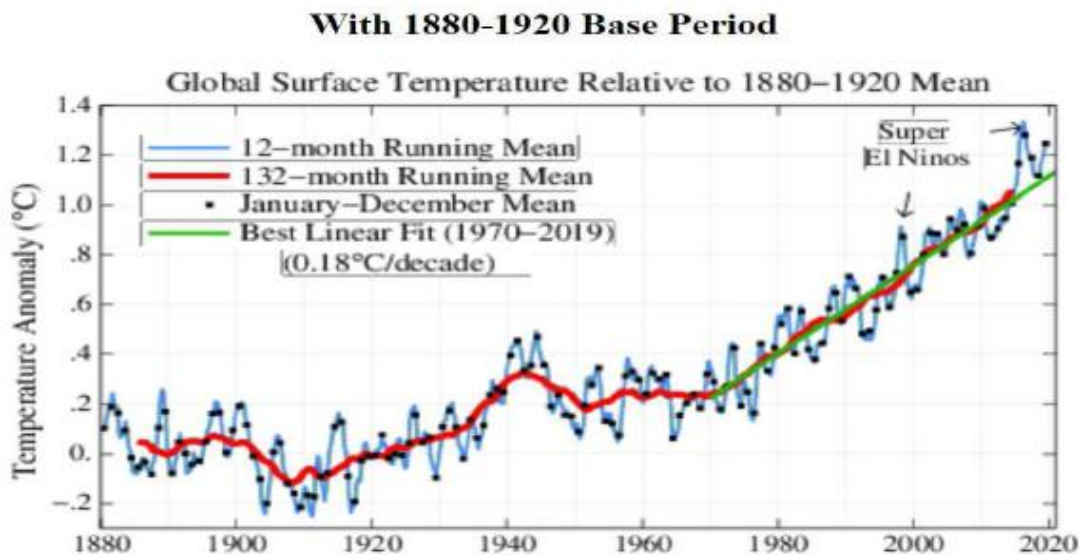


Figure I.5 : Global surface température relative de 1880 à 2020 (Climat _ en 1988, 2020 était bien prédit – {Sciences²}. mhtml. Le Monde.fr).

Indicateur de la température planétaire moyenne (mesurée à un mètre au-dessus des sols et à la surface des océans et mers) présenté en écart à une référence climatologique calculée sur la période 1880 à 2020 (Figure I.5). Les valeurs sont présentées mois par mois en moyenne glissante sur 12 mois (bleu) et 132 mois (rouge), ce qui permet de lisser les fluctuations interannuelles. Les points noirs sont les moyennes annuelles. La ligne verte présente la meilleure approximation linéaire pour la période 1970 à 2019 (Climat _ en 1988, 2020 était bien prédit– {Sciences²}. mhtml. Le Monde.fr).

Le réchauffement climatique, provoqué par nos émissions de gaz à effet de serre, ne fait donc aucun doute. Et sa rapidité est exceptionnelle dans l'histoire climatique. Mais avait-il été bien prédit par les climatologues ? Et plus exactement par les simulations numériques du climat. Une réponse édifiante peut être donnée, en comparant une publication de 1988 et la réalité observée depuis (Climat _ en 1988, 2020 était bien prédit – {Sciences²}. mhtml. Le Monde.fr).

VIII. Conclusion

Après avoir exposé les difficultés de changement climatique, l'homme est le premier responsable de cet effet, la science du climat devient de plus en plus nécessaire. L'homme doit donc agir vite pour éviter une situation irréversible et ainsi éviter des catastrophes si l'on ne fait rien contre le réchauffement climatique.

Chapitre II

Chapitre II : Les sols fins et leur structure

Introduction :

En général, les sols sont utilisés dans tous les travaux de Génie Civil. En fonction de leur nature, ils sont employés soit dans la construction d'ouvrages en terre (couches de chaussées, barrages, digues, barrières étanches...), ou encore comme support de fondations de différents ouvrages (bâtiments, ponts...).

Dans ce chapitre des généralités sur les sols fins sont présentées ; comme la définition des sols, leurs origines, leurs caractéristiques, leur classification et leur comportement, leur structure ainsi que l'eau dans le sol et son influence sur les sols fins en générale et plus particulièrement sur l'argile ; qui est le sol étudié dans cette recherche.

I. Généralités sur les sols

Le sol est un milieu naturel à propriétés essentiellement dynamiques, différencié en horizons à une roche mère sous-jacente, sous l'influence de divers processus chimiques, physicochimiques et biologiques. Ces horizons diffèrent de la roche mère par certains caractères morphologiques, physiques, chimiques et biologiques.

Le sol est le support des végétaux, le milieu dans lequel, grâce à leurs racines, les plantes se procurent l'eau et les éléments nutritifs dont elles ont besoin.

La définition du sol a évolué avec le temps. Selon Merrill, cité par Lunze (2000) Le sol est le matériel rocheux désagrégé plus ou moins décomposé, mélangé à de la matière organique.

I.1 Composition du sol

Le sol est un système à phases ou à composantes multiples, il est un mélange à proportions égales de constituants minéraux, organiques, de l'eau et de l'air. Le sol est constitué de presque de 45% de matière minérale, 5% de matière organique, 25% de l'air. La phase solide est constituée de minéraux et de matières organiques.

Les constituants inorganiques ont des dimensions variables allant des colloïdes aux graviers de dimensions supérieures à 2 mm (on peut avoir aussi des cailloux et des pierres). Ces constituants sont des fragments rocheux, des minéraux primaires et des minéraux secondaires.

Les constituants organiques comprennent les résidus végétaux à décomposition et des animaux à des stades variés de composition mais aussi d'humus (Boulaine, 2003).

II. Propriétés physiques des sols

II.1 Définition

Le **sol** a été défini comme un corps naturel comprenant des couches (horizons) qui sont composées de matériaux altérés minéraux, de matières organiques, d'air et d'eau.

Dans les études géotechniques les matériaux existant à la surface de l'écorce terrestre sont classés en deux catégories :

- **La roche** : est une substance solide composée de minéraux, en générale la roche est un agglomérat de grains minéraux liés par des forces de cohésion fortes et permanentes, même après immersion prolongée dans l'eau ; c'est la mécanique des roches.
- **Les sols** : agrégats de grains minéraux pouvant être séparés sous l'effet d'actions mécaniques relativement faibles ; c'est la mécanique des sols (Léreau, 2006).

Les sols sont des matériaux meubles, poreux, hétérogènes et souvent anisotropes. Les matériaux, minéraux ou organiques, sont généralement à l'état de grains ou de particules dont les formes et les dimensions sont essentiellement variables (Brette, 2002).

II .2 Éléments constitutifs d'un sol

Le **sol** est constitué de différents matériaux : cailloux, graviers, sables, limons, argile, humus, calcaire.... Selon les proportions de ces **éléments**, la terre n'aura pas les mêmes qualités.

Donc le sol est un mélange d'éléments solides constituant le squelette solide, d'eau pouvant circuler ou non entre les particules et d'air ou de gaz.

- **Donc on ne distingue que le sol, constitué de trois phases :**
 - Une phase solide dont les grains solides, dans leur arrangement naturel constituent le squelette ;
 - Une phase liquide (eau) ;
 - Une phase gazeuse (en général de l'air).

IV. Les désordres dans les sols

Le problème principal dans les sols fins, comme les argiles et les marnes, est le phénomène de retrait-gonflement, qui cause des fissures apparaissant clairement sur les constructions et sur les routes. Ces fissures occasionnent des ouvertures dans les fenêtres et les portes et elles se propagent dans la maçonnerie et la structure de l'ouvrage.

Les ouvrages sont sujets au gonflement principalement dans la structure et la maçonnerie du bâtiment. Parmi ces derniers, Les maisons individuelles, construites sans mesures de précaution de construction sur ce type de sol, sont sujettes à des dégradations et des fissures au niveau des poteaux, des murs d remplissage et des fondations (radier, semelle superficielle ou filante et les pieux), voir la figure III.1 (Freeah, 2006).

Ces désordres résultent du caractère différentiel que prennent les mouvements du sol de fondation (terrassement ou gonflement) sollicitant la structure en flexion ou en cisaillement, voir la figure III.2 (Derriche et al., 2002).

Ces différences relatives de mouvement proviennent par ailleurs de l'hétérogénéité des sols de fondation, de celle des forces appliquées par la structure sur le sol, ainsi que des perturbations hydriques que le bâtiment peut engendrer (Mouroux et al 1987 ; Freeah, 2006 et Mouroux et al., 1988). Les dégâts causés aux structures des bâtiments reposant sur des sols fins gonflants aux U.S.A (1976) ont été chiffrés à environ 2.25 milliards de dollars.

❖ Cas des bâtiments



Figure II.1 : Fissure sur les murs et fissure diagonales (Derriche et al., 2002)



Figure II-2 : Cisaillement au niveau des nœuds (Derriche et al., 2002)

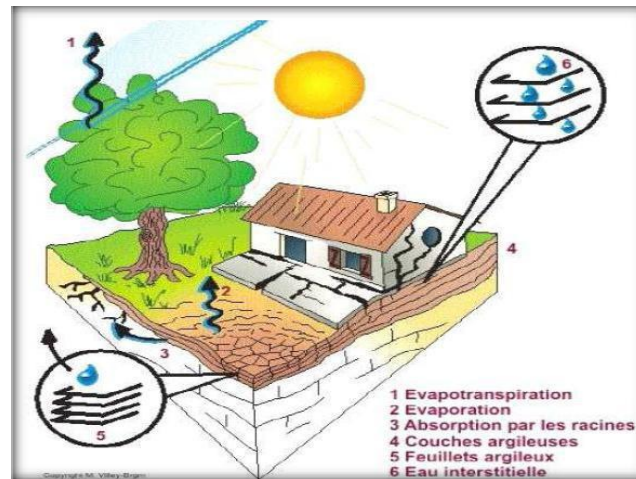


Figure II.3: Cisaillement au niveau des nœuds (Derriche. Z et al., 2002)

❖ Cas des chaussées

Le gonflement peut provoquer des désordres importants à la structure de la chaussée. Ce phénomène est causé par des variations de teneur en eau du sous-sol. D’après Jennings (Jennings, 1962), il peut être attribué au climat et à la surcharge. D’autres auteurs signalent que sur les routes d’importance moyenne, il y a apparition de divers types de fissures (Freeah, 2006).



Figure II.4 : Dégradation des routes (Freeah, 2006).

IV. Généralités sur les argiles

IV.1 Origine et définition des argiles

Un sol contenant plus de 5% de particules argileuses possède déjà des propriétés d'un sol argileux. Lorsque la proportion des particules argileuses dépasse 30%, le sol est considéré comme une argile (Xiang-Ling LI, 1999).

Les argiles sont des matériaux sédimentaires de la couche superficielle de l'écorce terrestre, obtenus par dégradation et altération par l'hydrolyse des minéraux des roches éruptives et magmatiques sous l'action physique et chimique des eaux de surface. Ces résidus détritiques sont déplacés par voie glaciaire, fluviale ou éolienne et se déposent dans les bassins de sédimentation. Le terme argile possède différents sens qui ne se recouvrent que globalement. Il peut désigner des minéraux de structures et propriétés particulières, des roches argileuses composées par l'essentiel de ces minéraux ou bien la partie la plus fine d'une analyse granulométrique d'un sol meuble inférieur à 2 μm , cependant cette dernière sont des minéraux argileux résultant de la destruction des roches (les roches sédimentaires contiennent 50 %, les schistes 50 à 80 % et les roches éruptives donnent, par décomposition, des argiles). On dit qu'un sol est argileux s'il contient plus de 50% de minéraux argileux.

Les minéraux d'argiles sont fondamentalement constitués de silicium, aluminium, oxygène et ions hydroxyles. Ce sont des phyllosilicates d'alumine hydratés, le préfixe « phyllo » désigne des minéraux qui prennent des formes de feuillets, cette structure leurs confère des propriétés absorbantes et plastiques.

IV.1.1 La roche mère

- L'altération d'une roche acide, comme le granite, donne plutôt de la kaolinite ;
- L'altération d'une roche basique, comme le basalte, donne plutôt des smectites.

IV.1.2 La topographie

Elle commande le drainage et elle intervient également :

- Sur une pente, où le drainage et le lessivage sont bons, la formation de kaolinite est favorisée.
- Dans une cuvette, milieu confiné où se concentrent les solutions, se forment plutôt des smectites.

IV.2 Structure des argiles :

Les argiles se distinguent les unes des autres de par leur composition ainsi que leur structure. D'un point de vue géologique, une argile est un minéral dont la granulométrie est inférieure à 4 micromètres. Les minéraux argileux sont formés d'un empilement de feuillets, qui sont constitués par l'association de deux unités structurales de base (Figure II.5), ces feuillets sont formés par la juxtaposition des couches structurales tétraédriques (silice) (Figure II.5.a) et octaédriques (alumine) (Figure II.5.b). Les couches structurales sont à leur tour formées d'unités structurales de base par empilement d'ions ou d'hydroxyles en disposition hexagonale ou compacte.

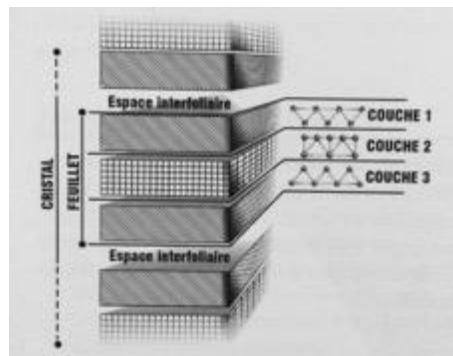


Figure II.5: Structure d'une argile (Andriane P, 2003).

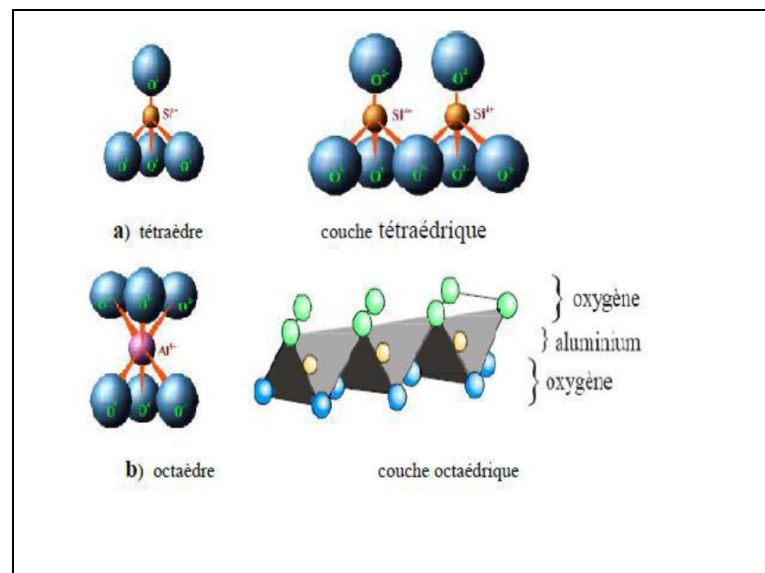


Figure II.6 : Couches tétraédriques, octaédriques (Madjnoun. A, 2014).

VII .3 Minéraux argileux inter-stratifiés

C'est le nom donné aux argiles dont la structure par alternance de feuillets de natures différentes correspond à une étape de transformation d'un minéral argileux à un autre.

C'est le cas des illite-smectite, glauconite-smectite, chorite-vermiculite,...

La ghassoulite Minérale interstratifié est appelée également ghassoul, ou rassoul, ces termes sont dérivés du verbe « rassala », laver en arabe. Cette argile est considérée comme cousine de la montmorillonite. sa richesse en minéraux dont du silicium, calcium, potassium Fer, sodium, magnésium..., en font un produit de qualité. Extraite au Maroc, elle est retrouvée dans les hammams pour ses nombreuses qualités. Elle est proposée en morceaux, pâte ou fine poudre. (Qabaqous. O et coll, 2014.)

VII.4 Famille minéralogique

IV.4.1. Classification selon la structure chimique

Les propriétés physiques des couches adsorbées dépendent aussi de la nature du minéral qui constitue le grain. L'étude des couches adsorbées et des minéraux argileux est importante pour bien comprendre le comportement des argiles que la granulométrie seule ne saurait expliquer. C'est ainsi que nous classons les minéraux argileux en différents groupes : famille, espèce et variété. Les trois familles les plus connues sont la kaolinite, la montmorillonite et l'illite, (Berga. j, 2003-2004).

1) La kaolinite $[\text{Si}_2 \text{Al}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4]$

Cette roche argileuse tire son nom du site chinois kao-Ling, où elle fut découverte.

Son nom est dérivé du terme chinois "gao ling" traduit par "hautes collines". On appelle la roche kaolin et le minéral argileux kaolinite. Cette argile blanche, douce, friable, réfractaire, contient autant d'aluminium que de silice. (Merabet. D et Belkacemi. H, 2003)

Riche en silice et peu concentrée en sels minéraux, elle est utilisée pour la fabrication de porcelaine et de céramique. C'est une des rares argiles inerte chimiquement. [O. Liétard]

Cette caractéristique en fait un composant idéal pour le papier, en tant que liant dans les peintures, dans les plastiques, ainsi que dans les médicaments.

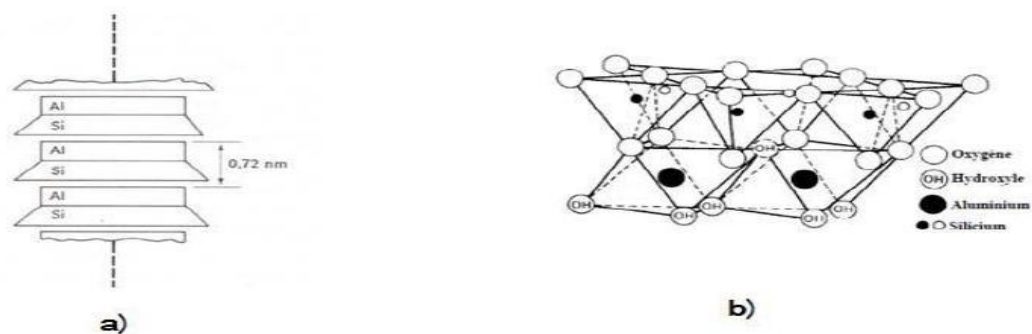


Figure II.7: a) Schéma de la structure de la kaolinite (Lambe.A, 1953) ; b) Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite (Madjnoun. A, 2014).

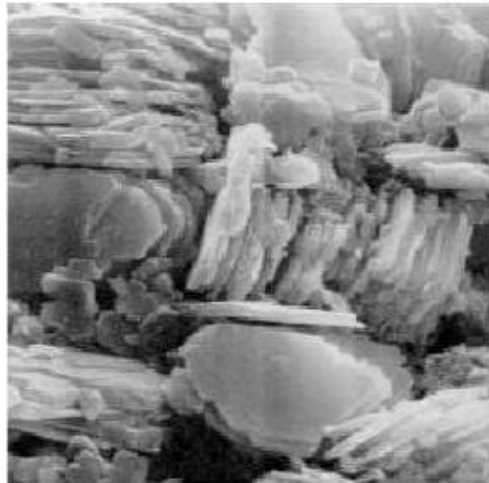


Figure II.8: Photographie d'une kaolinite prise au microscope électronique à balayage
(Djonkamla.Y, 2010)

2) La montmorillonite [$\text{Si}_4 \text{Al} (2-x) \text{Mg}_x \text{O}_{10} (\text{OH})_2, n\text{H}_2\text{O}$]

Argile la plus communément récoltée, elle est généralement vendue verte mais peut-être trouvée sous d'autres coloris : gris, blanc, bleuté. Son nom provient de sa ville d'origine, Montmorillon située dans la Vienne. Elle détient une forte concentration en silice, en minéraux, dont de la potasse, des oxydes de magnésium, de fer, de manganèse, d'aluminium, de la soude... (Segad. M et coll, 2010) D'une rare pureté, l'argile

Montmorillonite présente des qualités et des attraits supérieurs à n'importe quelle autre argile verte. Ceci explique que c'est l'argile la plus commune à la vente.

3) Les illites [$\text{Si} (4-x) \text{Al}_x \text{Al}_2 \text{O}_{10} (\text{OH})_2 x\text{K}$]

Son nom fait référence à l'Illinois, aux états- unis où elle a été étudiée. Sa composition est riche en calcium (14%), en fer (9%) et pauvre en magnésium. Elle présente un bon pouvoir d'absorption environ 25% de son poids et un faible pouvoir d'adsorption (Hower J et Mowatt T.C, 1900), cette argile est retrouvée dans le nord de la France où elle est connue pour ces propriétés. Malgré sa composition, elle est tout de même de qualité inférieure à la montmorillonite. Elle se révèle néanmoins avoir un pouvoir d'absorption important. On l'utilise en tant que cataplasme épais à appliquer sur les contusions diverses (entorse...), ou encore pour absorber des impuretés (déchets organiques, micro-organismes...).

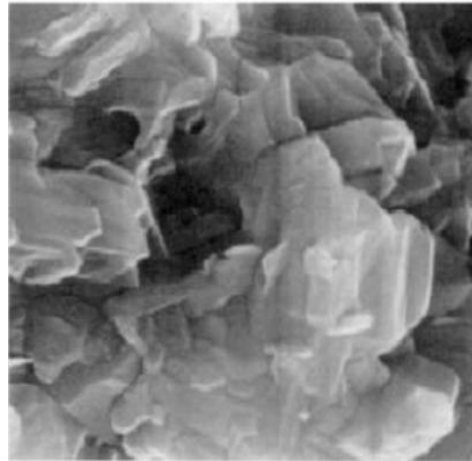


Figure II.9 : Schéma de la structure de l'illite (Lambe.A ,1953).

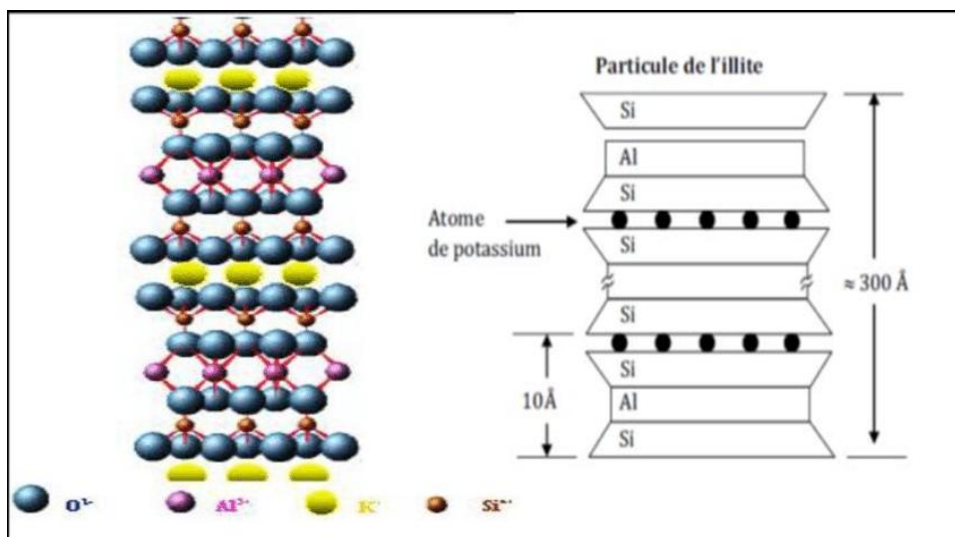


Figure II.10 : Photographie d'une illite prise au microscope à balayage (Grim, 1959).

Tableau II.1: Minéraux argileux

Nom	Type	Nombre de feuillets par particule	Diamètre d'une particule (µm)	Epaisseur d'une particule (µm)	Surface spécifique en m ² /g
Kaolinite	1:1	100 - 200	0,1 - 4	1 - 10	10 - 20
Illite	2:1	1 - 10	0,1 - 1	0,003 – 0,01	65 - 100
Montmorillonite (smectite)	2:1	1	0,1	0,001	700 - 840

Tableau II.2 : Tableau récapitulatif des différentes argiles selon leur composition chimique (en pourcentage) (El hachmi. A, 2013).

Minéraux	Max ou min	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O
kaolin	max	53,72	46,28	0,00	0,00	0,00
	min	53,72	46,28	0,00	0,00	0,00
montmorillonite	max	61,47	23 ,00	4,32	4 ,65	0,84
	min	48,24	16,54	0,30	0,03	0,12
illites	max	54,09	38,84	8,16	5,90	7,98
	min	43,95	21,12	0,72	3,60	5,48

IV.4.1. Classification selon la structure chimique

Les argiles ne sont pas identifiées par leur couleur. Une couleur peut être attribuée à plusieurs types d'argiles, la couleur verte par exemple est retrouvée chez la montmorillonite, l'illite ou encore la chlorite, ... La variation de couleur constatée est fonction de la concentration en oxyde de fer (Villieras. P, 2008).

1) Verte : Les argiles vertes présentent une faible teneur en fer, ce sont généralement les montmorillonites, les illites et les smectites.

2) Blanche : Ces argiles ne contiennent aucune substance colorée. Leur formation n'a donc pas été perturbée, elle a été uniforme. On retrouve le plus souvent des kaolinites mais également des smectites. (Merabet. D et Belkacemi. H, 2003)

3) Rose : Ces roches argileuses ne sont pas retrouvées au naturel, telles quelles. Il s'agit d'un mélange d'argile rouge et d'argile blanche. Ce mélange a pour but d'augmenter la concentration en oligo-éléments de l'argile blanche tout en diminuant la concentration en fer de l'argile rouge. (Cousin. N, 2013).

V. Les minéraux argileux et le système « argile – eau » :

Il est important de prendre en compte la nature physico-chimique des argiles, du fait que leur comportement rhéologique est gouverné par les interactions entre les feuillets argileux. Cette nature physico-chimique ne peut se définir sans une caractérisation minéralogique des différents niveaux d'organisation qui constituent les argiles. Cette partie décrit également les interactions qui se produisent entre la phase solide et la phase liquide, liées à la nature minéralogique des argiles, à la nature chimique du fluide interstitiel et à la taille des espaces poreux.

V.1 Caractéristique physique des argiles :

L'argile en particulier a fait l'objet de nombreux travaux de recherche sur sa nature minéralogique (Kamel.L, 1981 ; Rico.P, 1984 ; Tardy.I et Touret.M, 1987 ; Touret.R, 1988).

La différenciation entre les différents types d'argile se fait essentiellement par un certain nombre d'essais en laboratoire ou in-situ, qui permettent de déterminer les paramètres d'état et de nature du matériau, ainsi que son comportement mécanique et hydraulique.

Tableau II.3 : Caractéristiques physiques générales des argiles.

Caractéristique physique	Notation	Valeur moyenne	unité
Poids volumique humide	γ ou γ_h	16 à 22	KN/m ³
Poids volumique sec	Γ_d	10 à 20	KN/m ³
Poids volumique saturé	Γ_{sat}	19 à 22	KN/m ³
Porosité	N	0,20 à 0,80	/
Indice de vides	E	0,30 à 1	/
Teneur en eau	W	10 à 20	%

V.2 Caractéristiques mécanique des argiles :

Le comportement mécanique des matériaux est caractérisé par des paramètres qui permettent d'estimer les tassements .la compressibilité ou la consolidation, et la résistance au cisaillement des sols (L.T, 2009). Ces paramètres sont obtenus à partir des essais géotechniques en laboratoire, notamment :

- Essai de compactage Proctor ;
- Essai de cisaillement direct à la boîte ;
- Essai oedométrique.

V.3. Caractéristique hydraulique des argiles :

Les sols fins en générale et les argiles en particuliers sont connus par leur faible perméabilité. Cette caractéristique est d'une importance capitale dans le cas de certains ouvrages en terres tels que les barrages, les barrières étanches, etc.

L'argile est un milieu poreux dit « imperméable ». Son coefficient de perméabilité k varie de 10⁻¹⁰ à 10⁻¹³ m/s. et peut-être plus faible parfois. Soit Q le débit d'eau s'écoulant à travers une éprouvette d'argile de section S . en divisant ce débit par S . sera obtenue la vitesse fictive

de l'eau à la sortie du massif, comme si toute la section de l'échantillon était soumise à l'écoulement. Cette vitesse V , est appelée vitesse de filtration. (Boucly-Norotte.V, 1991).

V.4 Texture des argiles :

Tout comme la structure cristalline des argiles, la texture est un paramètre important car il conditionne les propriétés physiques du minéral (Caillere.S & Henin.S, (1959)). La texture concerne l'assemblage des minéraux (argileux ou pas) sous forme d'agrégats ainsi que l'arrangement ou la distribution spatiale de ces agrégats AUDIGUIER.M, 1979). Aubouin.J et al. (1968) définissent la texture comme « la forme, la dimension et la disposition d'un certain nombre de minéraux naturellement groupés en une population au sein de la roche ». Cette organisation peut faire l'objet de différentes classifications (Van Olphen.H, 1963 ; Collins.K & MC Gown.A, 1974 ; Sergejev.n.m et Al. 1978), et elles sont valables pour les sols argileux.

Gens.A ET Alonso.E. E (1992) ont établi une classification pour les sols gonflants, à partir des travaux de Collins.K Et Mcgown.A (Collins.K et Mcgown.A ,1974). Cette classification se base sur l'organisation des particules élémentaires argileuses :

Texture « matricielle » (Figure. II.11 a) : une texture dont la base est une pâte homogène avec les particules élémentaires disséminées dans cette pâte. Cette texture est la caractéristique des sols naturels ou des sols compactés du côté humide de l'optimum Proctor.

Texture « agrégée » ou « compactée » (Figure. II.11 b) : une texture compactée avec les particules élémentaires assemblées sous forme de mottes ou d'agrégats (Wakim. J, 2005).

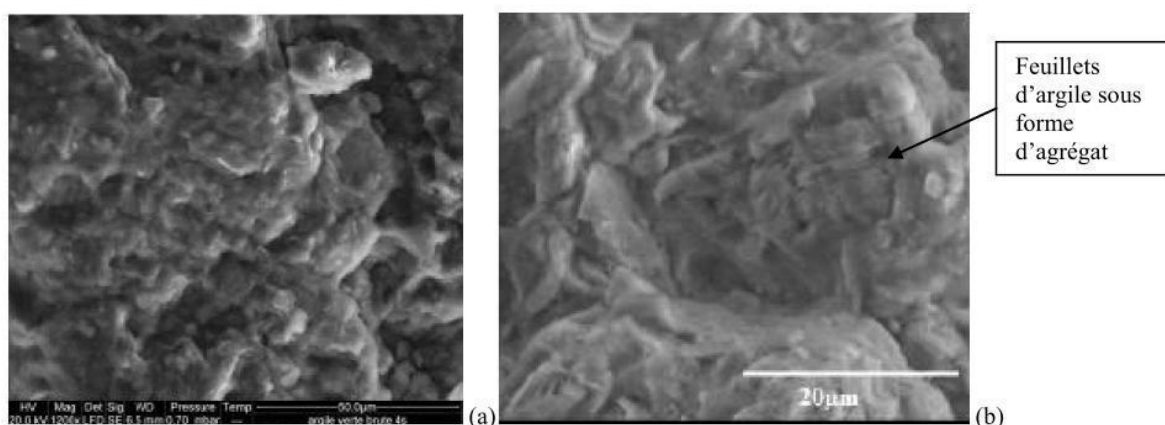


Figure II.11: Photographie au MEB de la texture matricielle (a : Argile Verte de Romainville) et la texture agrégée (b : Argile de Bavent) (Vincent. L et al., 2009).

Il est rare de rencontrer des sols argileux composés uniquement d'argile, et au sein même de la fraction argileuse, plusieurs types d'argiles peuvent coexister. La texture des sols argileux

peut varier fortement en fonction du type de minéraux argileux, du mode de sédimentation et de l'état de consolidation (Windal.T, 2001). Une roche argileuse qui présente une organisation serrée et orientée des particules d'argiles n'a pas le même gonflement qu'un sol argileux dont la sédimentation a été rapide et récente et pour lequel la distance entre les plaquettes est maximale. Cette organisation des minéraux argileux est la principale cause du gonflement anisotrope.

La texture des matériaux argileux se superpose donc aux organisations des autres minéraux non argileux. Cette hétérogénéité rend la structure et la texture extrêmement complexes, surtout lorsque les minéraux argileux sont cimentés par d'autres minéraux carbonatés.

V.5 Effet du temps sur le comportement des argiles

C'est en raison de leur caractère visqueux que les sols argileux, notamment les argiles molles, manifestent des comportements qui dépendent non seulement du type de sollicitations auxquelles ils sont soumis ou de leur intensité, mais aussi des vitesses de variation de ces sollicitations au cours du temps. De nombreuses études expérimentales, effectuées sur des sol naturel ou reconstitués, ont mis en évidence cette influence du temps sur leurs caractéristiques de résistance et de déformabilité (caractéristiques de compressibilité et de perméabilité, caractéristiques de consolidation et de fluage, caractéristiques de cisaillement et de rupture), notamment celles correspondant à leur état limite.

L'influence du temps sur le comportement des sols argileux s'exerce de manière plus ou moins importante selon la structure, la consistance et la compacité du sol considéré. Sur le plan pratique, les effets du temps ont été analysés suivant deux aspects différents :

- Les effets de l'âge ou du vieillissement : Taylor (1942), puis Bjerrum (1967) ont montré que le vieillissement des argiles sous contraintes effectives constantes ou peu variables, se traduisant par l'apparition de nouvelles liaisons inter granulaires rigides qui renforcent la structure du squelette solide, conduit à une réduction de leur indice des vides par suite des déformations de fluage qu'elles subissent. La réduction de l'indice des vides d'une argile donnée s'accompagne d'un accroissement de sa pression de pré consolidation et donc de sa résistance structurale. Cet effet semble être très prononcé dans le cas des argiles plastiques, pour lesquelles l'accroissement de résistance dû au vieillissement est proportionnel à celui de leur pression de pré consolidation.

- Les effets de la vitesse ou de la durée de chargement Crawford (1964) puis Bjerrum (1967) ont montré que la pression de pré consolidation apparente (définie par la limite des

petites déformations) d'une argile naturelle est réduite lorsque la durée d'application des charges est augmentée et inversement. Ceci est, semble-t-il, attribué à une autre 5 matérialisation du phénomène de la consolidation secondaire qui est liée au vieillissement de l'argile. A l'inverse, une diminution de la vitesse de chargement, c'est à dire de la vitesse de déformation de l'argile, correspond à un accroissement de la durée d'application des charges qui aurait pour conséquence la diminution non seulement de la pression de pré consolidation de l'argile, mais également de tous les seuils qui définissent sa courbe d'état limite.

Cependant, l'expérience met en outre en évidence l'influence des conditions d'essais sur les caractéristiques de résistance et de déformabilité des sols. Aussi, l'approche expérimentale basée sur l'essai oedométrique conventionnel à chargement par poids met en évidence l'influence des paliers de chargement adoptés (Bakir. N, 2006).

V.6 Conclusion

Il y a une très forte coordination entre le comportement du sol argileux et les changements climatiques en site : le retrait-gonflement, les fissurations sur les surfaces et à l'intérieur du sol et même les transformations des minéraux.

Chapitre III

Chapitre III : Détermination de la dimension fractale

I. Introduction

Les mathématiques ont servi à bâtir les pyramides, à étudier les mouvements des planètes, etc. On s'était habitué à ce que certains motifs présentent bien nos formules mathématiques notamment dans les structures bâties par l'homme avec des formes géométriques parfaites (des lignes droites, des cercles, etc.) qui sont connues sous le nom la géométrie euclidienne. Tandis que les motifs de la nature qui existent déjà avant notre arrivée sur terre ; les arbres, les nuages, ont échappé à leurs lois. Par la suite, ces formes ont été étudiées par des mathématiciens. Au milieu de XIX^{ème} siècle, quelques mathématiciens s'intéressaient à des courbes continues sans tangente qui sont devenues un problème mathématique. Et pourtant ceux-ci ne font qu'anticiper ce que l'on va nommer la géométrie fractale, développée et popularisée par Benoît Mandelbrot.

II. Formulation du concept de fractal

Le terme « fractal », créé par Benoît Mandelbrot, exprime l'idée de cassure (fracture, fraction, briser etc.). Il provient du mot latin « fructus », du verbe « frangere » qui signifie briser, présenter des irrégularités, fragmenter à toutes les échelles ou encore fractionner à l'infini.

III. Définition d'un objet fractal

Une fractale est un objet géométrique qui possède une complexité intrinsèque, une irrégularité fondamentale qui se manifeste à toutes les échelles d'observation et surtout une propriété d'autosimilarité (ou homothétie interne), c'est-à-dire semblable à toute échelle (chacune de leur partie reproduit leur totalité). Les objets fractals peuvent se définir comme des structures obtenues par l'itération d'un algorithme géométrique sur une figure.

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

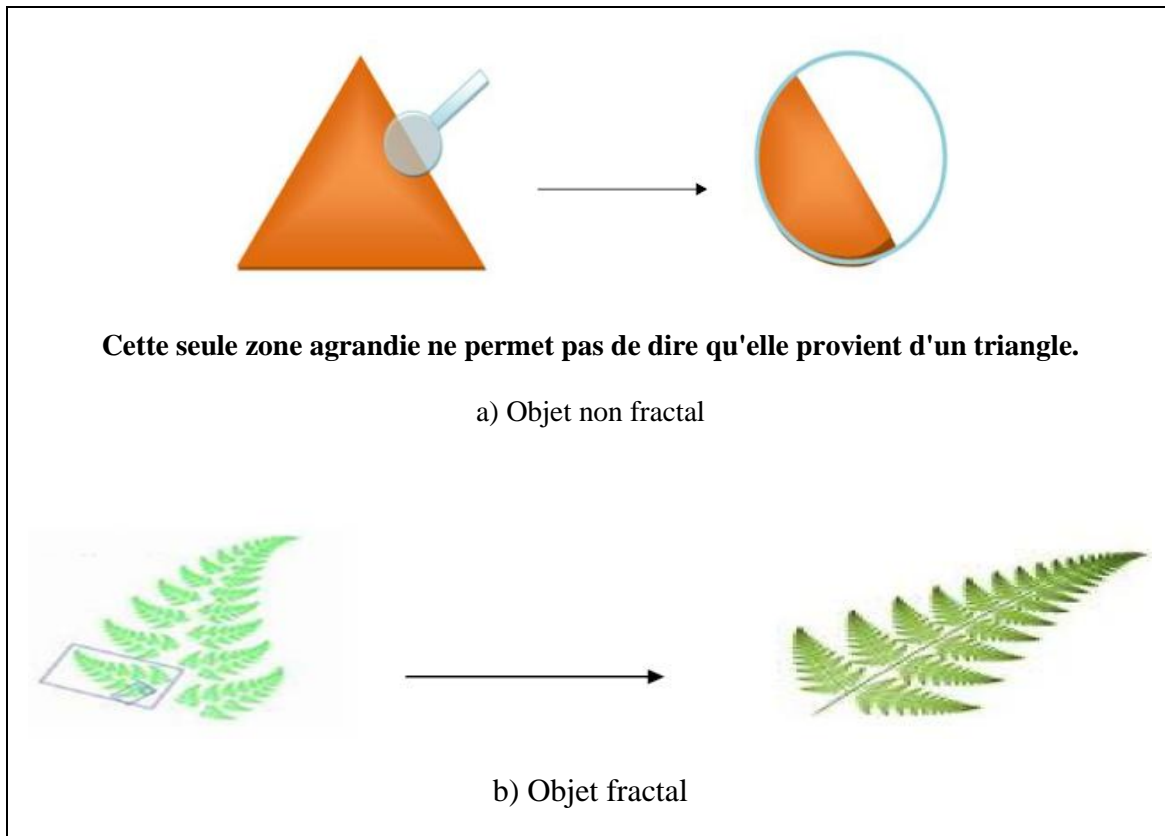


Figure III.1 : Objet fractal et non- fractal.

IV. Classification des objets fractals

Les fractals sont définis de façon récursive ou itérative, selon la manière avec laquelle ils sont construits. Nous pouvons distinguer deux grandes catégories : les fractals déterministes et les fractals non déterministes (Falconer. K, 1990 et Hastin. H et Sugihara. G,1994)

IV.1 Fractales déterministes

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

IV.1.1 Les systèmes de fonctions itérés (IFS : Iterated Function System)

Ce type de fractals à une règle de remplacements géométriques fixes. IFS est une théorie mathématique développée par John Hutchinson en 1981, utilisée dans le cadre de la géométrie fractale. Cette théorie est entièrement fondée sur les invariances par changement d'échelle. Parmi les IFS, on trouve la courbe de Helge Von Koch.

➤ La courbe de Helge Von Koch

La courbe de Von koch constitue un exemple de fractal appartenant à la catégorie des systèmes de fonctions itérées (Figure III.2). Cette courbe se dessine de façon récursive, en

partant d'un simple triangle équilatéral. A chaque étape, on divise chaque segment en 3 parties égales, et on remplace le segment central par deux segments formant un triangle équilatéral.

La tableau III.1 représente cette construction (pour un segment), et donne le nombre d'éléments constituant à l'échelle déterminé par le facteur d'homothétie :

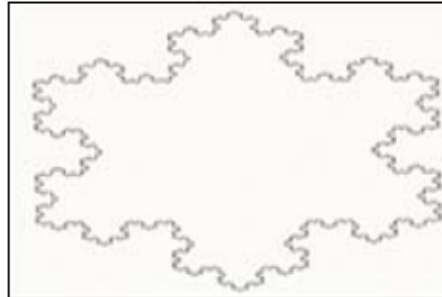

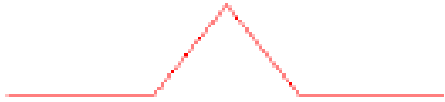
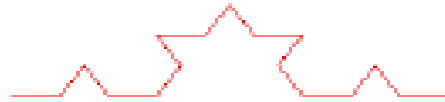
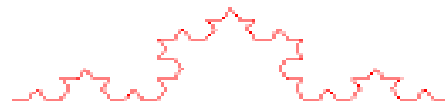
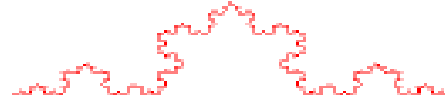


Figure III.2 : Courbe de Von Koch.

Tableau III.1 : Représente les étapes de construction de la courbe de Von koch.

	Une ligne droite.	
	Cette figure contient 4 fois la ligne droite précédente réduite d'un facteur 3.	$\begin{cases} n = 4 \\ k = 3 \end{cases}$
	Cette figure contient 4 fois la figure précédente réduite d'un facteur 3, ou bien, 16 fois la ligne droite de départ réduite d'un facteur 9.	$\begin{cases} n = 16 \\ k = 9 \end{cases}$
	Ainsi de suite...	$\begin{cases} n = 64 \\ k = 27 \end{cases}$
	La longueur diverge vers l'infini... ...dans un espace fini !	

IV.1.2 Fractales réalisées grâce à une suite de points

Les fractals réalisés grâce à une suite de points sont définies par une relation de récurrence pour tous les points de l'espace (tel que le plan complexe). Nous retrouvons dans cette catégorie les ensembles de Mandelbrot et celles de Julia.

IV.1.2.1 Ensemble de Mandelbrot

Cet ensemble, découvert en 1981, est souvent considéré comme « la fractale la plus complexe » et représente à ce titre le symbole des fractales. Il a été découvert en tentant de résoudre le problème suivant : Soit la suite $Z_{n+1} = Z_n^2 + C$

avec $Z_0 = 0$ et C un nombre complexe quelconque.

Pour définir mathématiquement la fractale de Mandelbrot on associe à chaque point M du plan complexe, la suite $Z_{n+1} = Z_n^2 + Z$

avec $Z_0 = 0$ et $Z = x + i.y$ l'affixe du point M . Tous les points pour lesquels la suite est bornée vont constituer l'ensemble de Mandelbrot. Il est assez facile de démontrer mathématiquement que si le module de Z_n est supérieur à 2 la suite va diverger.

On dessine alors le pixel de la couleur i . Si au bout d'un nombre d'itérations maximum, le module de Z_n est toujours inférieur à 2, on estime que la suite ne diverge pas et on affiche le pixel en noir. Le centre en noir représente l'espace où la suite converge. Les couleurs indiquent les courbes de niveau, c'est-à-dire la vitesse de divergence de la fonction.

A noter que l'ensemble de Mandelbrot est la frontière entre l'espace où la suite converge et l'espace où elle diverge.

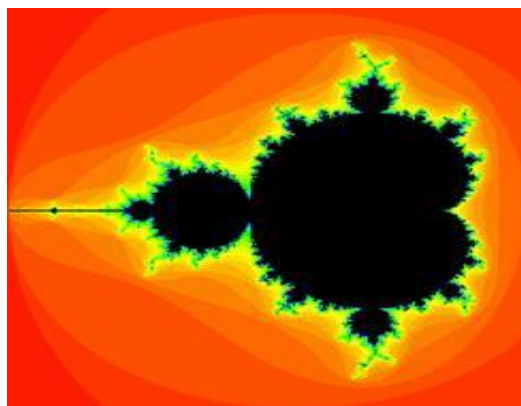


Figure III.3 : Ensemble de Mandelbrot.

IV.1.2.2 Ensemble de Julia

Les ensembles de Julia sont définis par la même suite sauf que le premier terme Z_0 est l'affixe du point courant et, C une constante propre à chaque ensemble de Julia. C'est à dire C est fixé pendant tout le calcul de l'image. Donc à chaque valeur de C correspond un ensemble particulier de Julia (Figure III.4).

Au départ Gaston Julia à proposer qu'est ce qu'il se passe si on prend une équation toute simple et on la répète en boucle, C'est-à-dire on prend une valeur et on lui applique la fonction, cela donne un résultat ; on prend cette nouvelle valeur et lui appliquant la même équation, nous obtenons une troisième valeur. Que ce que se passe-t-il si nous répétons plusieurs fois la même opération ?

Au bout d'un très grand nombre d'itérations la série de valeur obtenue s'appelle ensemble. Si on le calcule manuellement on ne pourrait jamais savoir à quoi il ressemble dans son intégral. Mais pour que cette branche de mathématique se développe il fallait attendre l'invention de l'ordinateur. Mandelbrot a pris les ordinateurs qui l'avait sous la main chez IBM et il traça un très grand nombre d'ensemble de Julia puis en 1980 il créa sa propre équation $F(z)=z^2+c$ qui englobe tous les ensembles de Julia en une seule représentation. Pour cela l'ensemble de Julia est un sous-ensemble de l'ensemble Mandelbrot.

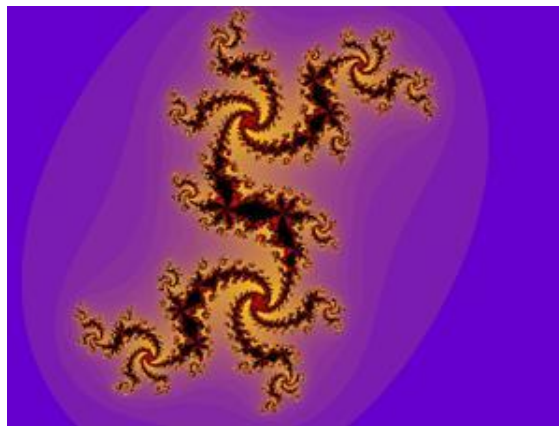


Figure III.4 : Dessin de l'ensemble de Julia.

IV.1.3 Fractals non uniformes

Une première extension, qui reste dans le cadre déterministe et parfaitement auto similaire, permet de construire des ensembles fractals non uniformes, en divisant un motif de base en n sous-motifs similaire, mais en utilisant des similitudes de rapports variables pour chacun des sous-motifs. Ces ensembles sont également qualifiés de multi-fractals. Une multi fractale est une réunion de fractales de dimensions différentes ou égales.

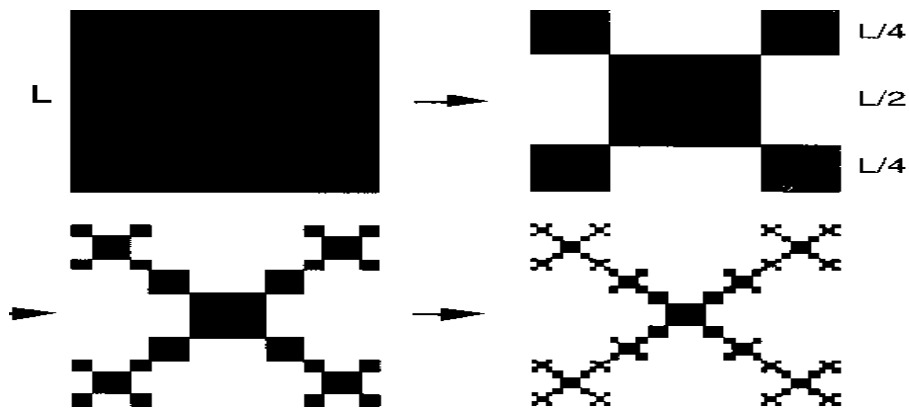


Figure III.5 : Ensemble de fractal non uniforme.

IV.2 Fractale non déterministe

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

IV.2.1 Objets fractals naturels

Objets aléatoires ou non déterministes, car le processus dynamique qui permet leurs créations varie lui-même avec le temps de façon aléatoire. Citant, les vaisseaux sanguins, les paysages fractals (les nuages, les montagnes, le chou-fleur). La figure III.6 montre un exemple de fractal naturel.

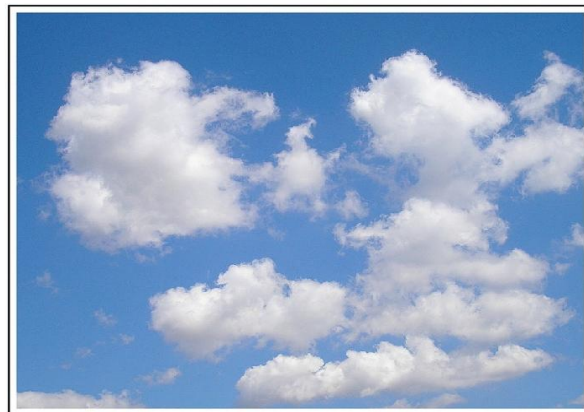


Figure III.6 : Fractal naturel (nuage).

a) Fractals aléatoires

On définit les fractals aléatoires comme des fractales pour lesquelles le choix de l'opération appliquée à chaque itération suit une loi de probabilité. Falcone a donné un exemple de

variantes aléatoires de courbe de Von Koch dont les principes de modification aléatoire sont illustrés sur la figure III.7.

Les fractales aléatoires sont les plus utilisées dans la pratique, et peuvent servir à décrire de nombreux objets extrêmement irréguliers du monde réel. Elles sont utilisées pour créer des paysages (dans les jeux vidéo par exemple).

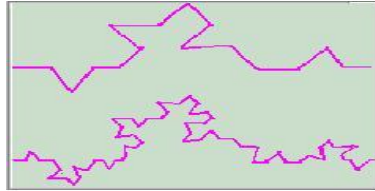


Figure III.7 : Fractals aléatoires.

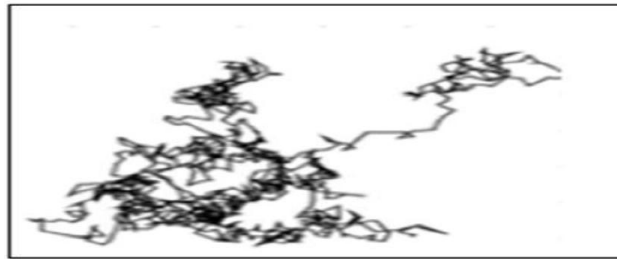


Figure III.8: Exemple de fractals aléatoires (Bouzeboudja. A, 2016).

V. Caractéristique d'un objet fractal

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

- Il a des détails plus ou moins similaires à des échelles arbitrairement petites ou grandes ;
- Il est trop irrégulier être décrit efficacement en termes géométriques traditionnels ;
- Il est exactement ou statistiquement auto similaire, c'est-à-dire que le tout est semblable à une de ses parties ;
- Sa dimension de Hausdorff-Besicovich est plus grande que sa dimension topologique, et possède une valeur fractionnaire (valeur non entière).

VI. Dimension fractale

En géométrie euclidienne, On connaît déjà la dimension de quelques figures simples qui sont des entiers naturels : 0 pour un point, 1 pour une courbe, 2 pour une surface et 3 pour un volume. En revanche, la dimension d'une fractale peut prendre des valeurs qui ne sont pas des nombres entiers : la dimension fractale constitue une généralisation de la notion de dimension utilisée en géométrie euclidienne.

Pour les fractales, il est impossible de désigner un point d'une fractale, puisqu'on ne peut pas mesurer de longueur le long de la fractale. Une ligne fractale dessinée dans un plan appartient bien à ce plan, de dimension 2, mais on ne peut pas dire qu'elle soit de dimension 1.

La dimension fractale DF ou dimension de similarité, est le nombre qui quantifie le degré d'irrégularité et de fragmentation d'un ensemble géométrique ou d'un objet naturel.

Elle est aussi une mesure de la façon dont la forme fractale occupe l'espace. La dimension fractale est un nombre réel, qui est proche de 1 quand la fractale est plutôt lisse, qui augmente quand la fractale devient plus accidentée (fragmentée), et qui tend vers 2 quand la fractale remplit la portion de plan qui lui sert de support. Les fractales ont donc une dimension comprise entre 1 et 2 ou entre 2 et 3.

Mandelbrot a défini un ensemble fractal comme étant un ensemble pour lequel la dimension de Hausdorff (DF_h) est plus grande que sa dimension topologique (D_t) et où DF_h et D_t sont définis comme suit :

- La dimension topologique DF_h est le rapport des logarithmes entre le nombre N d'homothéties internes de l'objet et l'inverse de la raison r de ces dernières :

$$DF_h = \frac{\ln(N)}{\ln\left(\frac{1}{R}\right)} \quad (\text{III.1})$$

- La dimension topologique D_t d'un objet correspond au nombre de variables indépendantes nécessaires pour le décrire.

VII. Intérêt de la dimension fractale

La valeur de la dimension fractale caractérise le degré de concentration de la masse dans une zone choisie de la structure, autrement dit, le degré de non-homogénéité de la répartition de la masse. Elle décrit la complexité d'une forme. Elle caractérise aussi le comportement auto-similaire d'une surface. Cette caractéristique n'est généralement pas acquise par les surfaces naturelles, mais elle est respectée en moyenne par les textures. Pour toutes ces raisons, la dimension fractale est dans la plupart des cas utilisée pour caractériser une texture.

La dimension fractale est utilisée dans divers domaines, tel que la biologie, la chimie, etc.

- ✓ En biologie la dimension fractale est utilisée pour caractériser la forme des protéines, la texture des images d'os issues de radio, etc
- ✓ En géographie pour généraliser le contour des côtes sur les cartes.

Ainsi, la dimension fractale permet de distinguer une ligne droite d'une ligne brisée ou courbée, chose qu'on ne peut pas obtenir avec la dimension euclidienne ou topologique.

VIII. Méthodes utilisées pour le calcul de la dimension fractale d'un grain de sol

Dans l'analyse d'image, la géométrie fractale, est dans la majorité des cas, utilisée à travers la notion de dimension fractale. De nombreuses méthodes existent pour la calculer.

Ces diversités mènent souvent à l'obtention de dimensions différentes par des méthodes distinctes pour le même objet. Ces différences s'expliquent par le fait que dans la majorité des cas, la dimension de Hausdorff-Besicovich ne peut pas être calculée sous cette forme (équation I) car les fractals ne possèdent pas toujours homothétie interne. Plusieurs techniques

De calcul de la dimension fractale sont proposées dans la littérature. Ces méthodes peuvent être groupées en trois classes :

- ✓ Celles basées sur le comptage de boîtes.
- ✓ Celles basées sur le Mouvement Brownien Fractionnaire (FBM).
- ✓ Celles basées sur la mesure des surfaces.

VIII.1. Méthodes basées sur les comptages de boîtes

Ce sont les premières méthodes développées pour le calcul de la dimension fractale.

Les méthodes de cette base se divisent en trois classes :

VIII.1.1. Méthode de box-counting ou BC

Cette méthode est la plus fréquemment utilisée et la plus populaire en pratique, dans le cas de la "fragmentation". La dimension fractale calculée par cette méthode nous donne une idée sur la distribution dimensionnelle des grains dans le sol et sur le procédé de fragmentation. Cette méthode consiste à diviser l'image d'un grain en petits carrés et de dimensions identiques (faire un maillage), ainsi le contour du grain qui passe par ces boites est compté (Figure III.9), et on refait la même opération mais cette fois avec des boites de tailles décroissantes ainsi de suite...

Cette méthode est basée sur le principe que l'image du grain correspond au nombre de boite en fonction de ses tailles (Huang et Zhan, 2002 ; Wang et Li, 2006) et cette relation est représentée par la formule suivante :

$$N(X>x) = KX^{-DF} \quad (III.2)$$

x : dimension des boites ;

$N(X>x)$: nombre des boites ;

K : constante ;

DF : dimension fractale.

En traçant dans un graphe logarithmique le nombre de boîtes en fonction de leur dimension (Figure III.10), la dimension fractale est obtenue suivant la pente la mieux adaptée à la ligne et peut être calculée par l'équation suivante :

$$DF = -m \tag{III.3}$$

m : l'exposant de la droite la mieux adaptée au nuage de points.

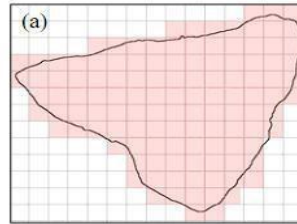


Figure III.9 : Application de la dimension fractale par (Box- Counting).

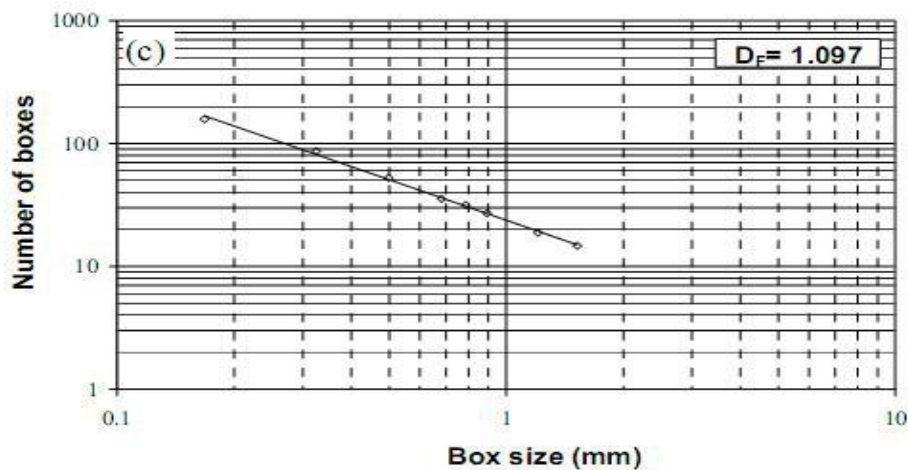


Figure III.10 : Droite de la dimension fractale par la méthode des boîtes.

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

$$DF = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\log Nr(F)}{-\log r} \tag{III.4}$$

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

VIII.1.2 Méthode du diviseur

Selon Mandelbrot (1983), des segments d'une même longueur (l) peuvent être tracés pour former un polygone à l'intérieur des frontières d'un grain ; ainsi, le périmètre de ce polygone peut être décrit comme suit :

$$P(l) = nl^{1-D_R} \quad (\text{III.5})$$

Dans cette équation, $P(l)$ est le périmètre du polygone, D_R est la dimension fractale du grain. On trace à l'aide du logiciel Excel le périmètre du polygone obtenu en fonction de l'unité de mesure (l), la dimension fractale est alors liée à la pente m , de la meilleure ligne obtenue en utilisant les données de l'équation (III.5) et sera calculée comme suit :

$$D_R = 1 - m \quad (\text{III.6})$$

A partir de cette méthode, trois types de dimension fractale peuvent d'être déduits.

La courbe $P(l)$ - $P(l)$ possède habituellement deux lignes de l'ajustement normal :

Tandis que les polygones de plus petites tailles de mesure représentent la dimension « De texture » de fractale (D_1), la ligne à la droite du point d'arrêt représente la dimension «structurale » de fractale (D_2). La dimension totale de fractale (D_{tot}) représente la ligne de l'ajustement normal aux points de repères entiers, qui ne concernent pas le point d'arrêt des tendances structurales et de textures. Voilà un exemple d'application de cette méthode, prenant un grain simple donné dans la (Figure. III-11a), des polygones de mesures de différentes tailles sont tracer à l'intérieur du grain (Figure. III-11b, c, d). Tout le périmètre du grain obtenu est tracé en fonction de l'unité de mesure, afin de calculer les dimensions fractales.

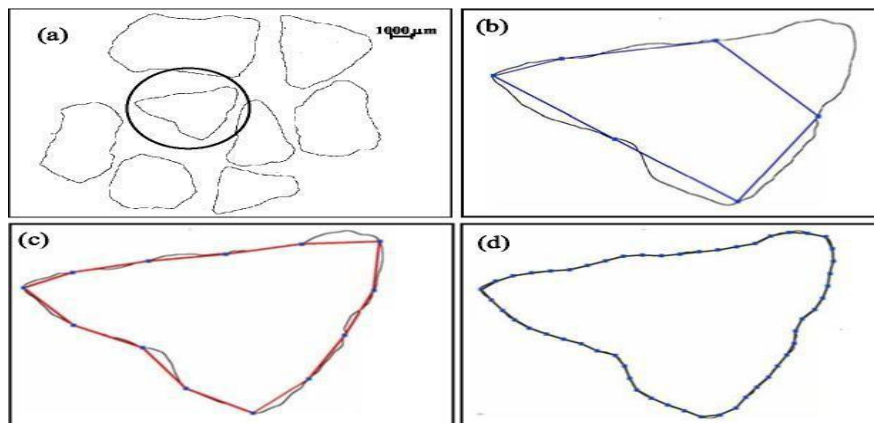


Figure III.11 : (a) Le grain de sable après l'analyse de l'image, le reste des figures contient les polygones tracés sur le grain avec une taille de mesure : (b) 2 mm, (c) 1mm et (d) 0.25mm.

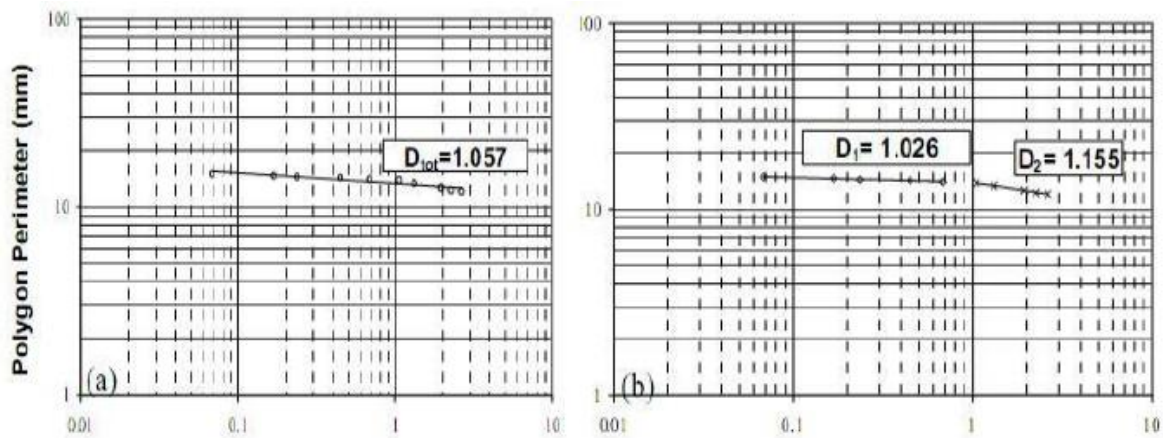


Figure III.12 : Calcul de la dimension fractale (a) Totale (b) Texturale (D1) et structurale (D2).

VIII.1.3 Surface-Périmètre (Area-Perimeter)

La méthode de surface périmètre est l’une des méthodes de calcul de la dimension fractale de rugosité, la plus facile à appliquer à la géométrie fractale des grains du sol.

Après l’obtention de leurs images, des techniques de traitement d’image sont utilisées pour l’obtention du périmètre et de la surface des grains à l’aide de plusieurs logiciels, comme l’Auto-CAD 2009.

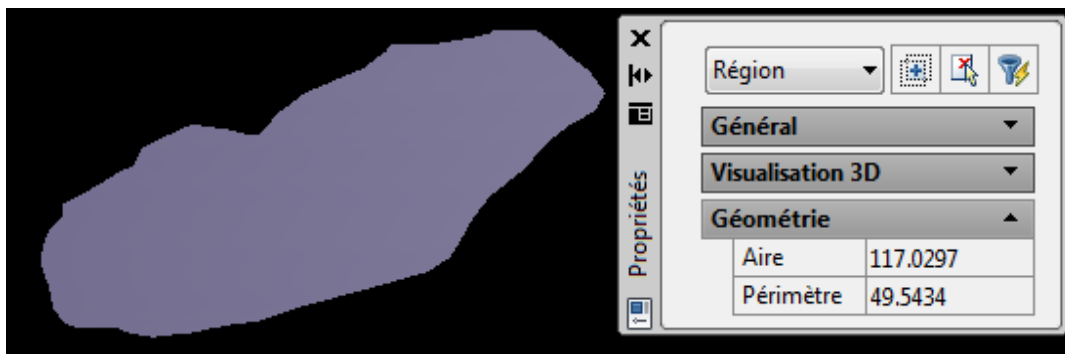


Figure III.13 : Calcul du périmètre et de la surface d’un grain (Φ= 6.3 mm) à l’aide de logiciel Auto-CAD 2009 (Bouzeboudja. A, 2016).

En introduisant les résultats obtenus, les périmètres en fonction de surfaces, avec le logiciel Excel, un graphe logarithmique et pour une loi en puissance, la dimension fractale est ainsi obtenue tel que détaillé dans ce qui suit. Dans ce processus la proposition de Mandelbrot de « Linear Ratio of Extents » (rapport linéaire d’estimation) peut être employée (Mandelbrot, 1983).

$$C = \frac{P^{1/DF_R}}{A^{0.5}} \tag{III.7}$$

Dans cette équation :

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

P : est le périmètre du grain.

A : la surface du grain.

D_{FR} : la dimension fractale moyenne de la rugosité des grains. Elle caractérise l'irrégularité du contour de grain. Théoriquement, elle vaut 1 pour des contours lisses et réguliers tels que le cercle. En prenant le logarithme des deux côtés dans l'équation, on peut obtenir l'expression suivante :

$$\frac{1}{D_{FR}} \log P = \log (c\sqrt{A}) \quad (III.8)$$

D'où l'on tire Log P par l'expression :

$$\log P = \frac{D_{FR}}{2} (\log c^2 + \log A) \quad (III.9)$$

D'où l'on tire Log P par l'expression :

$$\log P = \frac{D_{FR}}{2} (\log c^2 + \log A) \quad (III.10)$$

En posant $K = 18 \log C$, l'équation suivante est obtenue :

$$\log P = K + \frac{D_{FR}}{2} (\log A) \quad (III.11)$$

Dans l'équation, la pente de la ligne d'ajustement normal d'Area-Perimeter est égale à $2/D_{FR}$, la dimension fractale (D_{FR}) est ensuite calculée par le rapport :

$$D_{FR} = 2/m \quad (III.12)$$

Cependant, ce modèle ne peut pas déterminer la dimension fractale pour les grains de sol séparément.

Essentiellement, la dimension fractale déterminée par la méthode d'Area-Perimeter est une valeur "commune" pour les grains. Par conséquent, la méthode de ligne Divider semble être une approche plus raisonnable concernant la détermination de la dimension fractale.

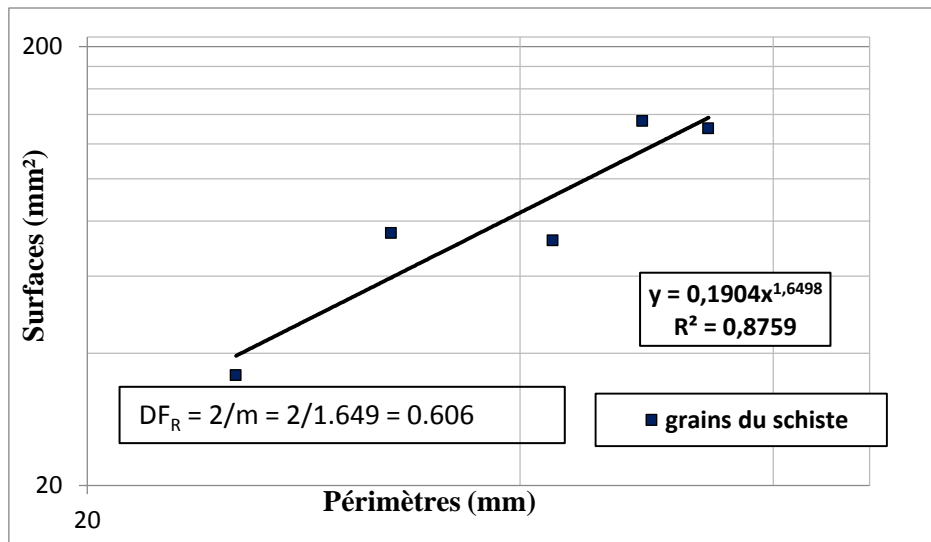


Figure III.14: Application de la méthode d’Area–Perimeter d’un gros grain de sable d’origine d’une pierre calcaire (Bouzeboudja. A, 2016).

VIII.1.4 Méthode des lignes parallèles (Kévin. P. Hammer., 2005)

La mesure de la rugosité par la méthode des lignes parallèles, ressemble à la méthode précédente. Traçant tout d’abord des lignes parallèles, puis en employant une unité de longueur de la mesure en fonction de toute la longueur du périmètre des particules (Vallejo. L et hyslip. J, 1997) voir l’exemple suivant :

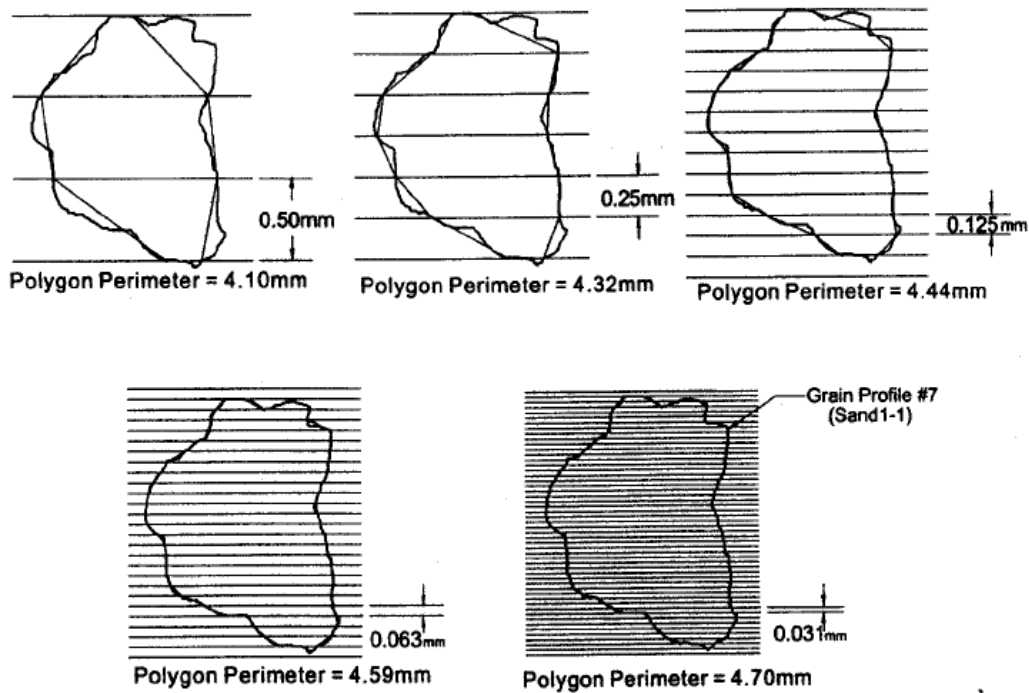


Figure III.15 : Schéma représentant la méthode des lignes parallèles (Yezli. S, 2011).

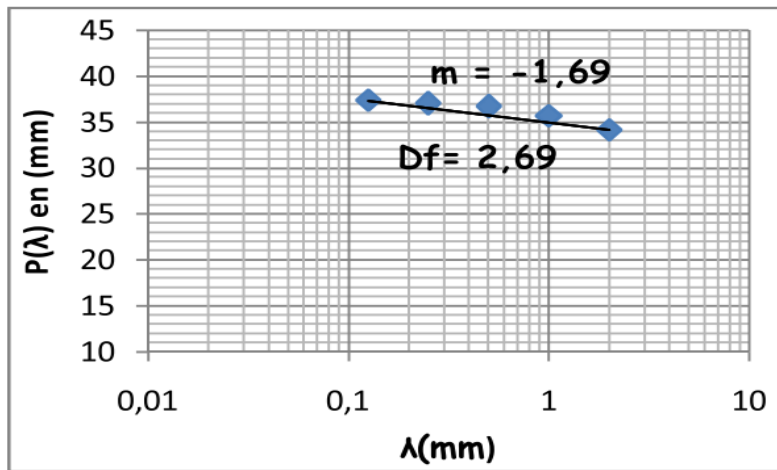


Figure III.16 : Courbe de la dimension fractale de la méthode des lignes parallèles (Yezli. S, 2011).

VIII.1.5 Méthode 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 DFR. Cette méthode de calcul emploie la masse retenue en passoire et son diamètre correspondant. Cette équation est définie comme suit :

$$\frac{M(R < r)}{M_T} = \left(\frac{r}{r_L}\right)^{3-DF_{FR}} \quad (\text{III.13})$$

$M(R < r)$: 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_{FR} : dimension fractale de fragmentation.

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

$$DF_{FR} = 3 - m \quad (\text{III.14})$$

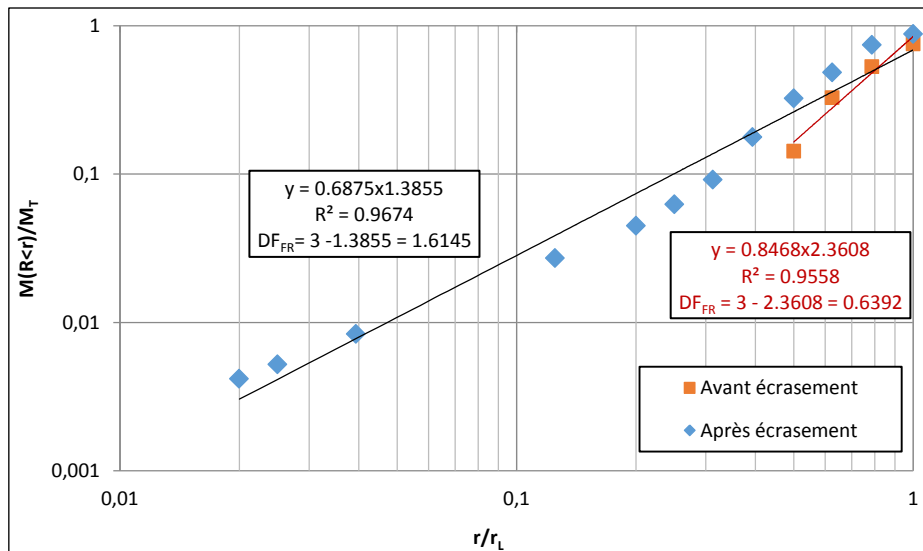


Figure III.17 : Détermination de la dimension fractale DF_{FR} par la méthode des masses (Bouzeboudja. A, 2016).

VIII.1.6 La méthode de de Comptage Différentiel de Boîtes (CDB).

Soit, $(M \times M)$ une image en niveaux de gris, considérée comme une surface 3D, représentée dans un espace (o, x, y, z) tel que (o, x, y) est le plan des positions des pixels et (o, z) est la troisième dimension qui représente l'axe des positions des niveaux de gris. Soit G le plus grand niveau de gris de l'image (Sarkar et Chaudhuri, 1992).

Le plan (o, x, y) est partitionné en pavés réguliers (non chevauchés) de taille $(s \times s)$, s est un entier tel que :

$$\left(\frac{M}{2}\right) \geq s > 1 \tag{III.15}$$

Le rapport de partitionnement est alors :

$$r = \frac{s}{M} \tag{III.16}$$

Des cubes de taille $(s \times s \times s')$ où $G/s' = M/s$ sont empilés sur chaque pavé (l, k) , de la grille pour qu'ils soient alignés verticalement le long de l'axe des intensités et prenant de bas en haut des étiquettes chiffrées comme suit : 1, 2, 3.... Il existe ainsi sur chaque pavé de la grille, une colonne quadratique comme le montre la figure (III.18).

Soit $n_r(l, k)$ le nombre de cubes nécessaires pour contenir une portion de l'objet correspondant au $(l, k)^{i\text{ème}}$ pavé de la grille tel que :

$$n_r(l, k) = l' - k' + 1 \tag{III.17}$$

l' : numéro de la boîte cubique qui a le niveau de gris maximal dans la colonne quadratique considérée.

k' : numéro de la boîte cubique qui a le niveau de gris minimal dans la colonne quadratique considérée.

Dans l'exemple de la figure (III.18), nous avons :

$$s = s' = 3 \text{ et } n_r(l, k) = 6 - 1 + 1 = 6 \text{ cubes.} \quad (\text{III.18})$$

Le nombre total N_r de cubes nécessaires pour recouvrir tout l'objet est donné comme suit :

$$N_r = \sum_{l,k} n_r(l, k) \quad (\text{III.19})$$

N_r est calculé pour les différentes valeurs de s ou de r .

La dimension fractale peut être alors estimée en utilisant l'équation suivante :

$$DF = \frac{\log(N_r)}{\log(1/r)} \quad (\text{III.20})$$

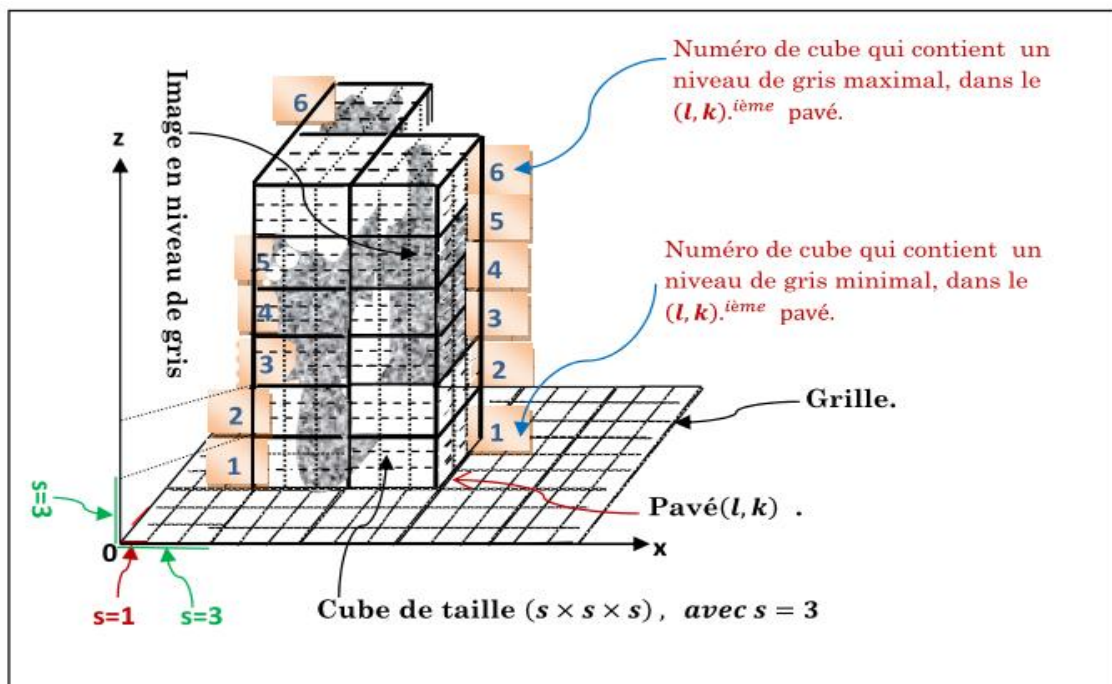


Figure III.18 : Technique de Comptage Différentiel de Boîtes (CDB) (Sarkar et Chaudhuri, 1992).

Tso et Mather (Sun et al. 2006) ont montré que l'application de cette méthode dans le domaine de la télédétection, ne donne pas de résultats satisfaisants. De plus, l'altitude des cubes (s') a une grande influence sur le nombre minimal de cubes nécessaires pour couvrir un objet fractal. En effet « s' » augmente lorsque « s » augmente car :

$$s' = (s \times G)/M \tag{III.21}$$

Ce phénomène peut produire une erreur lors du calcul de nombre de cubes de chaque bloc ($n_r(l, k)$) et par conséquent le nombre total N_r (Li et al. 2009).

En effet, si on considère deux pixels A et B appartenant au même pavé (même bloc). La méthode (CDB) construit sur ce pavé une colonne à base des cubes ayant les mêmes dimensions. Supposant que la taille de chaque cube est $3 \times 3 \times 3$, alors les pixels A et B sont assignés respectivement aux cubes numéros 2 et 3 (Figure III.19). Dans ce cas, il faut deux cubes pour couvrir ces pixels, alors qu'en réalité il ne faut qu'un seul cube puisque la distance entre ces deux pixels suivant la direction (oz) est inférieure à 3. Cette quantité produit alors une erreur lors du calcul de la quantité totale N_r puisque cette dernière ne sera pas égale au nombre minimum (optimum) de cubes qui peuvent couvrir l'objet.

Afin d'éviter ce problème une version améliorée de la méthode de Comptage Différentiel des Boîtes a été proposée.

Celle-ci consiste à choisir $r = s$ tel que :

$$\left(\frac{M}{2}\right) \geq s > 1, \text{ et } s' = \frac{s}{\alpha} \tag{III.22}$$

α : un entier supérieur ou égal à 1.

Pour que le nombre $n_s(l, k)$, i.e $n_r(l, k)$, soit optimal, il faut attribuer une grande valeur pour α afin d'avoir des cubes d'altitude « s' » très fine. $n_r(l, k)$ prend alors la forme suivante :

$$n_r(l, k) = \begin{cases} \text{ceil} \left[\frac{(l'-k')}{s'} \right] & \text{si } (l \neq k). \\ 1 & \text{si } (l = k). \end{cases} \tag{III.23}$$

➤ La fonction $\text{ceil}(x)$ permet d'arrondir la valeur x au plus petit entier supérieur ou égal à x (partie entière par excès).

La dimension fractale D peut être déduite à partir de nuage de points :

$$\left(\log \left(\frac{1}{r} \right), \log (N_r) \right) = \left(\log \left(\frac{1}{s} \right), \log (N_s) \right) \tag{III.24}$$

Considérant l'exemple précédant. Pour $\alpha = 1$; On aura :

$$s' = s = 3 \text{ et } n_r(l, k) = \left\lceil \frac{(3-2)}{3} \right\rceil = 1 \text{ cube} \tag{III.25}$$

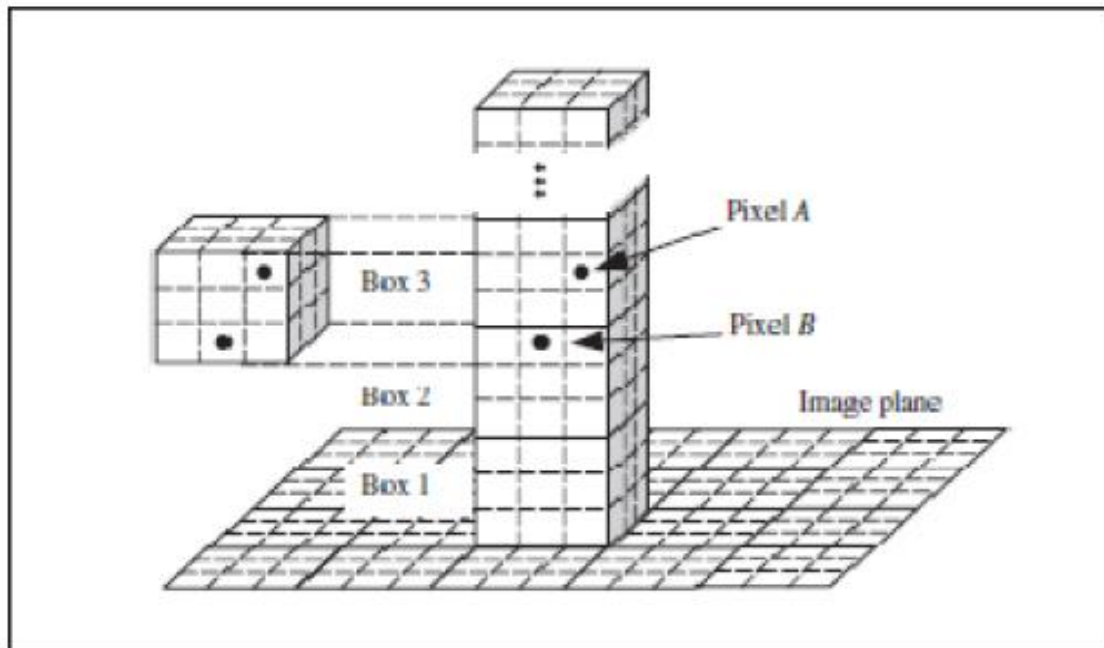


Figure III.19 : Deux pixels appartenant à deux cubes différents d'altitude 3 alors que leur distance suivant (oz) est inférieure à 3 (Li et al. 2009).

Le choix du nombre et des valeurs de « s » constitue un autre problème. En effet, le nombre de paramètres peut influencer sur la valeur de DF. Dans ce cas, la solution proposée par Pleshanov (Pleshanov et al. 2010) se définit comme suit : pour une image de taille (M × M)

prenant pour $\left(\frac{M}{2}\right) \geq s > 1$, des cubes de taille (s × s × s') tel que :

$$r = s \tag{III.26}$$

$$s = 2^g \tag{III.27}$$

$$g = 1, 2, \dots, \log(M) - 1 \tag{III.28}$$

$$G/s' = M/s \tag{III.29}$$

G est le nombre de niveau de gris total de l'image, et $DF = -B$, tel que B est la pente de la droite de régression (log (s), log (N_s)).

D'autres modifications de la méthode de Comptage Différentiel de Boîtes ont été apportées par Cheng (Cheng, 1999), Du (Du et Yeo, 2002) et Lee (Lee et Hsieh, 2010). L'une d'elles a été proposée par Jin (Jin et al. 1995) ; elle est connue sous le nom de Relative Differential Box Counting (Rbcd). Le nombre $n_s(l, k)$ est calculé comme suit :

$$n_s(l, k) = g_{\max}(l, k) - g_{\min}(l, k) \tag{III.30}$$

Où : $g_{\max}(l, k)$ et $g_{\min}(l, k)$ sont respectivement le niveau de gris minimal et le niveau de gris maximal des pixels du pavé de taille $(s \times s)$ et de coordonnées (l, k) (Figure III.20).

Dans ce cas, le nombre N_s de cubes nécessaires pour couvrir tout l'objet est estimé comme suit :

$$N_s = \sum_{l,k} \text{ceil} \left[\frac{M \times (n_s(l,k))}{s \times G} \right] \quad (\text{III.31})$$

G étant le niveau de gris maximal de l'image.

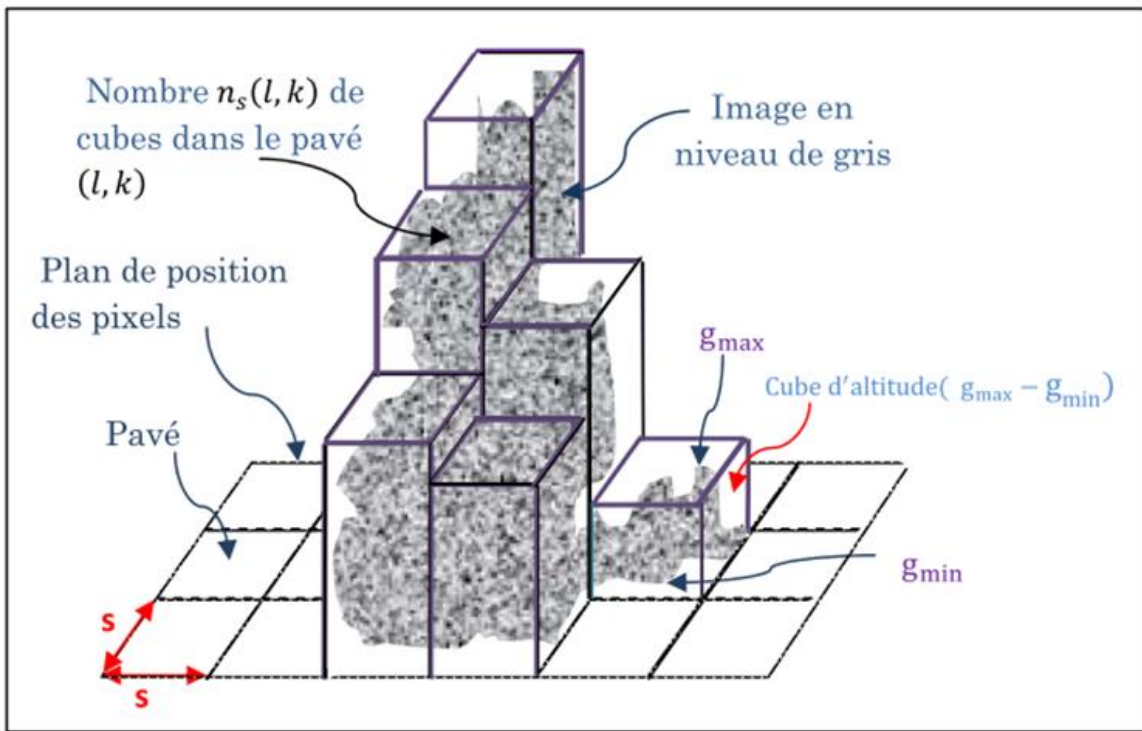


Figure III.20 : Nombre N_s de cubes qui couvre l'image (Pleshanov et al., 2010).

Cheng (Cheng, 1999) a proposé d'utiliser une fenêtre glissante de taille $(r \times r)$, centrée sur chaque pixel de coordonnées (i, j) d'une image de taille $(M \times M)$. Il détermine ensuite $n_r(i, j)$ et N_r de la même manière que dans la méthode de CDB.

Quant à Du et Yeo (Du et Yeo, 2002), ils combinent la méthode de Jin (Jin et al. 1995) avec celle de Cheng (Cheng, 1999) de la manière suivante :

Un pavé de taille $(r \times r)$ est déplacé et centré sur les pixels (i, j) de la fenêtre de voisinage de taille $(M \times M)$ avec $r < M$.

Le nombre $n_r(i, j)$ est déterminé comme suit :

$$n_r(i, j) = g_{\max}(i, j) - g_{\min}(i, j) \quad (\text{III.32})$$

$g_{\max}(i, j)$ et $g_{\min}(i, j)$ sont respectivement les niveaux de gris maximal et minimal des pixels situés dans la fenêtre de voisinage ($r \times r$). La contribution de tous les cubes est alors :

$$N_r = \sum_{i,j} \text{ceil} \left[\frac{M}{g} (n_r(i, j)) / r \right] \quad (\text{III.33})$$

Une autre modification proposée récemment par Lee et Hsieh (Lee et Hsieh, 2010) consiste à calculer $n_r(l, k)$, avec $r = s/M$, de la façon suivante :

$$n_r(l, k) = 2 \left(\frac{\sigma(l, k)}{s'} \right) + 1 \quad (\text{II.34})$$

Où $\sigma(l, k)$ est l'écart type des niveaux de gris des pixels situés dans une boîte de coordonnées (l, k) . Il mesure le degré de la dispersion des niveaux de gris.

$$\sigma(l, k) = \sqrt{\frac{\sum_{i,j} (g(i, j) - m)^2}{N}} \quad (\text{III.35})$$

N : nombre de pixels situés dans le pavé (l, k) ;

$g(i, j)$: niveau de gris d'un pixel du pavé (l, k) ;

m : niveau de gris moyen des pixels du pavé (l, k) .

VIII.2 Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre les outils fondamentaux de la théorie fractale. Il ressort de cette étude que la notion fractale est riche et au même temps fascinante, elle a montré les limites de la géométrie euclidienne pour décrire des objets complexes.

La théorie fractale a offert de nouvelles perspectives aux sciences, elle a déjà trouvé de nombreuses applications et méthodes du calcul de la dimension fractale. Dans le chapitre qui suit on s'intéressera à l'application de cette théorie dans le domaine du Génie Civil.

chapitre IV

Chapitre IV : Les essais d'identification des sols étudiés

I. Introduction

Les essais d'identification permettent de qualifier le sol par un nom plus précis (argile, sable, limon argileux ...). Une telle appellation est très utile quand elle est un peu rigoureuse car le mécanicien des sols sait pour chaque type de sol, quelles sont les propriétés à étudier, quels sont les risques possibles et quelles sont les aptitudes principales.

Dans le domaine de la géotechnique, l'identification du matériau qu'on voudrait utiliser est la première étape à suivre. Cette opération se fait à l'aide des essais de laboratoire et in-situ. Ces essais permettent la détermination des caractéristiques mécaniques et physiques du sol concerné. Ces dernières sont d'un grand intérêt, car elles servent non seulement à classer les sols mais à nous renseigner aussi sur leur comportement mécanique, ce qui met à notre disposition des informations d'une extrême importance quant aux possibilités d'utilisation en construction civile.

Dans ce travail ces caractéristiques sont déterminées par des essais simples et rapides, appelés "essais d'identification" :

- La teneur en eau (w)
- Poids volumique sèche
- Poids volumique humide
- Masse volumique des grains solides
- L'indice des vides, le degré de saturation
- Les limites d'Atterberg
- Valeur de bleu de méthylène
- Analyse chimique

II. Origine des matériaux utilisés

Les matériaux étudiés dans ce travail sont des matériaux locaux souvent rencontrés dans la région de la Grande Kabylie (Tableau IV.1).

-L'échantillon N°01 est prélevé d'un site à Azazga « Bouzeguene » (labo sol Azazga) pour un projet de réalisation d'une maison d'habitation, profondeur de sondage 1,70m et 2,10m.

- L'échantillon N°02 est prélevé d'un site à Azazga « Handou » (LNHC- Tizi Ouzou) pour un projet de réalisation d'une salle de soins, profondeur de sondage 3,60/4,00m.

- L'échantillon N°03 est prélevé d'un site à Azeffoune cette étude de sol géotechnique est située à l'évitement du la ville d'Azefoun, wilya de Tizi-Ouzou au niveau des blocs a et b promotion résidentielle, faisant l'objet d'une stabilité d'un talus causer par un glissement du terrain, la profondeur de sondage 3.00/3.30m.
- L'échantillon N°04 est prélevé d'un site à Sud-ouest (LNHC- Tizi-Ouzou) pour un projet de réalisation d'une maison d'habitation (R+2), la profondeur de sondage 2.30/2.60m
- L'échantillon N°05 est prélevé d'un site à Sidi Naamane (LNHC- Tizi-Ouzou) pour un projet de réalisation d'un Hangar, la profondeur de sondage 1.60/1.80m.





Figure IV.1 : Images satellites qui montre les zones d'échantillonnage.

Nom	Lieu de sondage	Numéro de sondage	Profondeur de sondage
Argile 1	Azazga (Bouzguene)	Sc. 01	1,70/2,10
Argile 2	Azazga (Handou)	Sc.01	3,60/4,00
Argile 3	Azefoun	Sc. 01	3,00/3,30
Argile 4	Sud-Ouest	Sc.01	2,30/2,60
Argile 5	Sidi Naamane	Sc.01	1,50/1,80

Tableau IV.1 : La zone et la profondeur des carottes des matériaux étudiés.

III. Caractéristiques physiques et chimiques :

III.1 Caractéristiques physiques :

Les essais d'identification sont réalisés au niveau de laboratoire de recherche géo-matériaux, Environnement et Aménagement (LGEA) de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

III.1.1 Teneur en eau naturelle W % (NF P 94 – 050) – Méthode par étuvage

La teneur en eau d'un matériau est le rapport du poids d'eau contenu dans un échantillon du matériau comparativement au poids du même matériau sec. On définit la teneur en eau comme le poids d'eau par W contenu par unité de poids de matériau sec.

$$W = \left(\frac{w_w}{w_s} \times 100 \right) \quad (IV.1)$$

III.1.2 Masse volumique des sols.

1) Masse volumique des grains solides des sols selon la norme (NF 94 – 054) méthode au pycnomètre.

La norme NF P94-054 (octobre 1991) a pour objet la détermination, au pycnomètre à eau, de la masse volumique des grains solides de sol. Elle s'applique sur échantillons d'éléments de dimension inférieure à 2mm.

La masse volumique des particules solides de sol est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\rho_s = \frac{(m_3 - m_1) \rho_w}{[(m_2 - m_1) - (m_4 - m_3)]} \quad (\text{IV.2})$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{v_s} \quad (\text{IV.3})$$

Avec :

m_1 : masse du pycnomètre vide

m_2 : masse du pycnomètre plein d'eau (g)

m_3 : masse du pycnomètre avec le matériau (g)

m_4 : masse du pycnomètre avec le matériau et l'eau (g)

ρ_w : Masse volumique de l'eau égale à 1000kg/m³.

2) Masse volumique humide de sol (NF P 94 - 053) – Méthode de l'immersion dans

L'eau

Méthode de mesure de ρ_h par pesée hydrostatique :

La masse de l'échantillon est obtenue par pesage à l'air et le volume par la méthode de l'immersion dans l'eau.

La même masse de l'échantillon dans l'air est paraffinée et ensuite pesée dans l'air.

À la moyenne d'une balance hydrostatique, on pèse notre échantillon paraffiné dans l'eau.

3) Masse volumique du sol sec ρ_d (NF P 94 – 064)

C'est le rapport de la masse du matériau sec au volume de ce même matériau sol.

$$\rho_d = \frac{m_s}{v_t} \quad (\text{IV.4})$$

Avec:

La relation existante entre ρ_d et ρ_h qui est :

$$\rho_d = \frac{\rho_h}{(1 + w)} \quad (\text{IV.5})$$

III.1.3 : Indice des vides et degré de saturation :

- ❖ **Indice des vides (e) :** C'est le rapport du volume des vides au volume des grains solides (Tableau IV.2).

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (\text{IV.6})$$

Avec:

$$e = \left(\frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \right) \quad (\text{IV.7})$$

- ❖ **Degré de saturation S_r (%) :** C'est le rapport du volume de l'eau au volume des vides d'un sol.

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (\text{IV.8})$$

Avec:

$$S_r = \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \times \left(\frac{W}{e} \right) \quad (\text{IV.9})$$

Tableau IV.2 : L'état de saturation du matériau d'après TERZAGHI.

Sr (%)	Appréciation
100	saturé
76-99	détrempé
51-75	mouille
26-50	humide
1-25	Légèrement humide
0	sec

III.1.7 : Les limites d'ATTERBERG (NF P 94-051)

Dans les sols fins, où la surface spécifique des grains " rapport de la surface du grain à son volume" est grande, l'eau joue un rôle très important par son influence sur les forces qui s'exercent entre les particules (Figure IV.1). Selon la valeur de la teneur en eau, les propriétés mécaniques d'un sol fin évoluent depuis celle d'un solide faible" jusqu'à celle d'un liquide

élevé". Entre ces deux états, pour les teneurs en eau moyennes, le sol présente des propriétés plastiques, est-à-dire, qu'il est capable de se déformer rapidement et considérablement sans se casser, se fendiller ou changer de volume et sans présenter de déformation réversible notable. L'état solide peut lui-même être séparé en deux états : un état dans lequel l'eau absorbée est encore en place, appelé état solide avec retrait, et un état dans lequel toute l'eau absorbée a disparu, appelé état solide sans retrait. Le retrait est une diminution du volume qui accompagne l'élimination de l'eau adsorbée.

➤ Matériel utilisé

- Etuve ;
- Appareil de Casagrande ;
- Tares, spatule, balance électronique ;
- Outil à rainurer.

III.1.7.1 La procédure de l'essai

L'essai s'effectue en deux phases :

- 1) La recherche de la limite de liquidité à la coupelle de Casagrande
- 2) La recherche de la limite de plasticité au rouleau.

Pour la préparation du mortier, une masse de sol, prise après échantillonnage et homogénéisation par brassage, est mise à imbiber dans un récipient d'eau, pendant 24 heures, et tamisée par voie humide au tamis de 400 μ m. L'eau de lavage et le tamisât sont recueillis dans un bac. Une fois décantée, l'eau claire est siphonnée sans entraîner les particules solides.

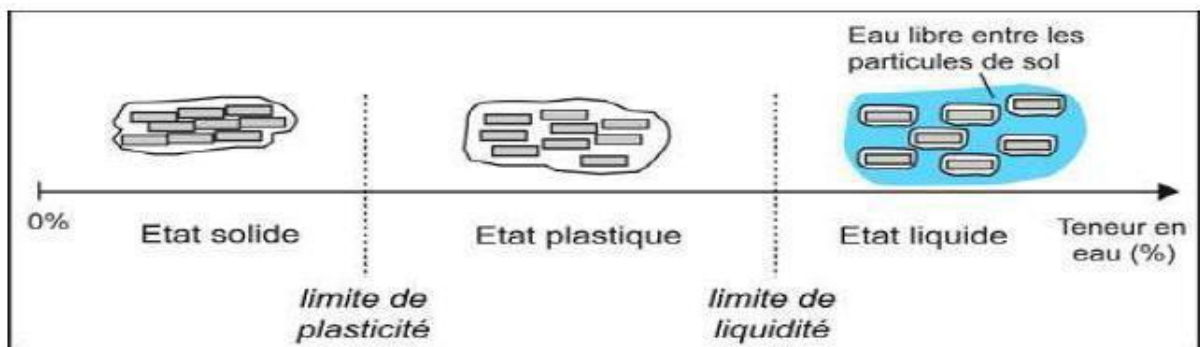


Figure IV.2: Limites d'Atterberg (Santamarina, 2001).

a) La détermination de la limite de liquidité

- 1) Prendre environ 200gr de sol préalablement tamiser à 0.4mm par voie humide et séché.

- 2) Malaxer la totalité de la prise de telle sorte à obtenir une pâte homogène et presque fluide (Figure IV.2).
- 3) Prendre une partie de la pâte et l'étaler dans la coupelle de l'appareil de Casagrande à l'aide de la spatule.
- 4) Pratiquer une rainure dans cette pâte de telle sorte à la diviser en deux. L'outil à rainurer devra être tenu perpendiculairement à la coupelle en présentant sa partie biseautée face à la direction du mouvement.
- 5) Soumettre la coupelle et le matériau qu'elle contient à des chocs répétés avec une cadence de 2 coups par seconde.
- 6) Arrêter les chocs quand les deux lèvres se rejoignent sur environ 1cm, noter le nombre de coups N correspondant.
- 7) Prélever des deux côtés des lèvres à l'endroit où elles se sont refermées environ 5gr de sol. Afin d'en déterminer la teneur en eau.
- 8) Rehomogénéiser le sol et le sécher un peu puis reprendre les opérations de 3 à 7. Il faut au moins trois essais avec un nombre de coups croissant et de préférence bien étalé entre 15 et 35.

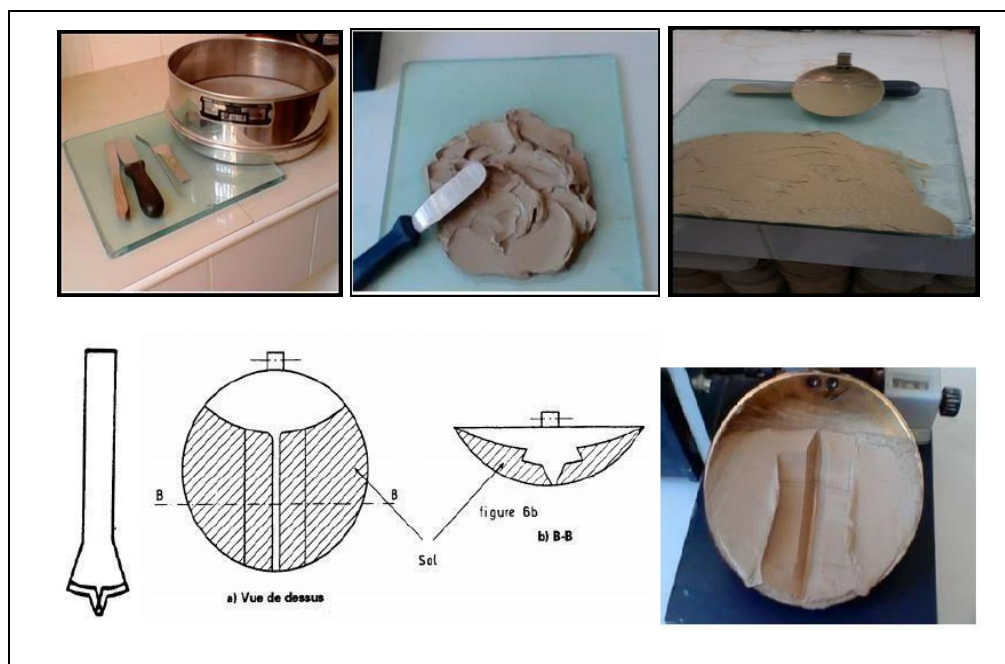


Figure IV.3 : La fermeture de la rainure (Cheheb. F ,2016).

b) La détermination de la limite de plasticité

- Prendre un peu de matériau et former une petite boule.
- Rouler à la main sur la plaque de marbre cette boule de telle sorte à obtenir un bâtonnet (Figure IV.3).

Trois cas peuvent se présenter :

1. Le bâtonnet confectionné commence à se fissurer quand il atteint une longueur de 15 cm et un diamètre de 3cm. Dans ce cas, le sol est à la limite de plasticité et faut la mesurer.
2. Le sol est encore fluide et vous n'arrivez pas à confectionner le bâtonnet. Il faut sécher un peu le matériau.
3. Le bâtonnet commence à se fissurer trop, le matériau est sec. Il faut l'humidifier un peu (Figure IV.4).

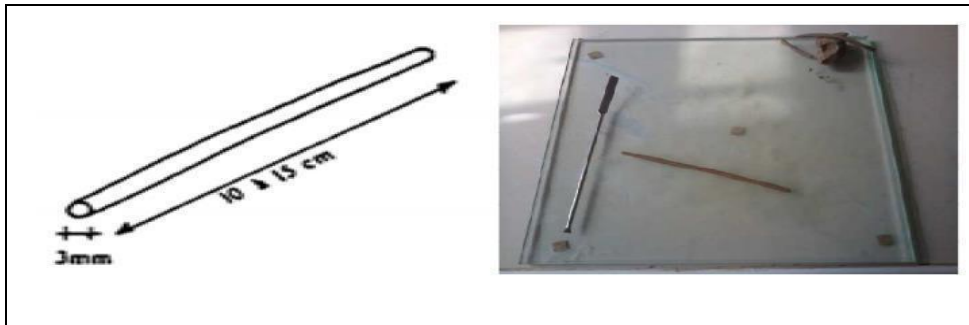


Figure IV.4: La confection du rouleau (Cheheb. F ,2016)

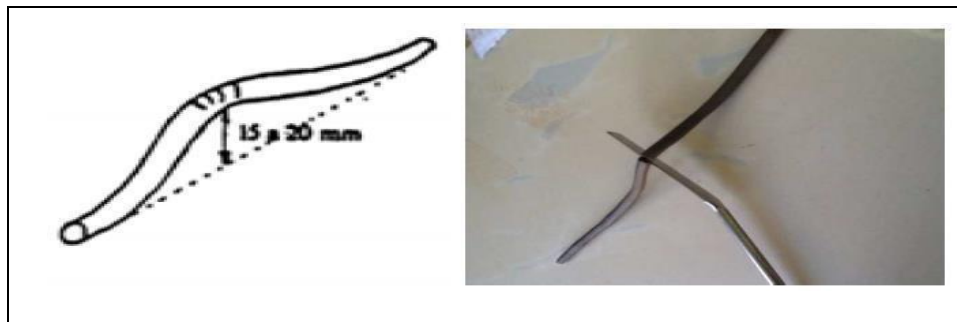


Figure IV.5 : La fissuration et brisure du rouleau (Cheheb. F ,2016).

c) L'indice de plasticité :

L'indice de plasticité mesure l'étendue du domaine de plasticité du sol. Il a un intérêt tout à fait fondamental. Il est exprimé par la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité.

$$IP = w_L - w_P \quad (IV.10)$$

d) L'indice de consistance :

De ces valeurs, l'indice de consistance I_c peut être déterminé, qui permet d'apprécier la consistance des sols plastiques en se référant aux plages de valeurs présentées ci-dessous. Il est déterminé par la formule suivante :

$$I_c = (W_L - W) / I_p \quad (IV.11)$$

Tableau IV.3 : L'indice de consistance.

Ic	Appréciation
0 - 0,25	Pâteux
0,25 - 0,50	Mou
0,5 - 0,75	Ferme
0,75 - 1	Mi dur
>1	Dur

IV. Valeur au bleu de méthylène (VBS) (NF P 94 – 068) – Essai à la tâche

Cet essai permet de mesurer la quantité et l'activité de la fraction argileuse contenue dans le sol. L'essai s'effectue sur 70 g de matériau trempé dans 0,5 L de l'eau distillée et maintenus en permanence sous agitation.

L'essai consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par l'échantillon de sol testé. Plus la fraction argileuse est importante plus elle adsorbe du bleu de méthylène.

Le test permet de repérer l'instant de la saturation au bleu des particules d'argile. On prélève une goutte de liquide contenant le sol imbibé de bleu, que l'on dépose sur un papier filtre spécial.

Si la goutte centrale bleu est entouré d'une zone humide incolore le test est négatif, on continue alors le dosage au bleu.

Si le test est positif, la zone humide est teintée de bleu c'est-à-dire on arrête le dosage.

La valeur de bleu de sol est donnée par la relation suivante :

$$VBS = \frac{Mb}{Ms} \times 100 \quad (IV.11)$$

Avec:

$$Mb = V \times 100 \quad (IV.12)$$



Figure IV.6 : Matériel d'essai au bleu de méthylène (résultats de l'essai à la tâche).

Avec :

M_b : la masse de bleu permettant la saturation par adsorption (g) ;

M_s : la masse sèche de la prise d'essai (g) ;

V : le volume de solution de bleu utilisée (cm^3).

Tableau IV.4 : Désignation du sol en fonction de son VBS.

VBS (en grammes de bleu pour 100g de sol)	Désignation du sol
$VBS \leq 0,2$	Sol sableux
$0,2 < VBS \leq 2,5$	Sol limoneux
$2,5 < VBS \leq 6$	Sol limoneux - argileux
$6 < VBS \leq 8$	Sol argileux
$VBS > 8$	Sol très argileux

Tableau IV.5 : Résultats des valeurs au bleu de méthylène.

Sites	VBS	Désignation du sol
Azazga (bouzeguene)	10	Sol très argileux
Azazga (Handou)	10	Sol très argileux
Azeffoun	4	Sol limoneux-argileux
Sud-Ouest	7,33	Sol argileux
Sidi Naamane	10	Sol très argileux

- Interprétation des résultats**

Les valeurs obtenues au bleu de méthylène (Tableau IV.5) montrent que les trois sites Azazga (Bouzegane), Azazga (Handou) et Sidi-Naamane sont des sols très argileux. Tandis

que le site d'Azeffoun présente un sol limoneux- argileux, par contre le site de Sud-Ouest c'est un sol argileux.

Remarque :

Les résultats des différents essais d'identifications réalisés aux laboratoires sont résumés sous forme d'un tableau suivant (Tableau IV.6) :

Tableau IV.6 : Les résultats des différents essais d'identifications.

Site	W %	ρ_s (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_h (g/cm ³)	e	Sr %	Ip%	Ic	AC	VBS	WL %
Azazga (Bouzequene)	27.96	2.8	1.55	1.98	0.806	97.07	23.21	0.89	1.41	10	69.87
Appréciation	Moyenne	/	faible	humide	Moins compacte	humide	Peu plastique	Mi Dur	actif	Très argileux	/
Aazazga (Handou)	26.58	2.31	1.40	1.84	0.65	94.46	22	0.97	0.632	10	48
Appréciation	Moyenne	/	faible	humide	Moins compacte	détrempé	Peu plastique	Mi Dur	Moyennement actif	Très argileux	/
Azeffoun	20.17	2.50	1.72	2.04	0.511	98.55	32.31	0.92	0.604	4	50.17
Appréciation	Moyenne	/	Moyenne	humide	Moins compacte	détrempé	Très plastique	Mi Dur	Moyennement actif	Limoneux argileux	/
Sude-ouest	18.56	2.80	1.72	2.02	0.627	82.76	23	1.32	1.191	7.33	49
Appréciation	Moyenne	/	Moyenne	humide	Moins compacte	détrempé	Peu plastique	Dur	Faiblement actif	argileux	/
Sidi Naamane	18.5	2.85	1.75	2.07	0.628	83.88	20	1.32	0.593	10	45
Appréciation	Moyenne	/	Moyenne	humide	Moins compacte	détrempé	Peu plastique	Dur	Moyennement actif	Très argileux	/

Après les essais physiques réalisée, on constate que les échantillons relevés sont des sols très argileux, c'est la raison d'avoir un potentiel de gonflement moyen et un potentiel de retrait élevé, son comportement plastique mi dur est conditionné que le sol est compacté (l'indice

des vides est faible) et partiellement saturé avec une teneur en eau moyenne. Pour l'échantillon de sud-ouest : c'est un sol limoneux-argileux, son potentiel de gonflement est faible et un potentiel de retrait moyenne.

V. L'analyse chimique :

Tableau IV.7 : Analyse chimiques du sol.

Minéraux	Composition chimique en %			
	Sud-Ouest	Azazga (Handou)	Sidi Namane	Azazga (Bouzeguene)
Calcite C_aCO_3	5.30	/	18.50	/
Chlorures cl^-	0.23	0.106	0.23	/
Sulfates SO_4^{2-}	Néant	Trace	Traces/néant	2700
Carbonates	/	Trace	/	5.09
ph	/	/	/	7.93

Les résultats obtenus de l'analyse chimique (Tableau IV.7), montrent que toutes les argiles étudiées contiennent presque le même type de minéraux, mais il y a une différence entre leurs pourcentages. Ceci peut en conséquence avoir un effet non négligeable sur leur comportement mécanique.

VI. Conclusion

Les résultats des essais d'identification réalisés au laboratoire pour les échantillons étudiés, ont permis d'avoir une idée sur leurs natures physiques.

chapitre

v

Chapitre V : Etude des effets climatiques au laboratoire

I. 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 granulaires se dégradent sous l'effet de différents processus d'altération. Dans ce chapitre on s'intéresse aux effets climatiques et à leur influence sur le comportement du sol étudié. Pour cela on tient à représenter l'effet de la nature par les deux essais suivants :

- Dégradabilité
- Canicules

II. préparation des échantillons

Les échantillons étudiés sont intacts, le dispositif utilisé pour la préparation des échantillons est l'anneau de l'appareil de l'essai œdométrique, et la (Figure V.1) montre les différentes étapes.

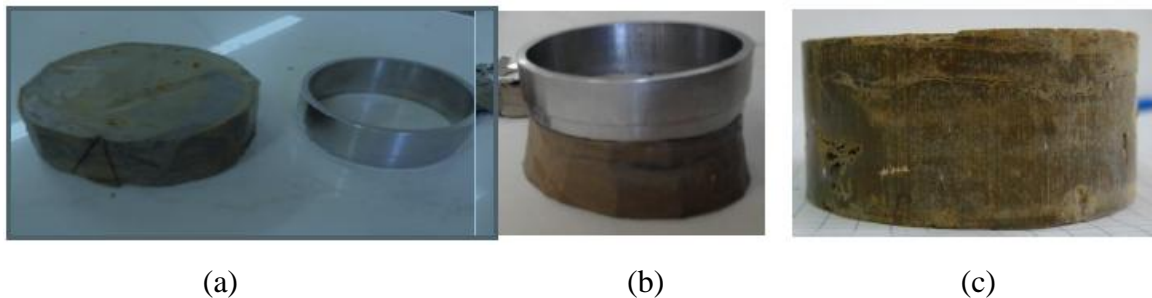


Figure V.1 : Préparations des échantillons.

III. Essai de dégradabilité (norme NF P 94-067)

III.1 But d'essai :

L'essai de dégradabilité permet d'apprécier les potentialités d'un matériau à évoluer après sa mise en œuvre sous l'action des cycles immersion-séchage (cycles climatiques). Le matériau est ensuite soumis à quatre cycles d'immersion-séchage, en débutant par le séchage puis l'immersion : 8 heures de séchage et 16 heures d'immersion (suivant la norme P94-067).

III.2 Appareillage et matériel d'essai

- Les éléments constituant l'appareillage sont :
- Etuve réglable (60°C) ;

- Balance de précision à $\pm 0,1$ gr ;
- Une seringue ;
- Bacs métalliques.



Figure V .2 : L'étuve.

III.3 Déroulement d'essai

Préparer les échantillons.

Mesurer les masses des échantillons avant l'essai.

Imbiber les échantillons pendant 8h ; la quantité d'eau ajouter est alternative comme une pluie avec une seringue.

Etuvage pendant 16h.

Suivre la réalisation de quatre cycles d'imbibition/séchage pendant 4 jours.

Tableau V.1 : Procédure de mouillage des échantillons.

Les parties	La quantité d'ajout d'eau	Heure
Partie 1	10 ml	9.00
Partie 2	5 ml	10.30
Partie 3	10 ml	12.00
Partie 4	5 ml	13.30
Partie 5	10 ml	15.00
Partie 6	-	16.30
La somme	40 ml	8h



Figure V.3 : Mouillage des échantillons à l'aide d'une seringue.

IV. Les différents images obtenues au cours de cet essai



Figure V.4 : Echantillon Azazga (Bouzequene) avant essai.



Figure V.5 : Echantillon Azazga (Hendou) avant essai.



Figure V.6 : Echantillon Azeffoun avant essai.



Figure V.7: Echantillon Sud-Ouest avant essai



Figure V.8 : Echantillon Sidi Naamane avant essai.

IV.1 Les différents images obtenues après l'essai



Figure V.9 : Echantillon Azazga (Bouzeguene) après 1^{er} cycle.



Figure V.10 : Echantillon Azazga (Hendou) 1^{er} cycle.



Figure V.11 : Echantillon Azeffoun après 1^{er} cycle.



Figure V.12 : Echantillon Sud-Ouest après 1^{er} cycle.



Figure V.13 : Echantillon Sidi Naamane après 1^{er} cycle.



Figure V.14 : Echantillon Azazga (Bouzeguene) après 2^{ème} cycle.



Figure V.15 : Echantillon Azazga (Hendou) après 2^{ème} cycle.



Figure V.16 : Echantillon Azeffoun après 2^{ème} cycle.



Figure V.17 : Echantillon Sud-ouest après 2^{ème} cycle.



Figure V.18 : Echantillon Sidi Naamane après 2^{ème} cycle.



Figure V.19 : Echantillon Azazga (Bouzeguene) après 3^{ème} cycle.



Figure V.20 : Echantillon Azazga (Handou) après 3^{ème} cycle.



Figure V.21 : Echantillon Azeffoun après 3^{ème} cycle.



Figure V.22 : Echantillon Sud-ouest après 3^{ème} cycle.



Figure V.23 : Echantillon Sidi Naamane après 3^{ème} cycle.



Figure V.24 : Echantillon Azazga (Bouzeguene) après 4^{ème} cycle.



Figure V.25 : Echantillon Azazga (Hendou) après 4^{ème} cycle.



Figure V.26 : Echantillon Azeffoun après 4^{ème} cycle.



Figure V.27 : Echantillon Sud- ouest après 4^{ème} cycle.



Figure V.28 : Echantillon Sidi Naamane après 4^{ème} cycle.

IV.2 Les résultats obtenus :

Tableau V.2 : Les masses des échantillons avant et après l'essai.

Site	Etat naturel	1 ^{er} cycle	2 ^{ème} cycle	3 ^{ème} cycle	4 ^{ème} cycle
Azazga (Bouzeguene)	155,70	133,70	135,40	133,00	131,70
Azazga (Hendou)	151,30	129,80	128,50	128,40	126,40
Sud-ouest	156,20	132,70	132,50	132,10	130,00
Sidi Naamane	176,70	150,90	150,60	149,30	147,80
Azefoun	169,40	149,80	149,60	149,00	148,20

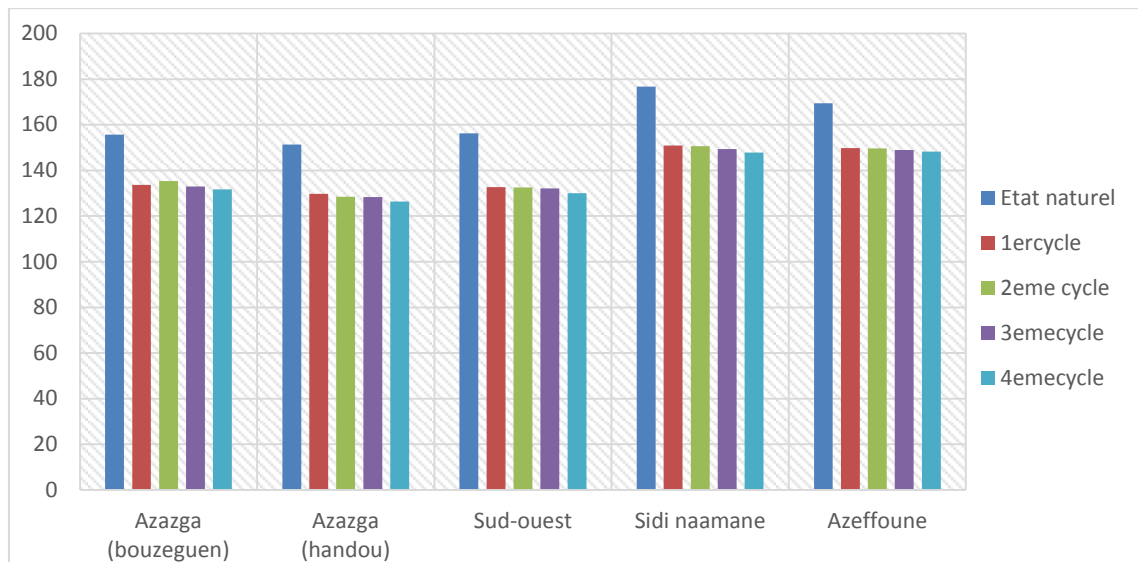


Figure V.29 : Variation des masses des échantillons durant l'essai.

- **Interprétation des résultats :**

L'étude est réalisée sur des échantillons d'argile intacts de cinq sites différents, le principe de l'essai consiste à exposer alternativement les échantillons aux cycles de séchage-émergence.

L'évolution de leur état est suivie au cours des cycles de séchage-émergence, par une prise de photos à la fin de chaque cycle.

À partir des résultats obtenus au cours de l'essai de dégradabilité on voit bien la différence entre les images prises avant, pendant et après chaque cycle (Figure V4...V28), les observations ont montré une diminution de la masse (Figure V.29), ainsi qu'un réarrangement de la texture surfacique, les fissures commencent à s'ouvrir, elles réapparaissent à chaque phase de séchage, dans les deux plans verticale et horizontale, comme on remarque aussi des ouvertures augmentent après chaque cycle de séchage.

V. Essai de Canicules

V.1 Principe d'essai

Après avoir imbibé les échantillons à la température ambiante pendant 72 heures (3 Jours) jusqu'à saturation, et les séchés à l'étuve à 65 °C jusqu'à masse constante. Ils sont soumis à 10 cycles climatiques de canicules. Chaque cycle prend 24 heures et comporte une élévation de température à 57 °C pendant 10 heures (jour) et une diminution à une température de 20 °C pendant 14 heures (nuit). On étudie les sols après chaque cycle et on calcule le changement de leur dimension fractale.

V.2 Déroulement de l'essai :

- 1) Imbiber les échantillons dans l'eau distillée à une température de 20°C pendant 3 jours.
- 2) Les échantillons sont mis à l'étuve jusqu'à masse constante.
- 3) Un cycle prend 24h et il est réalisé comme suit : on augmente la température de l'étuve de 0°C à 57°C pendant 10h, après on fait diminuer la température de 57°C à 20°C pendant 14h, on la répète pendant 10 jours.

V.3 Les images retenues des échantillons :**Site 1:** Azazga (Bouzeguene).

Echantillon à l'état naturel



Surface H

Surface V

Echantillons après étuve



Surface H

Surface V

Echantillon après 10 cycles



Surface V

Surface H

Figure V.30 : Images de l'échantillon de Azazga (Bouzeguene)

2) Site : Azazga (Hendou)

Echantillon à l'état naturel



Surface H

Surface V

Echantillon après étuve



Surface V

Surface H

Echantillon après 10 cycles



Surface H

Surface V

Figure V.31 : Images de l'échantillon de site Azazga (Hendou)

3) Site : Azeffoun

Echantillon à l'état naturel



Surface H

Surface V

Echantillon après étuve



Surface H

Surface V

Echantillon après 10 cycle



Surface H

Surface V

Figure V.32 : Images de l'échantillon de site Azeffoun.

4) Site : Sud-Ouest

Echantillon à l'état naturel



Surface V

Surface H

Echantillon après étuve



Surface H

Surface V

Echantillon après 10 cycles



Surface H

Surface V

Figure V.33 : Images de l'échantillon de site sud-ouest.

4) Site : Sidi Naamane

Echantillon à l'état naturel



Surface H

Surface

Echantillon après étuve



Surface H

Surface V

Echantillon après 10 cycles



Surface H

surface V

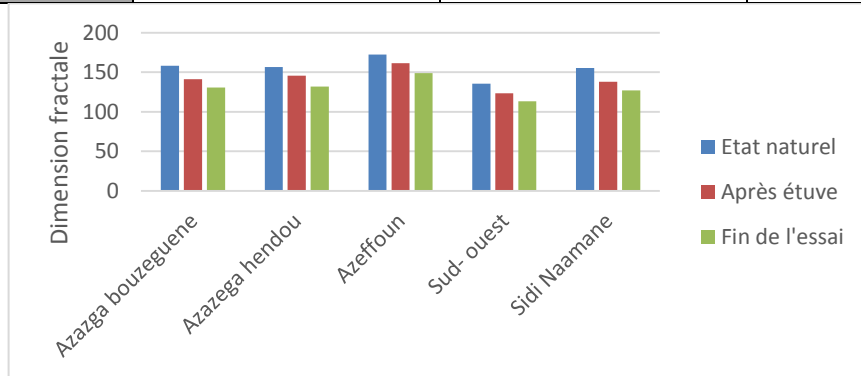
Figure V.34 : Images de l'échantillon de site Sidi Naamane.

V.4 : Résultats obtenus :

Les résultats relevés avant l'essai (à l'état naturel) et après chaque cycle de mouillage-séchage, sont présentés ci-dessous.

Tableau V.3 : Variation de la masse des échantillons pendant l’essai de canicules.

Echantillon (g)	Etat naturel (g)	Après étuve (g)	Fin de l’essai (g)
Azazga (Bouzeguene)	158,14	141,20	130,80
Azazga (hendou)	156,40	145,70	131,80
Azeffoune	172,50	161,40	148,80
Sud-Ouest	135,50	123,30	113,10
Sidi Naamane	155,50	137,8	127,00



FigureV.35 : Variation des masses bondant l’essai.

V.5 : Interprétation des résultats

Les résultats ont montré que les masses des échantillons diminuent après chaque étape de l’essai aux canicules, c’est dû au phénomène de retrait-gonflement, qui a un rôle très important pour ces pertes.

Conclusion

Ce chapitre a représenté les essais de sollicitations saisonnières cycliques sur les échantillons étudiés ; les effets de retrait-gonflement, les fissures et même le changement de la texture et la structure des échantillons, qui ont progressé pendant le déroulement des essais. La présence des minéraux a joué un rôle très important dans le changement de comportement des échantillons.

Dans le chapitre suivant, on va confirmer les résultats obtenus après les essais au laboratoire avec l’étude de la variation de leurs dimensions fractales avec un programme implémenté par le logiciel MATLAB.

chapitre VI

Chapitre VI: Résultats du calcul de la dimension fractale en 2D

I. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats des différentes mesures de la dimension fractale qui fait pour les cinq matériaux (argile pour cinq sites différents).

La dimension fractale a été calculée avant et après chaque essai, par application de la méthode de Box Counting détaillée dans le chapitre III.

II. Application de la méthode de Box Counting

Avec cette méthode, la dimension fractale calculée est appelée Dimension Fractale de Rugosité (DF_R), elle dépend des paramètres suivants :

- La forme et la taille de l'échantillon étudié ;
- L'échelle de mesure, plus l'échelle est grande, plus on aura une dimension fractale très précise ;
- La façade choisie de l'échantillon pour la prise d'image ;
- La qualité de l'image prise (nombre de pixels).

Pour calculer la dimension fractale de rugosité des sols de différents échantillons étudiés avec la méthode de Box Counting, avant et après les essais réalisés ; un appareil photographique de bonne résolution a été utilisé afin d'avoir une meilleure analyse des surfaces des sols. Pour faciliter les calculs de DF_R , le logiciel MATLAB R2010b a été utilisé. En diminuant de plus en plus le nombre de pixels de la boîte de calcul, on se rapproche au fur et à mesure de la surface réelle du sol. La méthode de Box Counting est définie dans le chapitre III.

Un exemple du calcul est représenté ci-dessous (Figure V.1), un échantillon d'argile de forme cylindrique, de $\varnothing = 63.4\text{mm}$.

Les résultats obtenus sur la dimension fractale de rugosité, des échantillons des sols étudiés par la méthode de Box Counting, dépendent du mode de sollicitations qu'ils subissent.

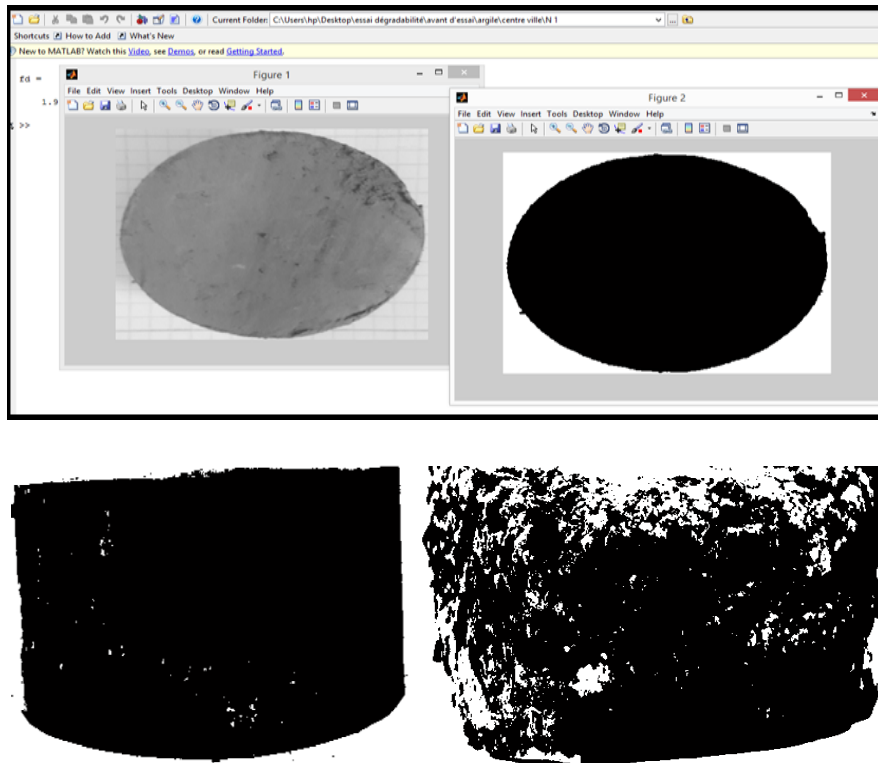


Figure VI.1 : Exemple du calcul DF_R par le logiciel MATLAB R2010b.

III. Résultats et interprétations

❖ Résultats de l'essai de dégradabilité

Les résultats obtenus sur la dimension fractale de rugosité, des échantillons des sols étudiés par la méthode de Box Counting, dépendent du mode de sollicitations qu'ils subissent.

Tableau VI.1 : Résultats du calcul de la dimension fractale des échantillons d'Azazga (Bouzuene).

	Échantillon de Azazga (Bouzuene)	
	Surface H	Surface V
État naturel	1.8705	1.7824
1 ^{er} cycle	1.3444	1.8888
2 ^{eme} cycle	1.5627	1.8869
3 ^{eme} cycle	1.7040	1.8248
4 ^{eme} cycle	1.8024	1.6914

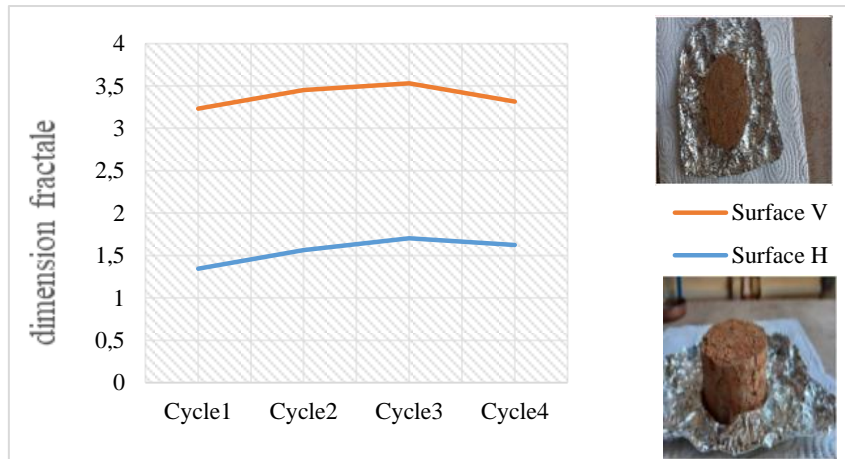


Figure VI. 2 : Variation de la dimension en fonction des étapes de l’essai pour les échantillons d’Azazga (Bouzegane).

Tableau VI.2 : Résultats du calcul de la dimension fractale des échantillons d’Azazga (Hendou).

	Échantillon d’Azazga (Hendou)	
	Surface H	Surface V
État naturel	1.7647	1.7499
1 ^{er} cycle	1.4006	1.7819
2 ^{eme} cycle	1.9165	1.7651
3 ^{eme} cycle	1.5106	1.8180
4 ^{eme} cycle	1.4864	1.8075

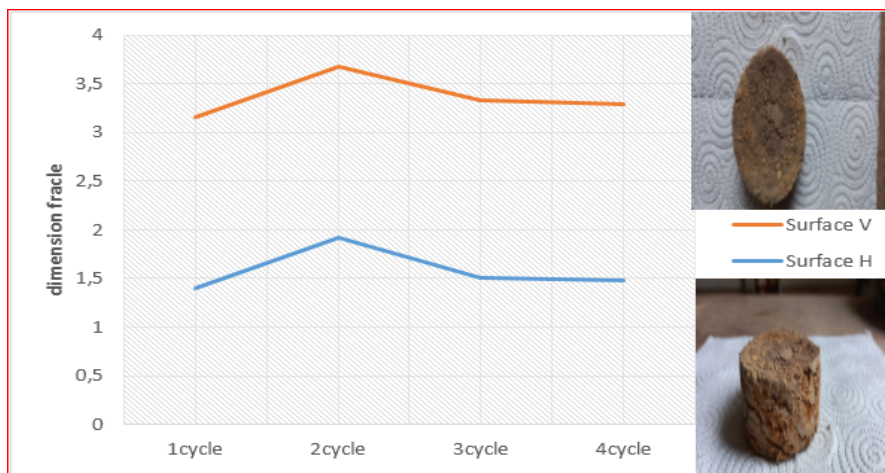


Figure VI. 3 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l’essai pour les échantillons d’Azazga (Hendou).

Tableau VI.3 : Résultats du calcul de la dimension fractale des échantillons d’Azeffoun

	Échantillon d’Azeffoun	
	Surface H	Surface V
État naturel	1.8358	1.8672
1 ^{er} cycle	1.5655	1.8066
2 ^{eme} cycle	1.4639	1.7756
3 ^{eme} cycle	1.8044	1.6166
4 ^{eme} cycle	1.8112	1.3582

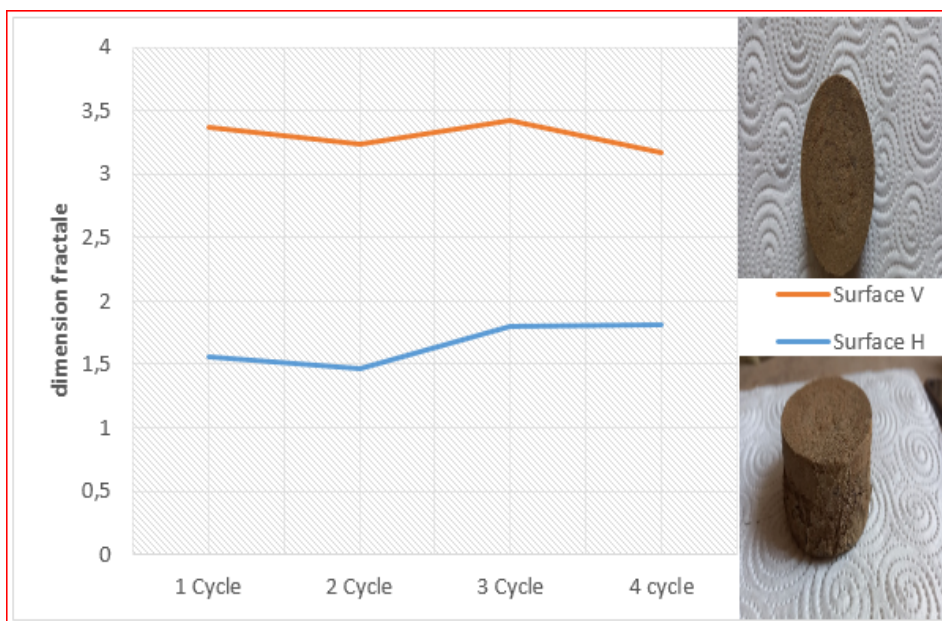


Figure VI. 4 : Variation de la dimension en fonction des étapes de l’essai pour les échantillons d’Azeffoun.

Tableau VI.4 : Résultats du calcul de la dimension fractale des échantillons de Sud-Ouest.

	Échantillon de Sud-Ouest	
	Surface H	Surface V
État naturel	1.8952	1.8036
1 ^{er} cycle	1.8896	1.8328
2 ^{eme} cycle	1.5113	1.8410
3 ^{eme} cycle	1.8958	1.7689
4 ^{eme} cycle	1.5890	1.7032

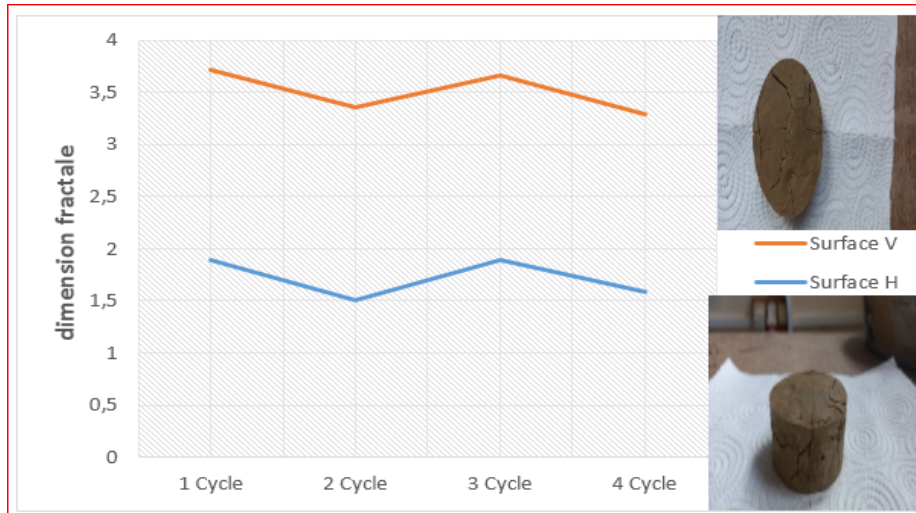


Figure VI. 5 : Variation de la dimension en fonction des étapes de l’essai pour les échantillons de Sud-Ouest.

Tableau VI.5 : Résultats du calcul de la dimension fractale des échantillons de Sidi Naamane.

	Échantillon de Sidi Naamane	
	Surface H	Surface V
État naturel	1.8375	1.9151
1 ^{er} cycle	1.8517	1.8288
2 ^{eme} cycle	1.4110	1.8444
3 ^{eme} cycle	1.8851	1.7629
4 ^{eme} cycle	1.8118	1.7903

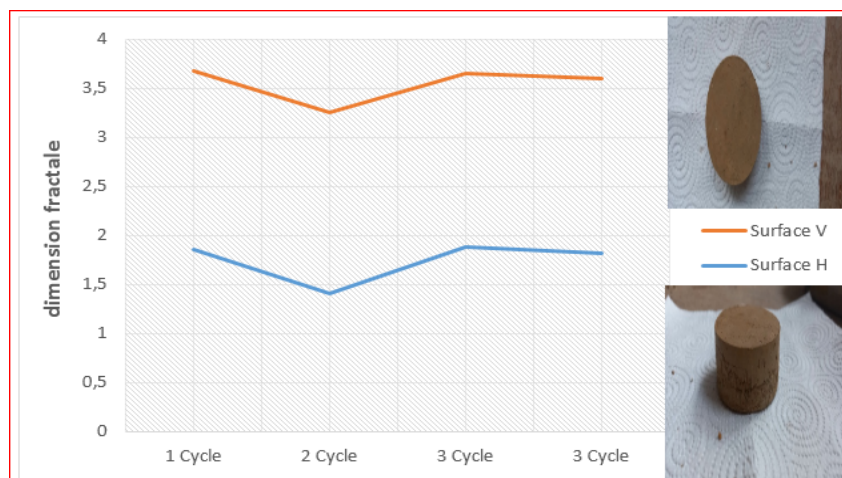


Figure VI.6 : Variation de la dimension en fonction des étapes de l’essai pour les échantillons de Sidi Naamane.

❖ Résultats de l'essai de Canicules

Tableau VI.6 : Résultats du calcul de la dimension fractale des échantillons d'Azazga (Bouzeguene)

Echantillon d'Azazga (Bouzeguene)		
	surface H	Surface V
État naturel	1.9232	1.9326
Après étuvage	1.8503	1.7822
Après 10 cycles	1.9435	1.7446

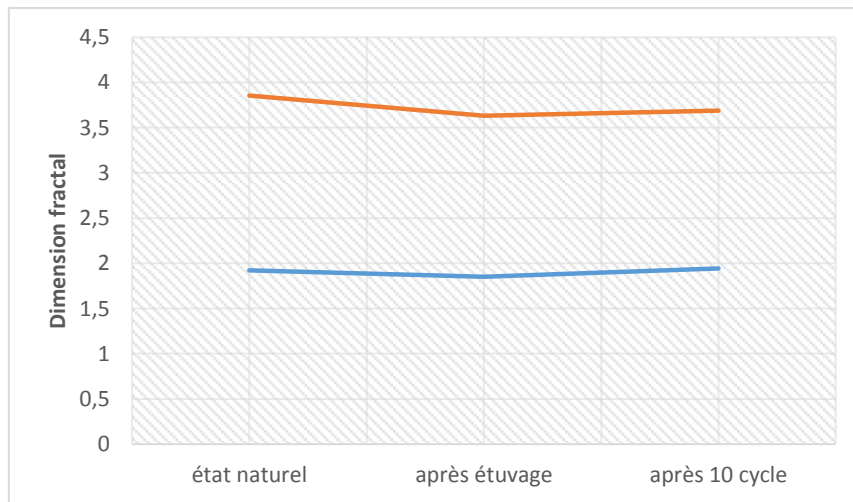


Figure VI. 7 : Variation de la dimension en fonction des étapes de l'essai pour les échantillons d'Azazga (Bouzeguene).

Tableau VI.7 : Résultats du calcul de la dimension fractale des échantillons d'Azazga (Hendou).

Echantillon d'Azazga (Hendou)		
	Surface H	Surface V
État naturel	1.7454	1.7407
Après Étuvage	1.5547	1.6857
Après 10 cycles	1.6617	1.8214

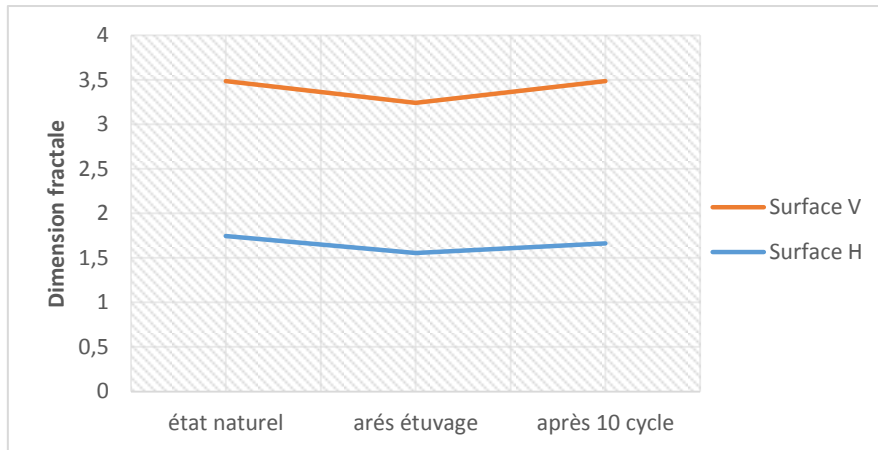


Figure VI.8 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l’essai pour les échantillons d’Azazga (Handou).

Tableau VI.8 : Résultats du calcul de la dimension fractale des échantillons d’Azeffoun.

Echantillon d’Azeffoun		
	Surface H	Surface V
État naturel	1.8381	1.8892
Après étuvage	1.8814	1.8253
Après 10 cycles	1.8110	1.7950

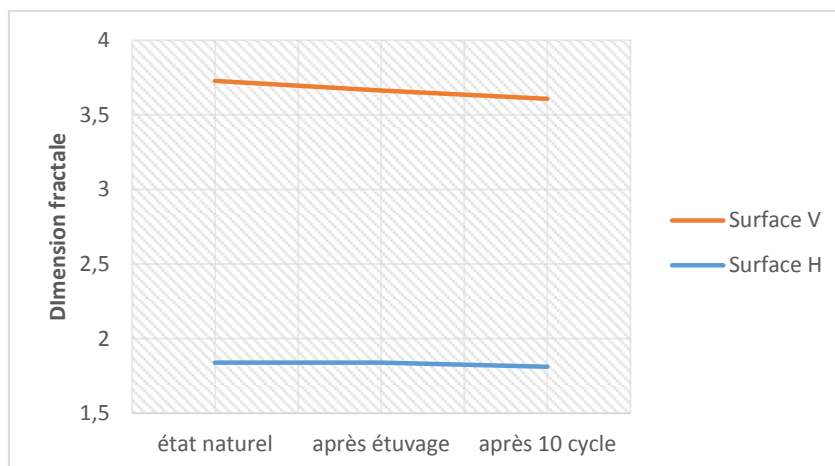


Figure VI.9: Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l’essai pour les échantillons d’Azeffoun.

Tableau VI.9 : Résultats du calcul de la dimension fractale des échantillons de Sud-Ouest.

Echantillon de Sud-Ouest		
	Surface H	Surface V
État naturel	1.8830	1.8508
Après étuvage	1.9058	1.7775
Après 10 cycles	1.9243	1.8429

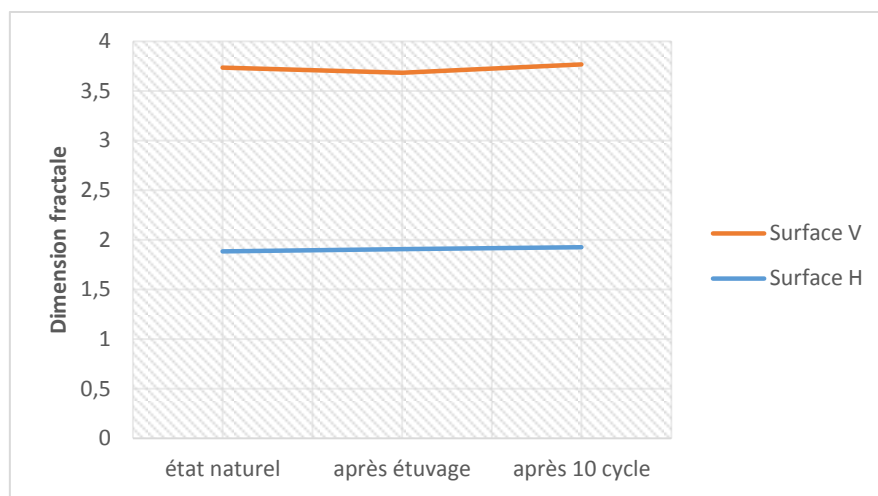


Figure VI.10: Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour les échantillons de Sud-Ouest.

Tableau VI.10 : Résultats du calcul de la dimension fractale des échantillons de Sidi Naamane.

Echantillon de Sidi Naamane		
	Surface H	Surface V
État naturel	1.8982	1.9066
Après étuvage	1.8731	1.8168
Après 10 cycles	1.8680	1.7053

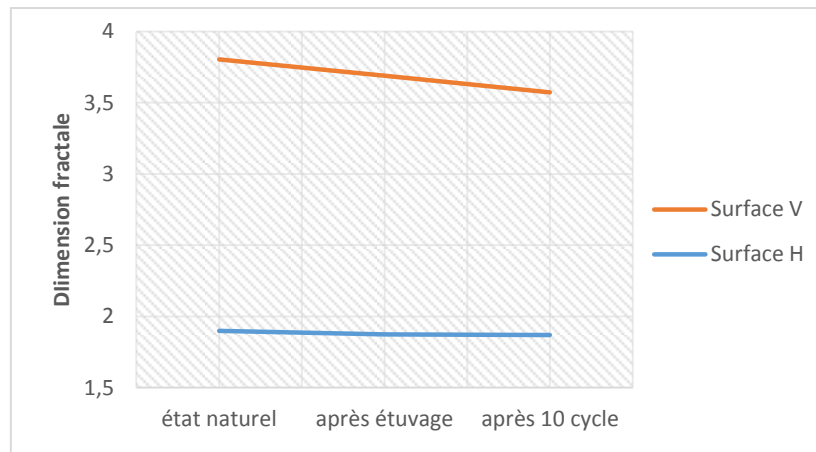


Figure VI.11 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour les échantillons de Sidi Naamane.

- **Interprétations des résultats**

Les figures (VI.2,...VI.11) montrent bien l'influence des cycles d'immersion-séchages sur les résultats du calcul de la dimension fractale DF_R , calculée avec la méthode de Box counting, qui diminue avec l'augmentation du nombre de cycles appliqués, durant les deux essais climatiques, à la fin de chaque essai la rugosité augmente par rapport à son état initial, les fissures et le changement d'état de la texture sont une cause de cette diminution de la DF_R calculée, On remarque aussi que la façon de diminution de la DF_R est différente d'un sol à un autre.

IV. Conclusion

La dimension fractale est un paramètre qui permet une meilleure précision dans la compréhension des changements engendrés par les différentes sollicitations et effets climatiques, elle est affectée par plusieurs paramètres, qui influent significativement sur le mode de rupture des sols, et aussi des routes, les quels conduisent à la diminution de DF_R .

Les résultats du calcul de la DF_R obtenus avec la méthode de **Box Counting** confirment les résultats vus durant les essais expérimentaux réalisés et présentés dans le chapitre précédent, ce que prouve son efficacité. Dans le chapitre suivant, une autre étude de la variation de leurs dimensions fractales en (3D) sera faite à l'aide de logiciels MATLAB.

chapitre VII

Chapitre VII : Résultats du calcul de la dimension fractale en 3D

I. Introduction

Dans ce chapitre on va présenter les calculs de la dimension fractale en 3D, et l'ensemble des valeurs obtenues est les résultats détaillés qu'ont été effectués avant et après chaque essai sur les mêmes images des échantillons sélectionnés pour la méthode 2D à l'aide du logiciel MATLAB R2010a.

II. Résultats et interprétations

❖ Résultats de l'essai de dégradabilité

Les résultats obtenus sur la dimension fractale DF en 3D, des échantillons des sols étudiés par la méthode de Différentiel Box Counting, dépendent du mode de sollicitations qu'ils subissent.

Tableau VII.1 : Résultats du calcul de la dimension fractale Azazga (Bouzeguene).

	Échantillon de Azazga(Bouzeguene)	
	Surface H	Surface V
État naturel	1.9485	1.9589
1 ^{er} cycle	2.0233	1.8972
2 ^{eme} cycle	1.9921	1.9547
3 ^{eme} cycle	2.0339	1.903
4 ^{eme} cycle	2.0299	1.8184

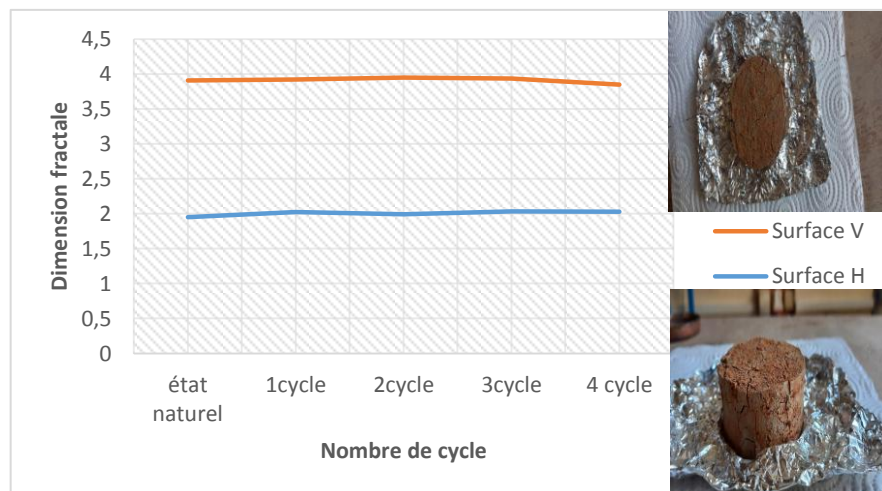


Figure VII.1 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de Azazga (Bouzeguene) en fonction des cycles de dégradabilité.

Tableau VII.2 : Résultats du calcul de la dimension fractale de Azazga (Hendou).

	Échantillon de Azazga(Hendou)	
	Surface H	Surface V
État naturel	1.9754	1.9246
1 ^{er} cycle	2.0163	1.8556
2 ^{eme} cycle	2.0535	1.971
3 ^{eme} cycle	2.0105	2.0122
4 ^{eme} cycle	2.0079	1.9961

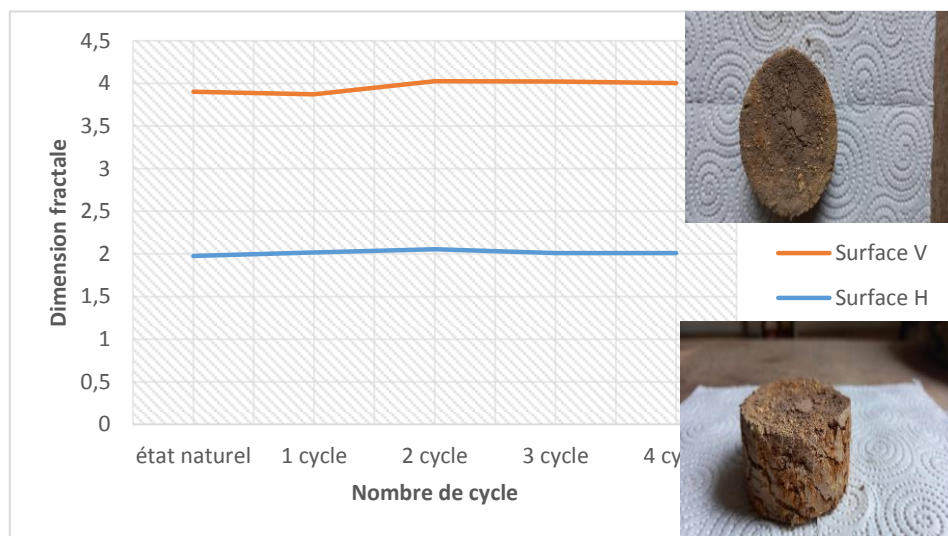


Figure VII.2 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de Azazga (Hendou) en fonction des cycles de dégradabilité.

Tableau VII.3 : Résultats du calcul de la dimension fractale de Azeffoun.

	Échantillon de azeffoun	
	Surface H	Surface V
État naturel	1.9778	2.0120
1 ^{er} cycle	1.984	2.0170
2 ^{eme} cycle	1.9744	1.9924
3 ^{eme} cycle	2.0180	1.9368
4 ^{eme} cycle	2.0516	1.975

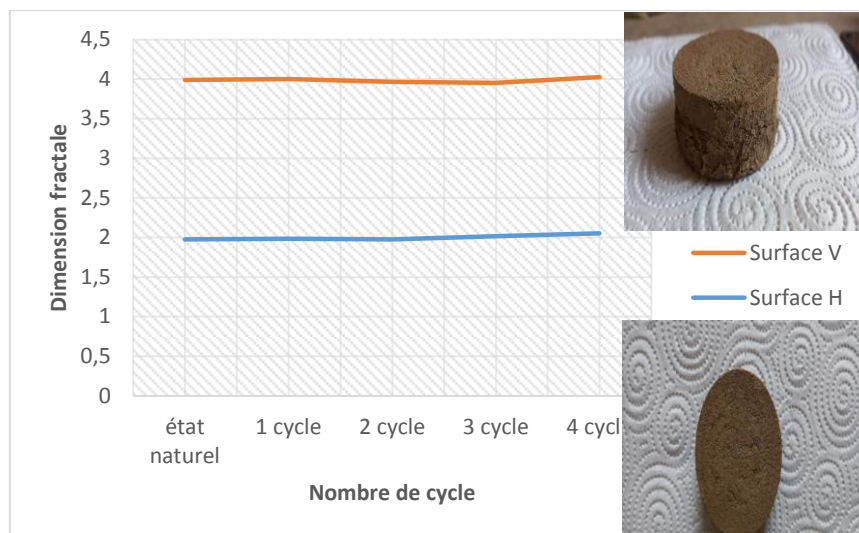


Figure VII.3 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon d'Azeffoun en fonction des cycles de dégradabilité.

Tableau VII.4 : Résultats du calcul de la dimension fractale de Sud-Ouest.

	Échantillon de Sud-ouest	
	Surface H	Surface V
État naturel	1.9637	2.0025
1 ^{er} cycle	2.0080	1.9574
2 ^{ème} cycle	2.0505	2.0014
3 ^{ème} cycle	2.0182	1.9507
4 ^{ème} cycle	2.0163	1.8366

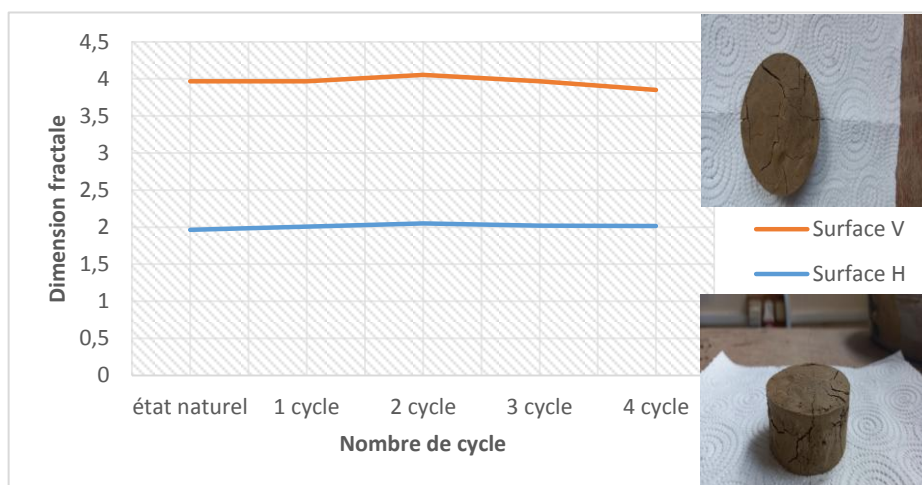


Figure VII.4 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de Sud-Ouest en fonction des cycles de dégradabilité.

Tableau VII.5 : Résultats du calcul de la dimension fractale de sidi Naamane.

	Échantillon de Sidi Naamane	
	Surface H	Surface V
État naturel	1.9921	2.0046
1 ^{er} cycle	1.9779	2.0376
2 ^{eme} cycle	2.0205	2.0201
3 ^{eme} cycle	1.9211	2.0204
4 ^{eme} cycle	1.9974	1.8761

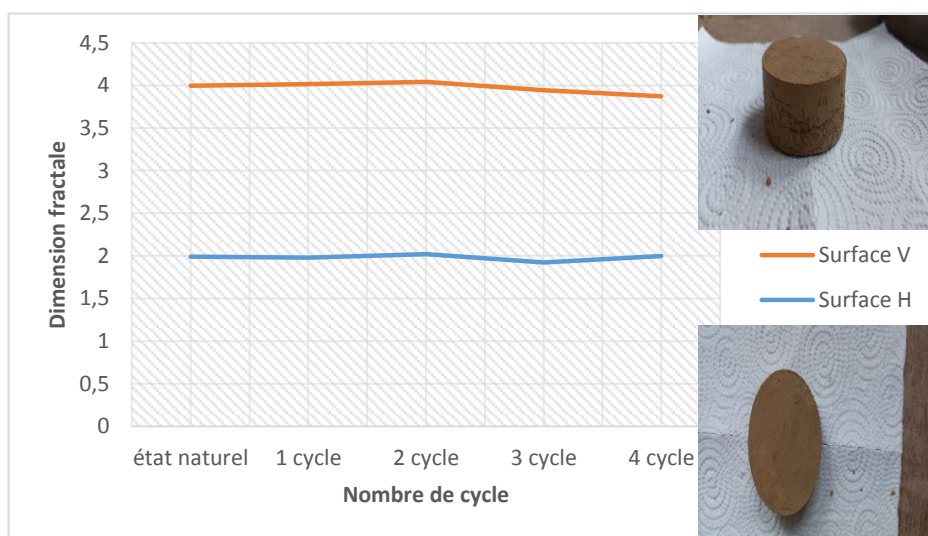


Figure VII.5 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de Sidi Naamane en fonction des cycles de dégradabilité.

❖ Résultats de l'essai de Canicules

Tableau VII.6 : Résultats du calcul de la dimension fractale d'Azazga (Bouzegane).

Echantillon d'Azazga(Bouzeguene)		
	Surface H	Surface V
État naturel	2.0026	1.9955
Après étuvage	1.9956	1.9361
Après 10 cycles	2.0231	2.0061

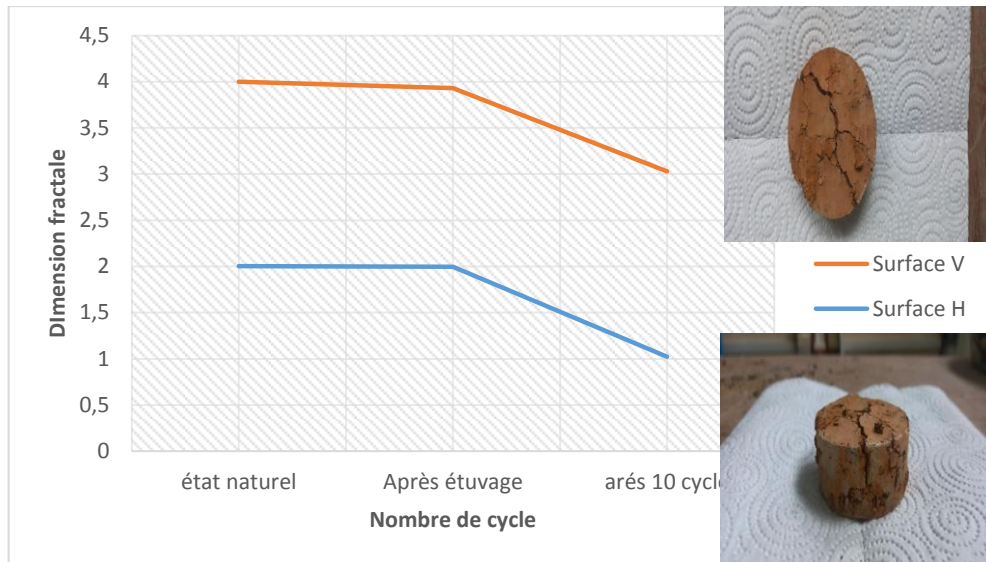


Figure VII.6 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon d'Azazga (Bouzeuene) en fonction des cycles de canicule.

Tableau VII.7 : Résultats du calcul de la dimension fractale d'Azazga (Hendou).

Echantillon d'Azazga(Hendou)		
	Surface H	Surface V
État naturel	1.9481	1.9925
Après étuvage	1.9595	1.9752
Après 10 cycles	2.0686	1.9745

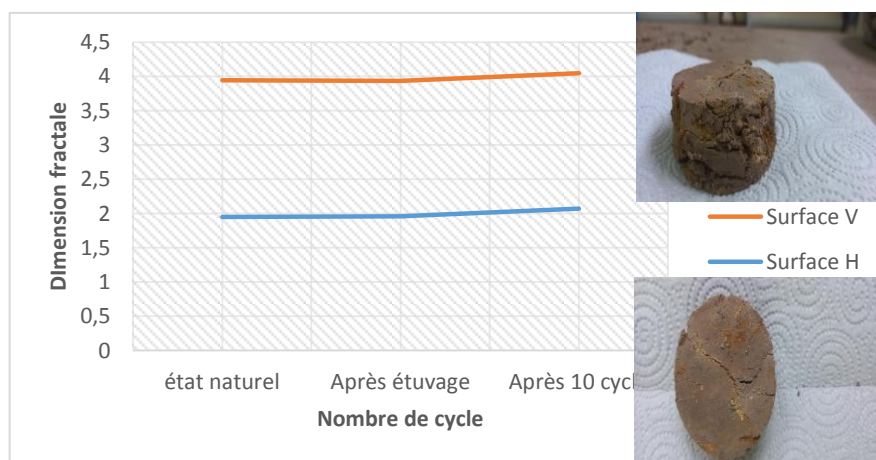


Figure VII.7 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon d'Azazga (Hendou) en fonction des cycles de canicule.

Tableau VII.8 : Résultats du calcul de la dimension fractale d’Azeffoun

Echantillon d’Azeffoun		
	Surface H	Surface V
État naturel	1.9436	1.9205
Après étuvage	2.0073	1.9858
Après 10 cycles	2.0260	1.988

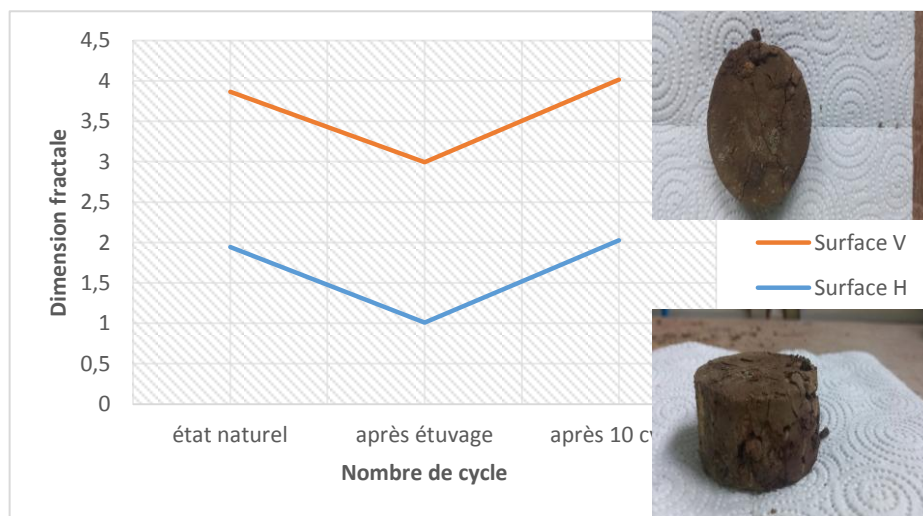


Figure VII.8 : Variation de la dimension fractale de l’échantillon de Azeffoun en fonction des cycles de canicule.

Tableau VII.9 : Résultats du calcul de la dimension fractale de Sud-Ouest.

Echantillon de Sud-ouest		
	Surface H	Surface V
État naturel	2.0131	2.0188
Après étuvage	1.9776	1.9863
Après 10 cycles	2.0046	2.0451

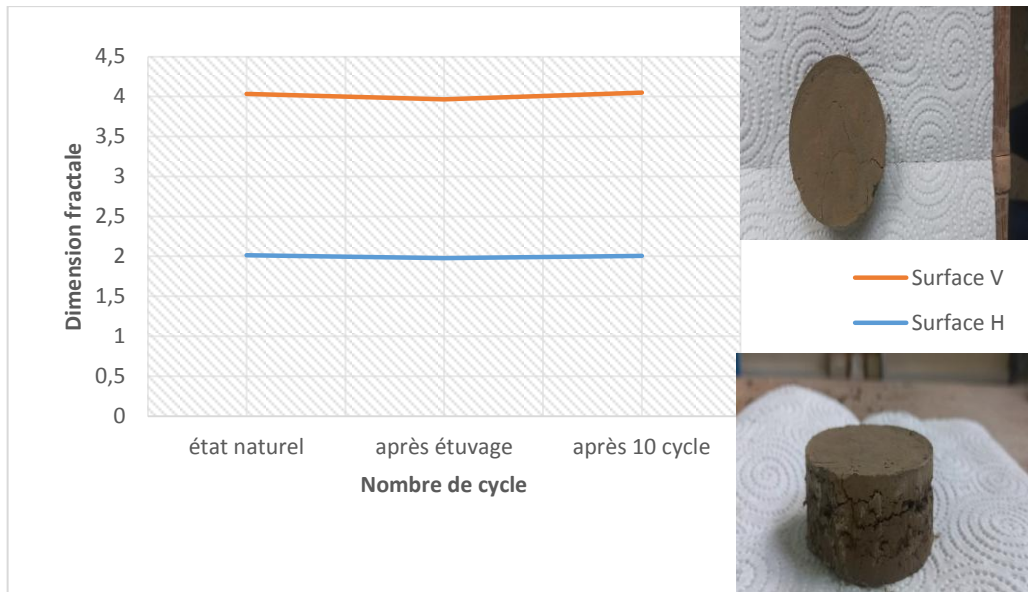


Figure VII.9 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de Sud-Ouest en fonction des cycles de canicule.

Tableau VII.10 : Résultats du calcul de la dimension fractale de Sidi Naamane.

Echantillon de Sidi Naamane		
	Surface H	Surface V
État naturel	1.9482	1.9389
Après étuvage	2.0011	1.9613
Après 10 cycles	2.0051	1.9761

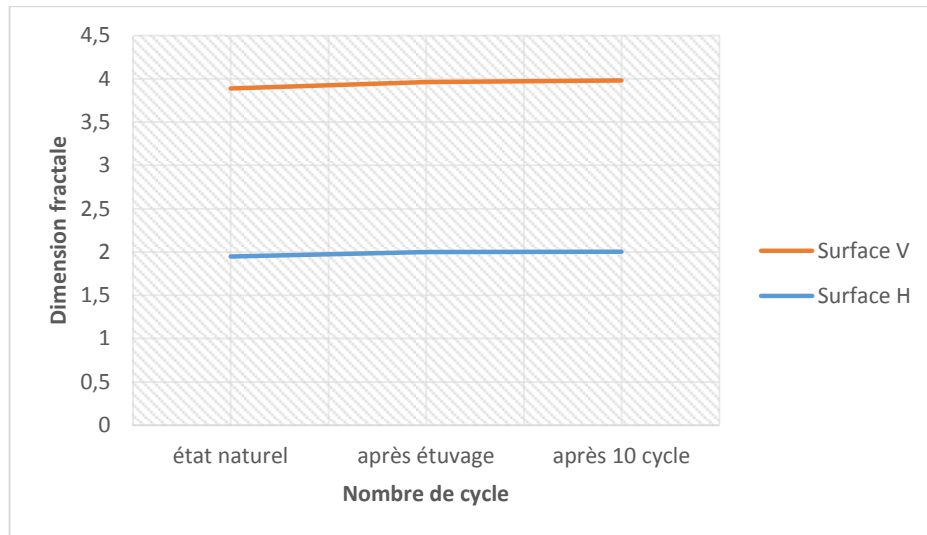


Figure VII.10: Variation de la dimension fractale de l'échantillon de Sidi Naamane en fonction des cycles de canicule.

Interprétation des résultats :

Les figures des échantillons présentées ci-dessus ne varient pas linéairement ; elles présentent des pentes différentes, selon le mode et l'étape de l'essai. La valeur maximale et minimale de la dimension fractale varie d'un échantillon à un autre.

La façon de la variation de la DF est différente d'un sol à un autre durant les deux essais :

- 1) L'essai de dégradabilité (les figure VII.1...VII.5 et les tableaux VII.1...VII.5) ; une variation numérique non linéaire a été observée pour tous les échantillons après les cyclés de dégradabilité que ce soit pour les surfaces horizontales ou verticales.
- 2) L'essai de canicule ; les valeurs de DF_R ont marqué une augmentation rapide au début suivie par une diminution subite (les figure VII.6...VII.10 et les tableaux VII.6...VII.10).

III. Conclusion

La méthode de différentiel Box Counting programmée avec le logiciel MATLAB est une bonne méthode de calcul de DF en (3D). Cette dimension est l'une des caractéristiques principales de la géométrie fractale.

L'étude du comportement des matériaux a permis d'évaluer le paramètre dimension fractale en fonction de plusieurs paramètres.

Conclusion générale

Le travail réalisé consiste à une caractérisation climatologique et géotechnique de quelques argiles de Tizi-Ouzou et l'estimation de leur potentiel de gonflement, et une analyse de la cinétique du gonflement et des essais cycliques de séchage - humidification.

Dans cette étude, on a pu explorer la relation entre le climat et le sol et comprendre mieux les influences climatiques sur le sol étudié, on a trouvé les résultats du calcul de la dimension fractale grâce au logiciel MATLAB.

Les essais ont été réalisés sur des échantillons de nature argileuse, prélevés de 5 sites situés à la wilaya de Tizi-Ouzou ; Azazaga (Bouzeguene) ; Azazga (Hendou) ; Azeffoun ; Sud-Ouest et Sidi Namanne.

De cette étude on peut constater que :

- Le climat a un rôle important sur le changement de la texture, du volume et même des paramètres physiques des sols, les argiles sont classées parmi les sols les plus influencés par les changements climatiques.
- Le comportement des sols argileux sous l'effet des cycles climatiques avec toutes leurs caractéristiques provoque plusieurs influences sur les sols argileux parmi ses influences le phénomène de retrait-gonflement et les fissurations.
- La présence des minéraux sensibles à l'eau a une influence sur le changement du sol (gonflement-retrait).
- Le cycle émergence-séchage a des brusques changements sur les échantillons, qui ont un potentiel de retrait-gonflement élevé et un comportement plastique.
- Les changements cycliques du climat peuvent provoquer des dégâts dans les terrains constitués des sols très argileux (glissement, effondrement, tassement...).
- Le calcul de la dimension fractal par le logiciel MATLAB a montré que les sols se dégradent à chaque cycle des expériences réalisées.
- L'analyse de la dimension fractale d'une image semble être véritablement un outil puissant pour comparer les caractéristiques intrinsèques des sols liées à leur fragmentation et à leur

rugosité. Les algorithmes donnent donc une estimation satisfaisante de la dimension fractale des sols.

Les changements climatiques et la circulation des eaux en surface et en profondeur ont engendré le retrait-gonflement des argiles et l'érosion de leur couche superficielle. Ce qui affectent une grande surface où beaucoup d'ouvrages sont endommagés. Dans l'avenir, il faut prendre des précautions pour ces influences avec des techniques d'améliorations du sol et des méthodes estimatives avec une étude plus poussée des paramètres moteurs du gonflement.

Références bibliographiques

Mazoyer et al., 2002 : Analyses bioclimatiques actualisées de la région.

ACHIR, M (2011) « Caractérisation du phénomène d'écrasement par l'étude de la dimension fractale des grains », Mémoire de magister de L'UMMTO ,2011

Dumas. P et al., 2005 : thèse (l'état du système climatique) Notion associées au changement.

Giannakopoulos et al, 2005; GIEC, 2007 : changement climatique et énergie en méditerranée...

Léreau, 2006 : «Géotechnique 1, Cours-Chapitres1», Institut National Des Sciences Appliquées de Toulouse, 2005-2006.

Brette, 2002 : « Cours de laboratoire partie 6- les sols », Lycée Pierre Caraminot 19300E.

Mouroux et al 1987 ; Freeah, 2006 et Mouroux et al., 1988

Jennings, 1962: Limitations to the use of effective stresses concept in partly saturated soils. Géotechnique, vol. 12, pp. 125-144.

Xiang-Ling LI, 1999: Comportement Hydromécanique des Sols Fins : de l'état saturé à l'état non saturé. Thèse de Doctorat en Sciences appliquées, Université de Liège.

Berga. j, 2003-2004: « Eléments de Mécanique des Sols », Centre Universitaire de Béchar, 2003-2004.

D. Merabet,, H. Belkacemi, Caractérisation minéralogique et chimique du kaolin de Tamazert (Algérie), *Annales de Chimie Science des*

M. Segad, B. Jonsson, T. Åkesson, B. Cabane: Ca/Na montmorillonite: structure, forces and swelling properties, *Langmuir* 26.8, 2010, pages 5782-5790.

J. Hower, T. C. Mowatt, The mineralogy of illites and mixed-layer illite/montmorillonites. *American Mineralogist*, vol. 51, no 5-6, 1900.

Van Olphen.H, 1963; Collins.K& MC Gown.A, 1974: «The Form and Function of Micro fabric Features In A Variety Of Natural Soils» *Geotechnique* 24, n°2.

O. Qabaqous, N. Tijani, M. N. Bennani, A. El Krouk: Elaboration et characterization des supports plans à base d'argile (Rhassoul) pour membranes minérales (Preparation and

Références bibliographiques

characterization of supports plans from the (Rhassoul) Clay for mineral membranes), Mater. Environ. Sci. 5 (S1), 2244-2249, ISSN: 2028-2508, CODEN: JMESCN, MPE14, 2014.

Gens.A et Alonso.E. E 1992: "a framework for the behaviour of unsaturated expansive clays". canadian geotechnical journal, vol. 29, pp. 1013-1032.

O. Liétard : Contribution à l'étude des propriétés physicochimiques, cristallographiques et morphologiques des kaolins. Thèse doct. ès sciences. 322p. INPL Nancy.

J. Hower, T. C. Mowatt, The mineralogy of illites and mixed-layer illite/montmorillonites. *American Mineralogist*, vol. 51, no 5-6, 1900.

Wakim,J. 2005 : Influence des solutions aqueuses sur le comportement mécanique des roches argileuses. Thèse de doctorat. École nationale supérieure des mines de paris. Fontainebleau Cedex. France. 154 p.

1964 puis Bjerrum1967 : Caractérisation du fluage des sols fins et de leurs interactions avec les ouvrages (application au dimensionnement des remblais sur sols compressibles), Mémoire de magister, université Mohamed Boudiaf de Msila.

Bakir,N. 2006 : Caractérisation du fluage des sols fins et de leurs interactions avec les ouvrages (application au dimensionnement des remblais sur sols compressibles), Mémoire de magister, université Mohamed Boudiaf de Msila.

Boudlalo O.(2013) Étude expérimentale du comportement mécanique des fines dans la stabilité des talus et des fondations.(222 pages). (L.G.E.A) l'ummto.Thèse de doctorat..pp (10,13,15,17,59,65,74).

Bouzeboudja. A. (2016) L'influence de la dimension fractale en 3D sur les caractéristiques mécaniques des matériaux granulaires. (186pages). (L.G.E.A). l'ummto. Thèse de doctorat. Option : Géotechnique.pp (15,43,45).

Abdelhadi EL HACHMI, « Argile et minéraux argileux: propriétés physico-chimiques et propriétés et propriétés des collât » ; Université Abdelmalek Essaadi - Master fondamentale Chimie 2013.

ACHIR, M (2011) « Caractérisation du phénomène d'écrasement par l'étude de la dimension fractale des grains », Mémoire de magister de L'UMMTO ,2011

Références bibliographiques

N. Cousin, Argile, éditions Eyrolles, dépôt légal : avril 2013, ISBN : 978-2-212-55642-1.

P. Ségalen, Contribution à la connaissance de la couleur des sols à sesquioxydes de la zone intertropicale : sols jaunes et sols rouges. *Cah. Orstom, Sér. Pédol*, 7(2), 1969, pages 225-236.

(**P. Villieras,P. 2008**).Thèse (l'argile, son utilisation Al'officine)

KELLER. J, KELLER. M, CROWNOVER. R.M et CHEN. R.Y (1987) « Characteristics of Natural Scenes Related to the Fractal Dimension. » IEEE Transactions on Pattern Analysis And Machine Intelligence, Vol. PAMI-9, NO. 5.

KELLER. J, CHEN. S et CROWNOVER. R (1989) «Texture description and segmentation through fractal geometry».Computer Vision Graphics and Image Processing, vol. 45, pp.150-166.

LARKE.K. C (1986) « Computation of the Fractal Dimension of TopographicalSurfaces Using the Triangular Prism Surface Area Method. »Computer.Geosciences.

LÊ ThiNgọcHà (2009) «comportement des sols fins ».

BOUCLY-NOROTTE.V (1991) «Evolution des caractéristiques mécaniques et de la perméabilité de matériaux argileux sous l'effet de sollicitations thermiques, Minéralogie.» Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Français.

AUBOUIN.J, BROUSSE.R, LEHMAN.J. P, (1968) «Précis de géologie» 1^{er}cycle et licence. Tome I : pétrologie. Dunod.

AUDIGUIER-MARCEL. M (1979) «Contribution à l'étude du comportement deL'eau dans les sols en fonction de leur texture». Mémoire de DEA, Centre deGéologie d'ingénieur, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris,

WINDAL.T (2001) « Etude en laboratoire du gonflement des sols : Mise au point d'un odomètre flexible et étude de gonflement tridimensionnel », Thèse de doctorat,Université de Lille.

AFNOR : Norme française sol : reconnaissance et essais.

NFP 94-050 (1995) : Détermination de la teneur en l'eau pondérale des matériaux- Méthode par étuvage.

Références bibliographiques

NFP 94-051 (1993) : Détermination des limites d'Atterberg la limite à la coupelle – limite de plasticité au rouleau.

NFP 18-592 (1990) : Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à tache.

NFP 94- 067 (1992) : Coefficient de dégradabilité des matériaux rocheux.

NF EN 1367-4 (1998) : Essais pour déterminer les propriétés thermiques et l'altérabilité des granulats, Partie 4

- **Les sites d'internet :**

Source : climat Tizi-Ouzou-données climatique (603950).mhtml

Source : Climatologie de l'année 2020 à Tizi-Ouzou - Infoclimat.html (DZ)

Source : Climat _ en 1988, 2020 était bien prédit – {Sciences²}.mhtml. Le Monde.fr

Source : <http://www.prim.netDGALN> guide retrait gonflement des argiles, aout 2007.

Source : <http://www.mathcurve.com/courbes2d/tautochrone/tautochrone.shtml>.

Source : <http://www.mathcurve.com/courbes2d/tautochrone/tautochrone.shtml>.

Source : <http://www.dmae.upm.es/cursofractales/capitulo1/3.html>.

Source : <http://www.pensee-unique.fr/oceans.html>le22/04/2014

Source : hommesetsoleil.e-monsite.com

Source: <http://terresacree.org/rechauf.htm>

Source : <http://scholars-stage.blogspot.com>

Source:<http://le-rechauffement-climatique-tpe.emonsite.com>.

[com/medias/images/effetschangement-climatique-2.gif](http://le-rechauffement-climatique-tpe.emonsite.com/medias/images/effetschangement-climatique-2.gif).

Source : <http://www.diapo.ch/ploncheContact.php>

Références bibliographiques

Source : <https://www.notre-planete.info/terre/risques-naturels>

Source:<https://www.notre-planete.info/actualies/3044-canicules-france-juillet-2019>

Source:<https://www.notre-planete.info/actualies/3041-incendies-forets-records-arctique>

Source:<https://www.notre-planete.info/actualies/3064-incendies-records-amazonedeforestation>.

Source:[https:// La. climatologie.free.fr](https://La.climatologie.free.fr).