

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

Master Académique

Filière : Génie Civil

Spécialité : Géotechnique

THÈME

Étude du comportement des sols fins à l'aide de la dimension fractale

Réalisé par :

AMMICHE Hassina

Soutenu devant le jury composé de :

Mr MELBOUCI Bachir, Professeur à l'UMMTO..... Président

M^{me} BOUZEBODJA Aldjia, Maitre de Conférence - A à l'UMMTO..... Promotrice

Mr MERAKEB SEDDIK, Maitre de Conférence -A à l'UMMTO Examineur

Année 2021/2022

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier **Dieu** le tout puissant et miséricordieux, qui m'as donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à ma promotrice, **M^{me} BOUZEBoudja Aldjia**, maitre de conférences-A à l'UMMTO.

Je la remercie de m'avoir encadrée, orientée, aidée et conseillée.

J'exprime toute ma reconnaissance à **Mr BELBOUCI. B**, Professeur à l'UMMTO pour avoir bien voulu accepter de présider le jury de ce mémoire ainsi pour son aide et ses conseils, ainsi qu'à **Mr MERAKEB.S**, Maitre de conférences-A à l'UMMTO pour avoir bien voulu examiner et juger ce travail.

Mes vifs remerciements à **Mr LACHEBI Kamel**, responsable du laboratoire de recherche (LGEA) qui m'a beaucoup aidé dans la réalisation des essais, sans oublier **M^{me} HASSANI. F** employée à LNHC de TIZI-OUZOU et **Mr LAAFI. O**, qui m'ont donné les échantillons avec leurs données.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation universitaire dans la faculté de Génie de la Construction de l'UMMTO.

À ma famille, mes amis et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, par son amour, son soutien, pour tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour son assistance et sa présence dans ma vie. Reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

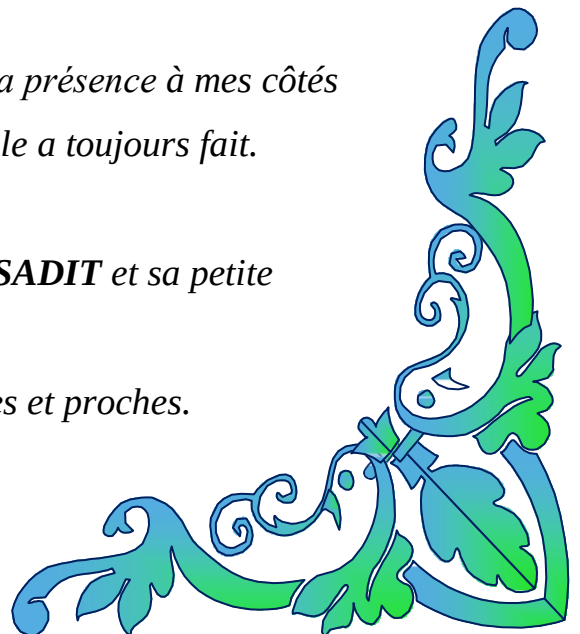
Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privation pour m'aider à avancer dans la vie, que Dieu fait en sorte que ce travail porte son fruit, merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

Mes frères qui n'ont cessé d'être pour moi l'exemple de persévérance, de courage et de générosité. À mes sœurs leurs enfants et leurs maris.

*À ma défunte sœur **SOUHILA** à qui j'ai souhaité sa présence à mes côtés pour partager avec moi mon succès comme elle a toujours fait.*

*À mes meilleures copine **THILELI, TASSADIT** et sa petite princesse **KAHINA**.*

Et en fin à tous mes amis, camarades et proches.



Liste des symboles

Notation	Définition
W	Teneur en eau (%).
W_L	Limite de liquidité (%).
W_P	Limite de plasticité (%).
I_P	Indice de plasticité (%).
I_C	Indice de consistance (%).
A_C	Activité de Skempton
ρ_s	La masse volumique des particules solides (g/cm ³).
VBS	La valeur de bleu de sol
DF_R	Dimension fractale de rugosité 2D
DF	Dimension fractale 3D
N_r	Nombre total de cubes nécessaires pour recouvrir tout l'objet
k'	Numéro de la boîte cubique qui a le niveau de gris minimal
l'	Numéro de la boîte cubique qui a le niveau de gris maximal
N	nombre des boîtes
g	Niveau de gris d'un pixel du pavé
m	Niveau de gris moyen des pixels du pavé
x	Dimension des boîtes

Liste des figures

Figure I.1 : Carte des différents climats dans le monde.....	3
Figure I.2 : Carte de régions climatiques dans 4 zones.....	9
Figure I.3 : Explication de mécanisme de l'effet de serre	12
Figure I.4 : Schéma qui indique l'effet du changement climatique prévu pour 2050 à 2100	15
Figure II.1 : Conséquence du gonflement des argiles dans la destruction d'un sol.....	21
Figure II.2 : Vue partielle d'un alignement de constructions ayant subi des basculements à Boudraa Salah	22
Figure II.3 : Dégradation des routes	23
Figure III.1 : Vue de l'ensemble de l'intestin grêle et détail de la paroi intestinale	26
Figure III.2 : Système pulmonaire.....	26
Figure III.3 : Quelques formes fractales dans la nature.....	27
Figure III.4 : Les nuages (exemple des structures fractales)	27
Figure III.5 : Image d'un réseau hydraulique	28
Figure III.6 : Image d'un fleuve d'eau	28
Figure III.7 : Image des éclairs.....	29
Figure III.8 : Image des fissures et fractures dans le sol	29
Figure III.9 : Différentes étapes de maillage de l'image du grain et illustration de la méthode de Box Counting.....	31
Figure III.10 : Calcul de la dimension fractale de la rugosité du grain	32
Figure III.11 : Différentes étapes de maillage de l'image du grain avec prise en compte de la surface intérieure du grain.....	32
Figure III.12 : Calcul de la dimension fractale de fragmentation de la surface intérieure du grain.....	33
Figure III.13 : Technique de Comptage Différentiel de Boîtes (CDB)	34
Figure III.14 : Deux pixels appartenant à deux cubes différents d'altitude 3 alors que leur.....	36
Figure III.15 : Nombre N_s de cubes qui couvre l'image.....	37
Figure IV.1 : Site de prélèvement de la marne de Mekla	40
Figure IV.1 : Site de prélèvement de la marne de Mekla	40
Figure IV.3 : Site de prélèvement de la marne d'Azazga	41
Figure IV.4 : Site de prélèvement de la marne de Boghni.....	41
Figure IV.5 : Site de prélèvement de la marne d'Oued Fali	42
Figure IV.6 : Limites d'Atterberg.....	45
Figure IV.7 : Coupelle de Casagrande	46

Figure IV.8 : La fermeture de la rainure	46
Figure IV.9 : La confection du rouleau.....	47
Figure IV.10 : La fissuration et brisure du rouleau.....	47
Figure IV.11 : Déroulement de l'essai au bleu de méthylène	49
Figure IV.12 : Tache avec zone incolore	49
Figure IV.13 : Tache avec zone humide tentée en bleu	49
Figure IV.14 : Appareille de détermination de CaCO_3	51
Figure IV.15 : Principales étapes de la méthode de calcimètre	51
Figure IV.16 : Détermination de la teneur pondérale en matières organiques	52
Figure IV.17 : Détermination des sulfates solubles dans l'acide.....	53
Figure IV.18 : Détermination des chlorures solubles dans l'eau	54
Figure V.1 : Préparation des échantillons	56
Figure V.2 : Saturation d'un échantillon à l'aide d'une seringue	57
Figure V.3 : Images de l'échantillon de la marne de Mekla au cours de l'essai aux canicules ..	59
Figure V.4 : Images de l'échantillon de la marne d'Ait Toudart au cours de l'essai aux canicules	60
Figure V.5 : Images de l'échantillon de la marne d'Azazga au cours de l'essai aux canicules..	61
Figure V.6 : Images de l'échantillon de la marne de Boghni au cours de l'essai aux canicules.	62
Figure IV.7 : Images de l'échantillon de la marne d'Ouad Fali au cours de l'essai aux canicules....	63
Figure V.8 : Variation de la masse des échantillons au cours d'essai aux canicules.....	64
Figure V.9 : Images de l'échantillon de marne de Boghni au cours de l'essai de dégradabilité	66
Figure V.10 : Images de l'échantillon de marne de Mékla au cours de l'essai de dégradabilité	68
Figure V.11 : Images de l'échantillon de la marne d'Ait Toudert au cours de l'essai de dégradabilité	69
Figure V.12 : Images de l'échantillon de la marne d'Azazga au cours de l'essai de dégradabilité ...	71
Figure V.13 : Images de l'échantillon de marne d'Ouad Fali au cours de l'essai de dégradabilité ...	73
Figure V.14 : Variation des masses d'échantillon de marne de Boghni au cours de l'essai de dégradabilité	74
Figure V.15 : Variation des masses d'échantillon de marne d'Azazga au cours de l'essai de dégradabilité	74
Figure V.16 : Variation des masses d'échantillon de marne d'Ait Toudart au cours de l'essai de dégradabilité	75
Figure V.17 : Variation des masses d'échantillon de marne de Boghni au cours de l'essai de dégradabilité	75
Figure V.18 : Variation des masses d'échantillon de marne de Mékla au cours de l'essai de dégradabilité	76
Figure VI.1 : Exemple du calcul de la DFR par le logiciel MATLAB.....	78

Figure VI.2 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai aux canicules pour l'échantillon de marne de Mekla.....	79
Figure VI.3 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai aux canicules pour l'échantillon de marne d'Ait Toudert.....	79
Figure VI.4 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai aux canicules pour l'échantillon de marne d'Azazga	80
Figure VI.5 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai aux canicules pour l'échantillon de marne de Boghni	81
Figure VI.6 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai aux canicules pour l'échantillon de marne d'Oued Fali	81
Figure VI.7 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai de dégradabilité pour l'échantillon de marne de Mekla.....	82
Figure VI.8 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai de dégradabilité pour l'échantillon de marne d'Ait Toudart.....	83
Figure VI.9 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai de dégradabilité pour l'échantillon de marne d'Azazga	84
Figure VI.10 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai de dégradabilité pour l'échantillon de marne d'Boghni.....	85
Figure VI.11 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai de dégradabilité pour l'échantillon de marne d'Oued Fali	86
Figure VII.1 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai aux canicules pour l'échantillon de marne de Mekla.....	87
Figure VII.2 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai aux canicules pour l'échantillon de marne d'Ait Toudert.....	88
Figure VII.3 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai aux canicules pour l'échantillon de marne d'Azazga	89
Figure VII.4 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai aux canicules pour l'échantillon de marne de Boghni	89
Figure VII.5 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai aux canicules pour l'échantillon de marne d'Oued Fali	90
Figure VII.6 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai de dégradabilité pour l'échantillon de marne d'Mekla	91
Figure VII.7 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai de dégradabilité pour l'échantillon de marne d'Ait Toudart.....	91
Figure VII.8 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai de dégradabilité pour l'échantillon de marne d'Azazga	92
Figure VII.9 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai de dégradabilité pour l'échantillon de marne de Boghni	93
Figure VII.10 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai de dégradabilité pour l'échantillon de marne d'Oued Fali	93

Liste des tableaux

Tableau IV.1 : L'état de saturation du matériau d'après TERZAGHI	44
Tableau IV.2 : L'indice de consistance.	47
Tableau IV.3 : Classes de l'activité A_c	48
Tableau IV.4 : Désignation du sol en fonction de son VBS.	49
Tableau IV.5 : Différents caractéristiques physique des matériaux étudiés.	50
Tableau IV.6 : La description des sols en fonction de leur teneur en CaCO_3	52
Tableau IV.7 : Description des sols en fonction de leur teneur en matières organiques.	53
Tableau IV.8 : Définition des classes d'agressivité des sols en fonction de la teneur en sulfates SO_4	54
Tableau IV.9 : Différentes caractéristiques chimiques	55
Tableau V.1 Variation de la masse des échantillons au cours de l'essai aux canicules.	63
Tableau V.2 : Variation de la masse des échantillons au cours de l'essai de dégradabilité.	73
Tableau VI.1 : Résultats de calcul de la dimension fractale de la marne de Mekla.	78
Tableau VI.2 : Résultats de calcul de la dimension fractale de la marne d'Ait Toudert.	79
Tableau VI.3 : Résultats de calcul de la dimension fractale de la marne d'Azazga	80
Tableau VI.4 : Résultats de calcul de la dimension fractale de la marne de Boghni	80
Tableau VI.5 : Résultats de calcul de la dimension fractale de la marne d'Oued Fali.	81
Tableau VI.6 : Résultats de calcul de la dimension fractale de marne de Mekla.	82
Tableau VI.7 : Résultats de calcul de la dimension fractale de marne d'Ait Toudert	82
Tableau VI.8 : Résultats de calcul de la dimension fractale de marne d'Azazga	83
Tableau VI.9 : Résultats de calcul de la dimension fractale de marne de Boghni	84
Tableau VI.10 : Résultats de calcul de la dimension fractale de marne d'Oued Fali.	85
Tableau VII.1 : Résultats de calcul de la dimension fractale de la marne de Mekla	87
Tableau VII.2 : Résultats de calcul de la dimension fractale de la marne d'Ait Toudert	88
Tableau VII.3 : Résultats de calcul de la dimension fractale de la marne d'Azazga.	88
Tableau VII.4 : Résultats de calcul de la dimension fractale de la marne de Boghni	89
Tableau VII.5 : Résultats de calcul de la dimension fractale de la marne d'Oued Fali.	90
Tableau VII.6 : Résultats de calcul de la dimension fractale de marne de Mekla	90
Tableau VII.7 : Résultats de calcul de la dimension fractale de marne d'Ait Toudert	91
Tableau VII.8 : Résultats de calcul de la dimension fractale de marne d'Azazga.	92
Tableau VII.9 : Résultats de calcul de la dimension fractale de marne de Boghni.	92
Tableau VII.10 : Résultats de calcul de la dimension fractale de marne d'Oued Fali.	93

Table des matières

Remerciements

Dédicaces

Liste des symboles

Liste des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

Chapitre I : Le climat et le changement climatique

I.1 Introduction.....	3
I.2 Climats du monde	3
I.2.1 Classification des climats	3
1.1.1.1 Le climat équatorial	4
1.1.1.2 Le climat de mousson	4
1.1.1.3 Le climat océanique	4
1.1.1.4 Le climat aride	5
1.1.1.5 Le climat montagnard	5
1.1.1.6 Le climat tropical	6
1.1.1.7 Le climat méditerranéen	6
1.1.1.8 Le climat chinois.....	7
1.1.1.9 Le climat continental.....	7
1.1.1.10 Climat Polaire	7
I.2.2 Le climat de l'Algérie.....	8
I.3 Le changement climatique	10
I.3.1 Les causes du changement climatique	10
1.1.1.11 I.3.1.1 Activités naturelles	10
1.1.1.12 I.3.1.2 Activités humaines	11
I.3.2 Effets du changement climatique.....	11
I.3.2.1 L'effet de serre.....	11
I.3.2.1.1 L'effet de serre naturel	11

I.3.2.1.2 L'effet de serre additionnel	13
I.3.3 Conséquences de changement climatiques	13
I.3.3.1 Conséquences de changement climatiques en générale.....	13
I.3.3.1.1 L'augmentation de la température de surface sur la Terre.....	13
I.3.3.1.2 La température des océans	13
I.3.3.1.3 La réduction de la surface des glaces océaniques arctiques.....	13
I.3.3.1.4 Le recul des glaciers continentaux	13
I.3.3.1.5 Les calottes polaires de l'Antarctique et du Groenland	13
I.3.3.1.6 Le niveau moyen des océans	14
I.3.3.1.6 Les indicateurs biologiques	14
I.3.3.2 Conséquences du changement climatique sur les risques naturels	14
I.3.3.2.1 Les canicules	14
I.3.3.2.2 Les incendies	15
I.3.3.3 Conséquences des changements climatiques dans le domaine de génie civil ...	15
I.3.4 Les Solutions	15
I.4 Conclusion	16

Chapitre II : Les sols fins et leurs problèmes

II.1 Introduction	17
II.2 Origine des sols	17
II.3 Définition des sols	17
II.4 Les sols fins	17
II.4.1 Les argiles.....	18
II.4.2 Les silts et les limons.....	18
II.4.3 Les marnes.....	18
II.4.3.1 Définition et compositions des marnes	18
II.4.3.2 classification des marnes	19
II.4.3.2.1 La couleur	19
II.4.3.2.2 Les constituants remarquables	19
II.4.3.2.3 L'étude stratigraphique et paléontologique.....	19
II.4.3.2.4 Genèse des marnes	20
II.4.3.2.5 Diagenèse des carbonates.....	20

II.4.3.2.6 Diagenèse des minéraux argileux	20
II.4.3.2.7 L'altération des marnes	20
II.4.4 Principaux problèmes des sols fins	21
II.4.4.1 Phénomène de Gonflement	21
II.4.4.2 Tassements	22
II.4.4.3 Glissements	22
II.4.5 Conséquences enregistrées	22
II.4.5.1 Cas des bâtiments	22
II.4.5.2 Cas des Chaussées	23
II.4.6 Relations entre caractéristiques du sol et les propriétés thermiques	23
II.4.6.1 La capacité thermique des sols	24
II.4.6.2 Conductivité thermique du sol	24
II.5 Conclusion	24

Chapitre III : La dimension fractale et ses méthodes de calcul

III.1 Introduction	25
III.2 Définition des fractales	25
III.3 Exemple de fractals	25
III.3.1 Corps humain	25
III.3.2 Dans la nature	26
III.4 Dimension fractale	29
III.4.1 Dimension euclidienne ou topologique	30
III.4.2 Le calcul de la dimension fractale en génie civil	30
III.4.2.1 Méthode de comptage des boîtes (box counting).....	30
III.4.2.1.1 Calcul de la dimension fractale du contour du grain seulement.....	31
III.4.2.1.2 Calcul de la dimension fractale de la surface intérieure du grain.....	32
III.4.2.2 La méthode de de Comptage Différentiel de Boîtes (CDB)	33
III.5 Conclusion	38

Chapitre IV : Essais d'identification

IV.1	Introduction	39
IV.2	Localisation des sites des échantillons	39
IV.3	Caractéristiques physiques	42
IV.3.1	Teneur en eau naturelle W % (NF P 94 – 050) – Méthode par étuvage	42
IV.3.2	Masse volumique des sols.....	42
IV.3.3	Indice des vides et degré de saturation :	43
IV.3.4	Les limites d'ATTERBERG (NF P 94-051).....	44
IV.3.5	L'activité AC :	48
IV.3.6	Valeur au bleu de méthylène (VBS) (NF P 94 – 068) – Essai à la tâche.....	48
IV.3.7	Tableau des résultats	50
IV.4	L'analyse chimique :	50
IV.4.1	Teneur en carbonate de calcium CaCO_3 (NF P 94 – 048) – Méthode du calcimètre ...	50
IV.4.2	Teneur en matières organiques-(NF P 94-047) - Méthode par calcination.....	52
IV.4.3	Sulfates solubles dans l'acide -selon la norme NF EN 1744-1 (P 18-660-1)	53
IV.4.4	Chlorures solubles dans l'eau-NF EN 1744-1 (P 18-660-1).....	54
IV.4.5	Tableau des résultats	55
IV.5	Conclusion	55

Chapitre V : Étude des effets climatique au laboratoire

V.1	Introduction	56
V.2	Préparation des échantillons	56
V.3	Les essais réalisés	56
V.3.1	Essai aux canicules	57
V.3.1.1	Principe d'essai	57
V.3.1.2	Appareillage	57
V.3.1.3	Déroulement d'essai	57
V.3.1.4	Les images retenues des échantillons.....	58
❖	Site de Mekla	58
❖	Site d'Ait Toudert	59
❖	Site d'Azazga.....	60
❖	Site de Boghni.....	61

❖ Site d'Ouad Fali.....	62
V.3.1.5 Interprétation des résultats	63
V.3.1.6 Les résultats des mesures de masse obtenus	63
V.3.1.7 Interprétation des résultats	64
V.3.2 Essai de Dégradabilité	64
V.3.2.1 But de l'essai	64
V.3.2.2 Appareillage	64
V.3.2.3 Déroulement de l'essai	65
V.3.2.4 Images retenues	65
❖ Site de Boghni.....	65
❖ Site de Mekla	67
❖ Site d'Ait Toudart	68
❖ Site d'Azazga	70
❖ Site d'Ouad Fali	71
V.3.2.5 Interprétation des résultats	73
V.3.2.6 Les résultats des mesures de masse obtenus	73
V.3.2.7 Interprétation des résultats	76
V.4 Conclusion.....	76

Chapitre VI : Calcul de la dimension fractale en 2D

VI.1 Introduction	77
VI.2 Application de la méthode de Box Counting	77
VI.3 Présentation des résultats	78
VI.3.1 Résultats de l'essai aux Canicules	78
❖ Marne de Mekla	78
❖ Marne de d'Ait Toudert	79
❖ Marne d'Azazga.....	80
❖ Marne de Boghni	80
❖ Marne d'Oued Fali.....	81
VI.3.2 Résultats de l'essai de Dégradabilité.....	82
❖ Marne de Mekla	82
❖ Marne de d'Ait Toudert	82

❖ Marne d'Azazga.....	83
❖ Marne de Boghni	84
❖ Marne d'Oued Fali.....	85
VI.4 Interprétation des résultats	86
VI.5 Conclusion	86

Chapitre VII : Calcul de la dimension fractale en 3D

VII.1 Introduction	87
VII.2 Présentation des résultats	87
VII.2.1 Résultats de l'essai de Canicules	87
VII.2.2 Résultats de l'essai de Dégradabilité	90
VII.2.3 Interprétation des résultats	94
VII.3 Conclusion	94
CONCLUSION GENERALE	95
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	96

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'exploitation des matériaux locaux peut apporter des solutions très intéressantes du point de vue économique et disponibilité. La marne par exemple fait partie des matériaux naturels les plus abondants en Algérie et particulièrement dans la région de la Grande Kabylie, la surface des affleurements marneux dans cette région dépasse les 1100 km². Il serait donc intéressant d'étudier le comportement de ce matériau dans le but de son utilisation dans d'éventuelles activités de Génie Civil, notamment lors de la réalisation des couches de chaussées, remblais, digues, support de fondations...

Cependant, ce matériau dit évolutif (dont les propriétés physiques et mécaniques évoluent dans le temps), nécessite une étude approfondie avant de procéder à son utilisation dans le domaine du Génie Civil. Ce qui permettra d'évaluer avec plus de précision les différents désordres qui peuvent apparaître à court ou à long terme, à savoir les (tassements, gonflements, glissements...).

Les marnes sont des roches relativement tendres, qui subissent une géodynamique très active à leur surface ce qui les rend très vulnérables aux aléas de la nature et des hommes. Elles présentent certainement une résistance élevée à l'état sec, mais leur comportement peut être différent en contact avec l'eau en fonction des minéraux argileux qui les composent.

Le but de notre étude est de montrer l'influence des changements climatiques sur les sols en effectuant deux essais (essai aux canicules et essai de dégradabilité). Les résultats de notre recherche seront basés sur le calcul de la dimension fractale qui est une notion généralisée de la dimension aléatoire qui permet d'évaluer la forme, la nature, et la taille réelle des grains.

Ce mémoire s'articule principalement sur une partie bibliographique et une expérimentale.

➤ **La partie bibliographique** : composée de trois chapitres :

Le premier chapitre présente des généralités sur le climat et les conséquences de changement climatique dans le monde.

Le deuxième chapitre est consacré aux origines des sols fins et leurs principaux problèmes.

Le troisième chapitre présente la définition des fractals et la dimension fractale et ses méthodes de calcul.

➤ **La deuxième partie est expérimentale**, elle est composée de quatre chapitres :

Le quatrième chapitre est consacré pour la localisation et l'identification des sols prélevés, par des essais d'identification (physiques et chimiques).

Le cinquième chapitre présente les deux essais climatiques (essai aux canicules et essai de dégradabilité) réalisés sur les échantillons intacts des sols prélevés de deux sites différents avec les résultats obtenus et leurs interprétations.

Le sixième chapitre porte sur la détermination de la dimension fractale bidimensionnelle (2D) de Box Counting avec le logiciel MATLAB R2016a, par les images prises pour les échantillons durant et après les essais.

Le septième chapitre porte sur la détermination de la dimension fractale tridimensionnelle (3D) de Compactage Différentiel de Boîtes (DBC) avec MATLAB R2016a.



Chapitre 1

Chapitre I : Le climat et le changement climatique

I.1 Introduction

La problématique des changements climatiques a été considérée l'un des problèmes majeurs du développement à l'échelle locale et régionale voire même à l'échelle internationale, les problèmes liés aux changements climatiques occupent une importante place parmi les préoccupations majeures contemporaines. Les liens entre les sols et le changement climatique sont complexes. Pour cela, on vise dans ce chapitre à faire la lumière sur leurs liens, à expliquer les processus sous-jacents et à souligner le besoin urgent d'utiliser cette précieuse ressource de façon responsable.

I.2 Climats du monde

Une mise au point sur les climats du Globe : leur classification, leur répartition et leurs caractéristiques, etc.

I.2.1 Classification des climats

La classification des climats est fondée d'une part sur la température et d'autre part sur l'importance des précipitations, aussi la latitude, l'influence maritime ou continentale, l'altitude, les vents, les courants marins, la période de l'année permettent de définir les grandes zones climatiques [1].

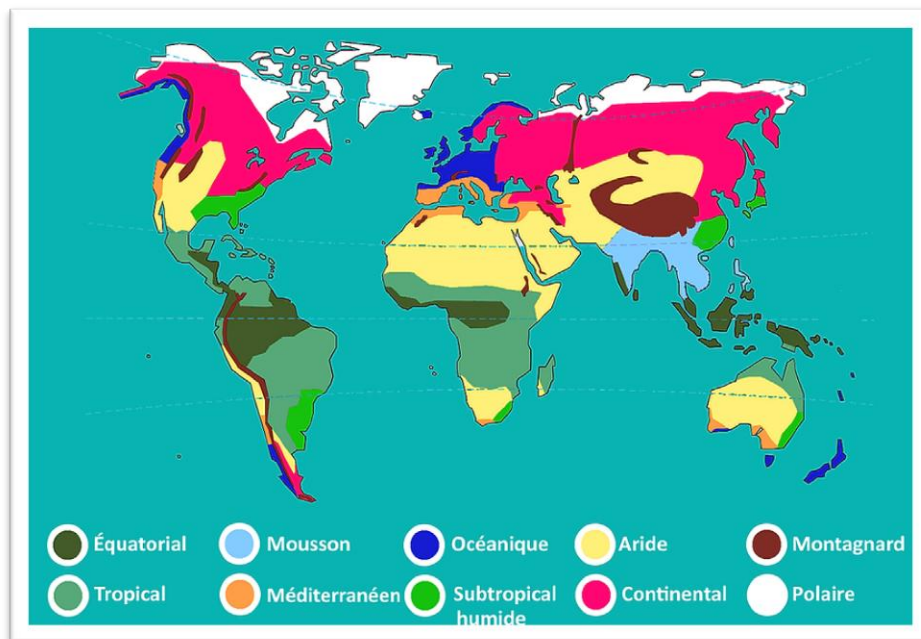


Figure I.1 : Carte des différents climats dans le monde [2].

I.2.1.1 Le climat équatorial

Il règne sur les basses latitudes. Les rayons du soleil sont proches de la verticale et chauffent donc beaucoup la terre. Le soleil passe au zénith à l'équateur au moment des deux équinoxes de mars et septembre ce qui explique les maximums de température à ces dates.

- Températures : voisines de 25°C.
- Amplitude thermique annuelle : environ 2°C.
- Précipitations : abondantes de 2000 à 4000 mm par an et fréquentes.
- Les saisons : peu marquées.
- Végétation : forêt dense.
- Exemples de régions à climat équatorial : Amazonie, Congo, Indonésie [1].

I.2.1.2 Le climat de mousson

C'est une variante du climat tropical.

- Températures : de 20 à 40°C.
- Amplitude thermique annuelle : moyenne.
- Précipitations : on passe de la sécheresse à la pluie diluvienne. On peut aller jusqu'à trouver 12000mm d'eau en quatre mois.
- Les saisons : trois saisons.
- Novembre à mars : températures douces (20°C).
- Avril à juin : températures très élevées (de 30 à 40°C).
- Juillet à octobre : températures élevées (25°C) et pluies très abondantes.
- Végétation : forêt dense, savane.
- Exemples de régions à climat de mousson : Sud-est asiatique, Inde [1].

I.2.1.3 Le climat océanique

- Températures : modérées et peu contrastées : elles s'écartent peu de la moyenne annuelle de 11° C.
- Amplitude thermique annuelle : faible.
- Précipitations : réparties tout au long de l'année (entre 800 et 1000 mm, 2 jours sur 3) avec un maximum en hiver.

- Les saisons : peu marquées : hiver doux, gel et neige rares ; été frais.
- Vents : violents, fréquents et de direction changeante.
- Végétation : forêt à feuilles caduques, lande, prairie.
- Exemples de régions à climat océanique : côte Atlantique de l'Europe, côte Pacifique de l'Amérique du Nord [1].

I.2.1.4 Le climat aride

On l'appelle également climat tropical sec, ou encore climat désertique. On le trouve de part et d'autre des tropiques.

- Températures : très élevées (jusqu'à 46°C)
- Amplitude thermique annuelle : forte (36°C) et amplitude thermique diurne également forte
- Précipitations : faibles et irrégulières : de 100 à 400 mm - Saisons : deux saisons :
- Été de 36°C à 46°C, saison sèche
- Hiver de 10°C à 15°C, saison humide
- Végétation : rare, steppe.
- Exemples de régions à climat tropical sec : Afrique, Australie, Arabie Saoudite [1].

I.2.1.5 Le climat montagnard

C'est un climat propre aux diverses régions de montagne, indépendamment de la zone climatique où elles se situent. Il se caractérise par des hivers froids et des étés frais et humides.

- Températures : la température diminue avec l'altitude (1°C tous les 100 mètres)
- Amplitude thermique annuelle : forte.
- Précipitations : importantes, sous forme de neige avec l'altitude.
- Végétation : Plus on monte en altitude moins il y a de végétaux. Les végétaux sont étagés :
 - Le premier étage dit montagnard (de 600 à 1500 m d'altitude), on trouve des forêts de pins sylvestres, de sapins et de hêtres...
 - Le deuxième étage dit subalpin (de 1500 à 2200 m d'altitude) :

On trouve des forêts de conifères (mélèze, épicéas, pins...), On trouve aussi des fleurs résistantes (crocus...).

- Le Troisième étage dit alpin (de 2200 à 3500 m d'altitude) :

Il n'y a plus de forêts ni même de buissons. On n'y trouve que des pelouses rocailleuses et des rochers. Il y a toutefois des fleurs qui y poussent (edelweiss, génépis...).

- Le quatrième étage dit nival (plus de 3 500 m d'altitude).

C'est l'étage des neiges éternelles. Rien n'y pousse, il n'y a que de la neige, de la glace... [1].

I.2.1.6 Le climat tropical

Il se retrouve de part et d'autre de la zone équatoriale.

- Températures : élevées et contrastées.
- Amplitude thermique annuelle : voisine de 10°C - Précipitations : variables de 500 à 1500 mm par an.
- Les saisons : deux saisons :
 - Été : saison fraîche et humide (environ 23°C).
 - Hiver : saison chaude et sèche (environ 35°C).
- Vents : permanents : les alizés.
- Végétation : forêt moyennement dense et savane selon l'humidité.
- Exemples de régions à climat tropical : Brésil, Amérique centrale, Antilles, Venezuela [1].

I.2.1.7 Le climat méditerranéen

- Températures : contrastées.
- Amplitude thermique annuelle : forte d'environ 15°C.
- Précipitations : irrégulières ; il y a moins de 100 jours de pluie par an et elles tombent surtout sous forme d'averses brutales.
- Les saisons : été chaud et sec - hiver doux - pluies violentes au printemps et en automne - Vents : violents : tramontane, mistral.
- Végétation : forêt clairsemée, garrigue, maquis.
- Exemples de régions à climat méditerranéen : Afrique du Nord, Espagne, sud de la France, Italie, Chili central, Californie, région du Cap (Afrique du Sud), sud-ouest de l'Australie [1].

I.2.1.8 Le climat chinois

- Également appelé climat subtropical humide désigne dans le langage courant le climat supra tropical humide.
- Températures : elles peuvent augmenter ou chuter très brutalement.
- Saisons : c'est une zone climatique caractérisée par des étés chauds et humides ainsi que des hivers frais.
- Il est difficile de délimiter ce climat précisément, car il constitue en fait une combinaison du climat continental par la possibilité de ses coups de froid en hiver et du climat tropical par la moiteur de ses étés et ses phénomènes violents (tornades, typhons, ouragans). Il est aussi variable selon la latitude, dans l'hémisphère nord la dominance continentale au nord laissant place à des caractères de plus en plus tropicaux vers le sud.
- Exemple de régions à climat subtropical humide : côte est des USA, l'est de la Chine et de l'Australie [1].

I.2.1.9 Le climat continental

- Températures : très contrastées : de - 20°C en hiver à 30°C en été.
- Amplitude thermique annuelle : forte.
- Précipitations : faibles (400 mm par an). Elles tombent sous forme de neige en hiver et de pluies d'orage en été.
- Les saisons : hiver long et très rigoureux ($t < 0^{\circ}\text{C}$; gel) ; été chaud et pluvieux ; printemps très court ; automne sec.
- Vents : violents en hiver.
- Végétation : taïga, prairie, steppe.
- Exemple de régions à climat continental : Russie, Canada [1].

I.2.1.10 Climat Polaire

- Températures : très souvent négatives. La moyenne mensuelle ne dépasse pas 10°C.
- Amplitude thermique annuelle : très forte
- Précipitations : peu abondantes et elles tombent uniquement sous forme de neige.
- Les saisons : été très court.

- Vent : très fort : blizzard.
- Végétation : toundra.
- Exemples de régions à climat polaire : Alaska, nord du Canada, Groenland, Sibérie, Antarctique [1].

1.2.2 Le climat de l'Algérie

Le climat de l'Algérie est essentiellement méditerranéen, c'est-à-dire caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers pluvieux. Mais sous ce qualificatif général, on est appelé à distinguer une grande diversité de climats régionaux, déterminés par la situation géographique et par l'orographie de l'Algérie. Celle-ci est bordée au Nord par la Méditerranée, relativement chaude en été, relativement fraîche en hiver, au Sud par le Sahara où la température est élevée en moyenne, mais très variable dans le temps ; il en résulte pour les différentes parties de l'Algérie, soumise à ces deux influences, des écarts de température considérables, et essentiellement variables d'une saison à l'autre (ce qui se traduit par une déformation des courbes isothermes). Les importantes chaînes de l'Atlas tellien et de l'Atlas saharien qui traversent le pays d'ouest en est contribuent pour leur part à différencier les climats en abaissant la température de l'air, et en augmentant les précipitations aux dépens des régions situées plus au Sud. Cette diversité des climats régionaux et locaux entraîne la bigarrure de la carte agricole de l'Algérie.

On définit pour l'Algérie les régions ou les zones climatiques suivantes : voir la figure 4.

- 4 zones climatiques et une sous zone au Nord.
- 3 zones climatiques au Sud. Pour chaque zone, on distingue les sites d'altitude inférieure à 500 m, comprise entre 500 et 1000 m et supérieure à 1000 m.

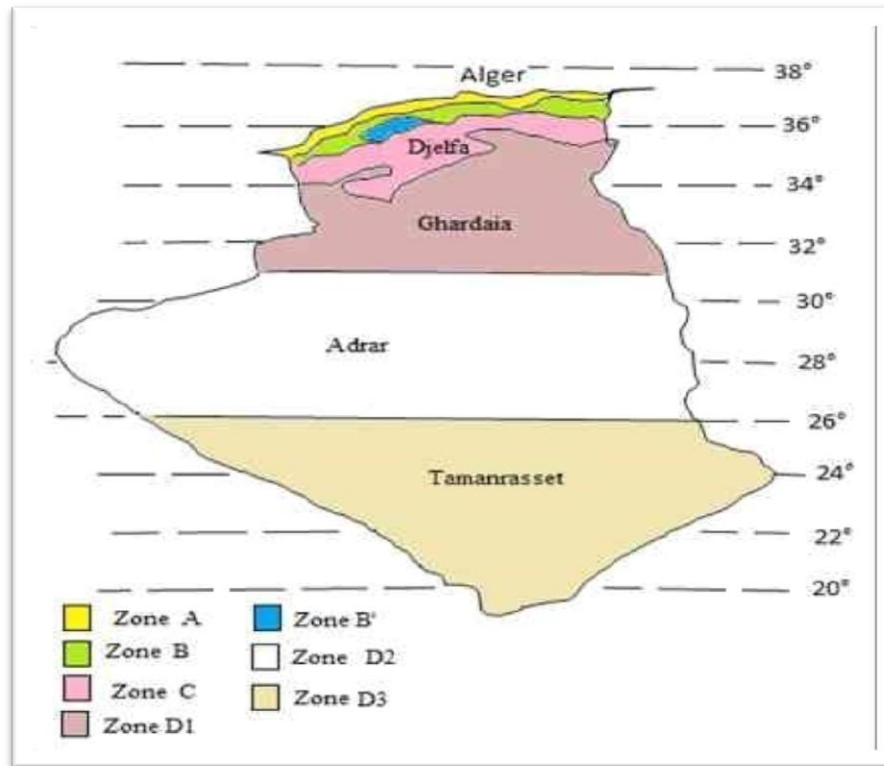


Figure I .2 : Carte de régions climatiques dans 4 zones [3].

- La zone A : Elle comprend le littoral et une partie du versant Nord des chaînes côtières (climat méditerranéen maritime).
- Cette zone bénéficie d'un climat doux et régulier, dû à l'influence modératrice de la mer. Les températures moyennes y sont sensiblement les mêmes de l'Ouest à l'Est.
- La zone B : Elle comprend la plaine et les vallées comprises entre les chaînes côtières et l'Atlas Tellien, autre que celle de Chleff (climat méditerranéen continental). La plaine du Chéliff peut être considérée comme " *une zone climatique un peu particulière* " de l'Algérie, par les écarts de température considérables que l'on y rencontre. Distant de la mer de moins de 50 km. Elle est cependant soustraite à l'influence maritime par la chaîne du Dahra qui la borde au Nord. L'important massif de l'Ouarsenis qui la domine au Sud augmente les effets du sirocco, les masses d'air transportées des Hautes Plaines s'échauffant en même temps qu'elles s'abaissent vers la plaine du Chéliff. Enfin on trouve confirmée ici la loi générale suivant laquelle toute forme concave du terrain - vallée, cuvette - entraîne de fortes variations de température.
- La zone B' : C'est une sous-zone de la zone B. Elle comprend la vallée de Chleff, comprise entre la chaîne de l'Ouarsenis et les montagnes du Dahra et des Braz.

- La zone C : Elle comprend les hauts plateaux entre l'Atlas Tellien et l'Atlas Saharien, avec des altitudes supérieures à 500 m (climat méditerranéen de montagne) comme en témoigne la figure 5.
- La zone D1 : Elle comprend le Sahara au-delà de l'Atlas Saharien jusqu'à la latitude 31°. Au-delà de l'Atlas saharien, on observe les mêmes fortes amplitudes thermiques, mais des températures plus élevées dues à la moindre altitude et aussi à la latitude plus basse : Touggourt est un exemple typique du climat nord-saharien, avec des maxima absolus voisins de 50°, alors que dans l'Algérie septentrionale ceux-ci dépassent rarement le 45°. La faible humidité atmosphérique permet un rayonnement intense, et les nuits peuvent être très fraîches. La figure 6 ci-après en dit mieux :
- La zone D2 : Elle comprend le Sahara au-delà de la latitude 31° jusqu'à la latitude 26°.
- La zone D3 : Elle comprend le Sahara au-delà de la latitude 26° jusqu'aux frontières Sud [3].

I.3 Le changement climatique

Si la terre subit des changements climatiques depuis la nuit des temps, on peut se demander pourquoi l'on fait autant de bruit autour du changement climatique actuel, aussi appelé "réchauffement climatique". En réalité, le changement climatique actuel est inquiétant, car il est très rapide, ce qui diminue la possibilité d'adaptation pour de nombreuses espèces animales et végétales qui risquent de disparaître. Mais le changement climatique actuel est surtout unique, car c'est la première fois que l'homme y joue un rôle important [4].

I.3.1 Les causes du changement climatique

Le climat peut être influencé par des perturbations soit naturelles ou soit dues aux activités humaines.

I.3.1.1 Activités naturelles

- Les changements relatifs de la position de la terre et du soleil modifient l'énergie solaire reçue par la terre
- Les changements de l'activité solaire modifient la puissance du rayonnement émis par le soleil
- Les poussières volcaniques réfléchissent le rayonnement solaire [4].

I.3.1.2 Activités humaines

- La consommation de combustible (pétrole, charbon, gaz...) augmente la concentration des gaz à effet de serre
- L'émission de très fines particules modifie les échanges par rayonnement, la formation des nuages et de la pluie
- Certaines productions (mousses, plastiques...) ou installations (climatisations...) émettent des composés chimiques qui augmentent l'effet de serre.
- Les pratiques d'utilisation des sols (agriculture intensive, déforestation...) modifient les échanges d'eau et de chaleur avec la surface, et augmentent la concentration des gaz à effet de serre [4].

I.3.2 Effets du changement climatique

Les effets du changement climatique sont : le réchauffement climatique, les inondations et les sécheresses accrues, les événements météorologiques extrêmes, la montée du niveau de la mer, la disparition de la vie sauvage, la disparition des écosystèmes, les migrations, la prolifération des organismes nuisible, etc... [4].

I.3.2.1 L'effet de serre

Le facteur prépondérant du changement climatique actuel est la modification de la composition de l'atmosphère. Pour mieux comprendre ce mécanisme, il faut distinguer l'effet de serre "naturel" de l'effet de serre "additionnel" [4].

I.3.2.1.1 L'effet de serre naturel

L'atmosphère est une fine enveloppe de gaz qui englobe la terre et protège les êtres vivant sur terre. En effet, non seulement elle les protège des chutes de météorites et des excédents de rayons ultraviolets (grâce à la couche d'ozone), mais elle procure également une température moyenne agréable de 15°C à la surface de la planète grâce aux gaz à effet de serre qu'elle contient. C'est ce qu'on appelle l'effet de serre naturel.

La terre reçoit beaucoup d'énergie du soleil, sous forme de rayonnement (principalement sous forme de lumière). Une partie de cette énergie va être réfléchié directement dans l'espace par l'atmosphère, les nuages ou encore la surface de la terre (voir illustration ci-dessous). Le reste est absorbé momentanément, avant d'être rejeté sous forme de chaleur (rayons infrarouges). C'est là qu'entrent en action les gaz à effet de serre qui bloquent partiellement les rayons infrarouges et les empêchent de s'échapper immédiatement vers l'espace. En retenant ainsi un

peu plus longtemps cette énergie, ils contribuent à augmenter la chaleur moyenne à la surface de la terre. Au final, la Terre renvoie dans l'espace la même quantité d'énergie qu'elle reçoit du soleil, cependant, pas forcément immédiatement. Le mécanisme d'effet de serre naturel est vital : sans lui, la température moyenne sur terre serait similaire à celle de la lune : -18°C .

Les gaz à effet de serre présents naturellement dans l'atmosphère sont principalement :

- la vapeur d'eau (H_2O) qui se forme par évaporation depuis le sol, les plantes, les rivières, les océans, etc.
- le gaz carbonique (CO_2) émis par exemple par la respiration humaine et animale, la décomposition d'un corps mort ou lors d'un incendie de forêt.
- le méthane (CH_4) émis principalement par la décomposition dans les zones humides (marais, forêts tropicales, ...) et la digestion des animaux (en particulier les ruminants et les termites).
- le protoxyde d'azote (N_2O) émis par les océans et les sols.

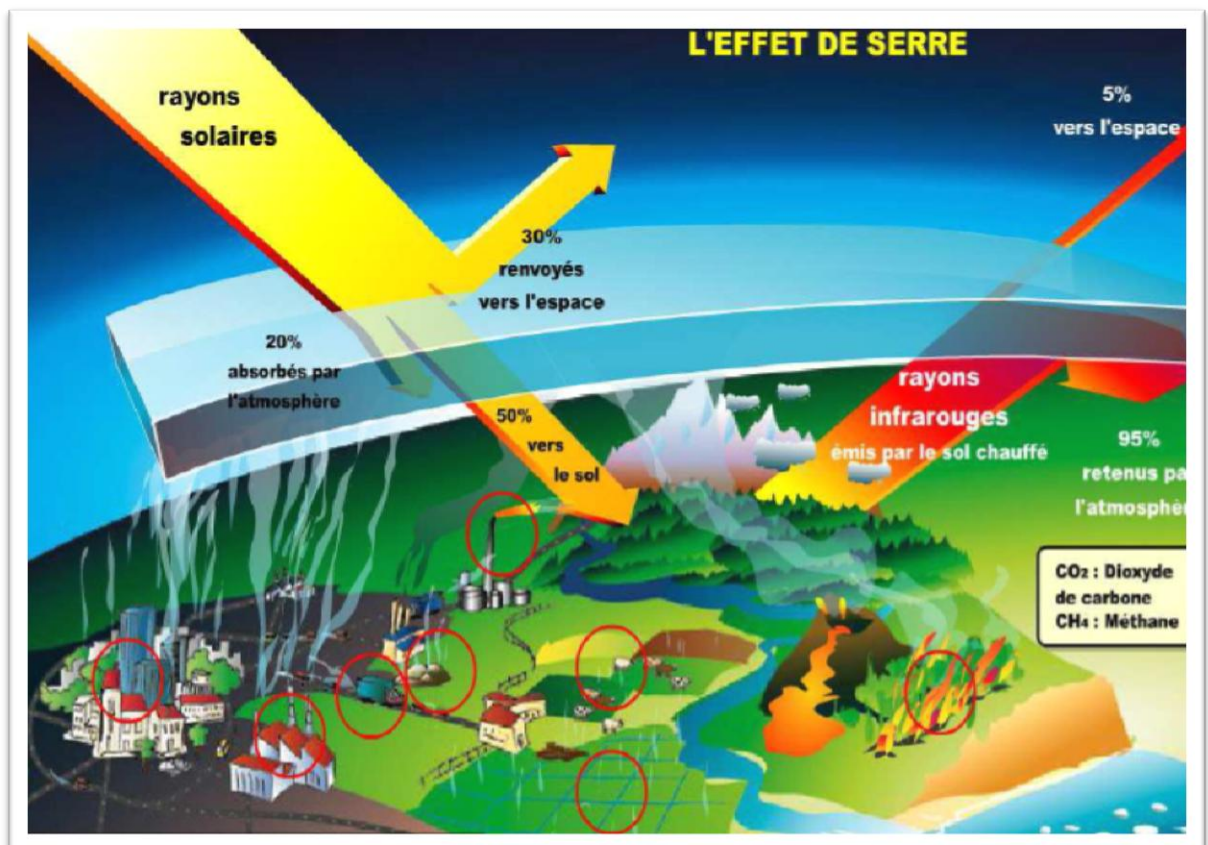


Figure I. 3 : Explication de mécanisme de l'effet de serre [4].

1.3.2.1.2 L'effet de serre additionnel

Depuis le début de la révolution industrielle, l'homme a émis une grande quantité de différents gaz dans l'atmosphère, principalement en brûlant du charbon, du gaz et du pétrole. Une partie de ces gaz sont des gaz à effet de serre. Leur accumulation dans l'atmosphère produit un effet de serre "additionnel", entraînant une modification du système climatique et une augmentation de la température moyenne sur Terre [4].

1.3.3 Conséquences de changement climatiques

1.3.3.1 Conséquences de changement climatiques en générale

1.3.3.1.1 L'augmentation de la température de surface sur la Terre

L'augmentation de la température de surface sur la terre est de $0,8 \pm 0,2$ °C depuis 1870. Elle reste notablement différente pour les deux hémisphères : plus forte au Nord et plus forte aux hautes latitudes. Une variabilité entre continents est également observée. Une forte modulation sur des périodes annuelles et multi décennales est également constatée, avec deux périodes de plus forte augmentation (approximativement de 1910 à 1940 et de (1975 à 2000) encadrées par des périodes de stagnation ou de décroissance.

1.3.3.1.2 La température des océans,

Mesurée depuis les années 1950 par les bateaux de commerce ou les navires océanographiques (jusque vers 700 m de profondeur) et plus récemment par le système de bouées profitantes Argo, montre une augmentation moyenne globale depuis quelques décennies [5].

1.3.3.1.3 La réduction de la surface des glaces océaniques arctiques.

La banquise, dont la fonte ne contribue pas à l'élévation du niveau des océans, est un autre indicateur fort de l'accélération de l'évolution du climat : de 8,5 millions de km² stable dans la période 1950-1975, la surface des glaces de mer a connu une décroissance très rapide jusqu'à 5,5 millions de km² en 2010 [5].

1.3.3.1.4 Le recul des glaciers continentaux

Le recul des glaciers continentaux est observé de façon quasi généralisée depuis 3 à 4 décennies, avec une nette augmentation au cours des 20 dernières années [5].

1.3.3.1.5 Les calottes polaires de l'Antarctique et du Groenland

Les calottes polaires de l'Antarctique et du Groenland ont un bilan total de masse négatif depuis une dizaine d'années. Si quelques régions élevées de l'intérieur des calottes, en

particulier Antarctique, s'épaississent un peu par suite de précipitations neigeuses accrues, la perte de masse domine.

Celle-ci s'effectue dans les zones côtières du Groenland et de l'Antarctique de l'Ouest par écoulement très rapide de certains glaciers vers l'océan et décharge d'icebergs. On pense que le réchauffement des eaux océaniques dans ces régions est la cause majeure des instabilités dynamiques observées [5].

I.3.3.1.6 Le niveau moyen des océans

Le niveau moyen des océans est un autre indicateur qui intègre les effets de plusieurs composantes du système climatique (océan, glaces continentales, eaux continentales). Avant 1992, le niveau de la mer était mesuré par des marégraphes le long des côtes continentales et de quelques îles : le niveau des océans, en moyenne annuelle sur toute la planète, s'est élevé à un rythme de 0,7 mm/an entre 1870 et 1930 et d'environ 1,7 mm/an après 1930. Depuis 1992, les mesures sont effectuées par satellites : la hausse du niveau moyen global de la mer est de l'ordre de 3,4 mm/an. Les contributions climatiques à cette élévation sont approximativement dues, pour un tiers à la dilatation de l'océan consécutive au réchauffement et, pour les deux autres tiers, aux glaces continentales à parts quasi égales, fonte des calottes polaires du Groenland et de l'Antarctique d'une part, et fonte des glaciers continentaux d'autre part [4].

I.3.3.1.7 Les indicateurs biologiques,

Les indicateurs biologiques, tels que les déplacements de populations animales terrestres ou marines et l'évolution des dates d'activités agricoles saisonnières, montrent aussi la survenue d'un réchauffement climatique [6].

I.3.3.2 Conséquences du changement climatique sur les risques naturels

La fréquence, l'intensité et la durée des phénomènes extrêmes (canicules, inondations, sécheresses, cyclones...) seront accentuées, bien qu'il n'est pas encore possible de l'affirmer pour les orages, les tornades ou la grêle par exemple [6]

I.3.3.2.1 Les canicules

Les vagues de chaleur sont de plus en plus fréquentes et intenses. Ainsi, « Des vagues de chaleur aussi intenses et étendues portent la marque des changements climatiques d'origine humaine et corroborent les conclusions scientifiques selon lesquelles les épisodes de chaleur sont plus fréquents, plus longs et plus intenses alors que les concentrations de gaz à effet de serre génèrent une hausse des températures au plan mondial [6].

I.3.3.2 Les incendies

Conséquence directe de l'augmentation des températures et des vagues de chaleur : de plus en plus d'incendies se déclarent, entraînant l'émission de carbone qui va à son tour réchauffer l'atmosphère. Par exemple, l'année 2019 a été marquée par des records de chaleur en arctique qui entraînant la fonte accélérée de l'inlandsis du Groenland [7].

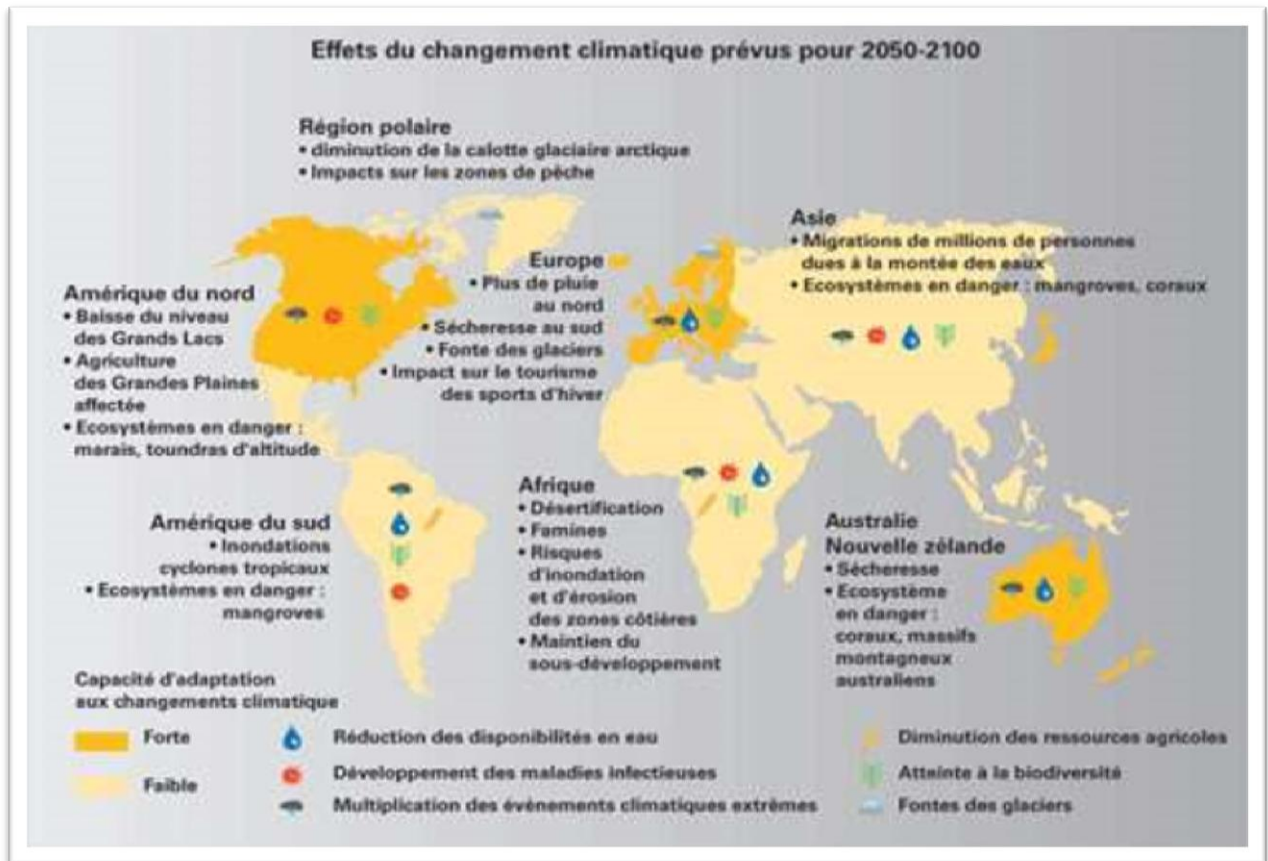


Figure I.1: Schéma qui indique l'effet du changement climatique prévu pour 2050 à 2100 [7].

I.3.3.3 Conséquences des changements climatiques dans le domaine de génie civil

- Corrosion des armatures dans le béton.
- Exfoliation au niveau des tunnels.
- Augmentation des glissements de terrain
- Sécheresse qui cause des fissurations ainsi des dégradations de sol.
- Retrait-gonflement des sols.
- L'abondance des précipitations cause des déformations au niveau des routes, etc.

I.3.4 Les Solutions

Les solutions préconisées au problème du réchauffement climatique sont :

- | | |
|---------------------------------------|------------------------------|
| -Réduction des gaz à effet de serre. | -Développement durable. |
| -Préservation des écosystèmes. | -Contrôle de la pollution. |
| -Connectivité écologique plus grande. | -Coopération internationale. |

I.4 Conclusion

Le changement climatique menace tous les secteurs et les régions du monde pour cela, en plus des mesures de protection des sols visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre, il est urgent de prendre des mesures d'adaptation au changement climatique. Une gestion adéquate des sols renforce la résistance aux températures plus élevées, aux sécheresses croissantes et aux événements extrêmes toujours plus nombreux. Une utilisation durable des sols protège leur qualité et leurs fonctions.



Chapitre II

Chapitre II : Les sols fins et leurs problèmes

II.1 Introduction

Le sol constitue une base pour les fondations de chaque construction sur terre. Les propriétés du sol sont très importantes du point de vue construction. Le sol peut résister à la charge de la construction sans aucune défaillance, mais il peut échouer si l'analyse du sol, dans lequel la fondation est placée n'est pas effectuée correctement.

II.2 Origine des sols

L'étude de la provenance des sols appartient à la géodynamique externe, un domaine de la géologie qui traite des processus de modification du relief des continents et des fonds océaniques. Du point de vue de la géologie, la formation des roches sédimentaires n'est qu'une des étapes menant à la formation des sols. Elle est associée à deux phases d'érosion : la météorisation de la roche superficielle et le transport des débris [10].

II.3 Définition des sols

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

- **Les roches** : agglomérats 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 [8].

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 [9].

II.4 Les sols fins

Ce sont des sols où les éléments fins dont le diamètre est inférieur à $20\mu\text{m}$ sont prédominants, il existe des différents types de sol fin tel que l'argile, le sable fin, les limons, etc. lors de la construction, il faut prendre en compte plusieurs propriétés afin d'éviter tout dommage à la structure ou à son exploitation car toute variation en teneur en eau engendre des mouvements dans ces sols. Ce qui mène l'ouvrage à la ruine, pour cela il faut respecter certaines règles :

-Réaliser un ouvrage dont l'infrastructure convient avec le comportement de ces sols.

-Faire appel à la stabilisation des sols fins c'est-à-dire une collaboration sur ces derniers pour réduire leur sensibilité.

Selon la classification on a : Grains fins : $5\mu\text{m}$ à $2\mu\text{m}$, Grains très fins : $2\mu\text{m}$ à $0,2\mu\text{m}$ et Colloïdes : $\leq 0,2\mu\text{m}$ (kaolinite, illite et montmorillonite) [9].

II.4.1 Les argiles

C'est un sol d'assise pour un grand nombre de construction qui est en effet issue de la décomposition de roches sédimentaires, c'est une vraie richesse millénaire qui n'est pas près de s'épuiser et elle contient des particules fines de diamètre inférieur à $2\mu\text{m}$ et qui contient des minéraux argileux ou tout autre minéral chargé négativement comme la smectite. On distingue deux catégories des argiles :

- **Argiles plastiques** : qui sont déformables et molles.
- **Argiles raides** : qui ont un comportement plus fragile que ductile au-delà de la limite d'élasticité et cela à cause de la présence des carbonates et des quartz.

II.4.2 Les silts et les limons

Les limons, constitués de silt, de loess et de loehm, possèdent un squelette siliceux à silico calcaire à grains fins. Leur taille est située entre celle des sables et celle des argiles, la teneur en argile est variable. Ils sont peu perméables et constituent des terres de culture fertiles. Leur assise est médiocre et donc à éviter pour les fondations [9].

II.4.3 Les marnes

II.4.3.1 Définition et compositions des marnes

La marne est une roche sédimentaire contenant du carbonate de calcium CaCO_3 (composant principal du calcaire) et de l'argile, en quantités à peu près équivalentes (35 % à 65 %). Les marnes sont intermédiaires entre les calcaires et les argiles, ainsi les calcaires marneux, ne contiennent que 5% à 35% d'argile, les marnes argileuses de 65% à 95% d'argile, tandis que, les marnes au sens stricte contiennent de 35% à 65% d'argile [10].

Comme les argiles, les marnes sont tendres, finement poreuses, friables quand elles sont sèches, plastiques lorsqu'elles sont mouillées. Mais, à la différence des argiles, elles font effervescence avec les acides à cause de la présence du calcaire. La finesse des éléments constitutifs (minéraux argileux, carbonates et, parfois, silice en faible quantité) place les marnes dans le groupe des lutites, ou pélites. La teneur en carbonate (CaCO_3) ou en argile sont des paramètres essentiels permettant la classification de certaines roches [10].

Delahaye et Le Roux, ont défini la marne comme étant un matériau de transition entre le calcaire et l'argile ; c'est une roche carbonatée contenant de 30 à 70 % d'argile. Ainsi, elle tient de la fraction carbonatée une structure plus ou moins résistante et de la fraction argileuse une possibilité d'évolution par destruction de la structure par suite de l'action de l'eau sur l'argile, conduisant à un matériau plastique [10].

II.4.3.2 Classification de marnes

Ces différents éléments responsables de la couleur et de l'aspect permettent de définir la marne rencontrée par une appellation. Donc on peut classer les marnes selon :

II.4.3.2.1 La couleur

- des marnes vertes du bassin du Paris ;
- des marnes bleues d'Argenteuil ;
- des marnes rouges de Marseille ;
- des marnes bariolées du Trias lorrain ;
- Les marnes grises, vertes et bleues de la grande Kabylie [11].

II.4.3.2.2 Les constituants remarquables

- de marnes dolomitiques ;
- de marnes micacées ;
- de marnes sableuses ;
- de marnes glauconieuses ;
- de marnes bitumineuses ;
- de marnes gypseuses, etc [11].

II.4.3.2.3 L'étude stratigraphique et paléontologique

- de marnes à spongiaires,
- de marnes à foraminifères,
- de marnes à pholadomyes,
- de marnes à radiolaires, etc [11].

II.4.3.2.4 Genèse des marnes

Les argiles qui rentrent dans la constitution des marnes proviennent, soit de l'altération des massifs émergés, soit de la reprise des sols.

Après un transport plus ou moins long, les minéraux argileux arrivent au bassin de sédimentation.

Dans les étapes proprement chimiques du cycle sédimentaire, les néoformations dominent (carbonates, silex et phosphate). Au cours du dépôt, et après celui-ci, interviennent les phénomènes de diagenèses (somme de processus de formation des roches à partir des boues).

Dunoyer en 1969 a distingué les phénomènes suivants :

II.4.3.2.5 Diagenèse des carbonates

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

- Ceux qui affectent la composition minéralogique et chimique (remplacement, recristallisation, dissolution, cimentation, formation de nodules...).
- Ceux qui altèrent la structure (fracturation, déformation plastique, tassement par dessiccation...) [12].

II.4.3.2.6 Diagenèse des minéraux argileux

Les transformations diagénétiques affectent particulièrement les minéraux argileux en raison de leur taille, de leur surface spécifique élevée, et de leur structure feuilletée facilitant les échanges d'ions entre le minéral et son entourage. L'ensemble des phénomènes diagénétiques conduit à la formation d'un matériau dont les propriétés dépendront, en grande partie de l'intensité du phénomène qui s'est produit.

II.4.3.2.7 L'altération des marnes

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

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

- La détérioration des propriétés mécaniques ;
- La diminution du poids volumiques sec ;

- La modification des caractéristiques chimiques ;
- L'apparition des fissures ;
- Le chargement de couleur de l'état naturel ;
- L'augmentation de la teneur en eau de saturation.

II.4.4 Principaux problèmes des sols fins

Les sols fins, contiennent des proportions notables d'argiles et de limons, qui influent sur ses propriétés géotechniques intrinsèques.

Ils gonflent et deviennent plastiques en présence d'eau, se rétractent avec la sécheresse, et foisonnent sous l'effet du gel. Alors, ces sols sont considérés comme mauvais ou médiocres. Dans de nombreux pays du monde, le gonflement est à l'origine de fréquents désordres des ouvrages légers. En Algérie l'urbanisation de certains quartiers des villes et la construction des routes se heurtent aux problèmes que posent les phénomènes de gonflement, tassement, et de glissement [18].

II.4.4.1) Phénomène de Gonflement

Le retrait-gonflement des argiles est lié aux variations de teneur en eau des terrains argileux : ils gonflent avec l'humidité et se rétractent avec la sécheresse. Ces variations de volume induisent des tassements plus ou moins uniformes et dont l'amplitude varie suivant la configuration et l'ampleur du phénomène. Sous une habitation, le sol est protégé de l'évapotranspiration, et sa teneur en eau varie peu dans l'année. De fortes différences de teneur en eau vont donc apparaître dans le sol au droit des façades [18].

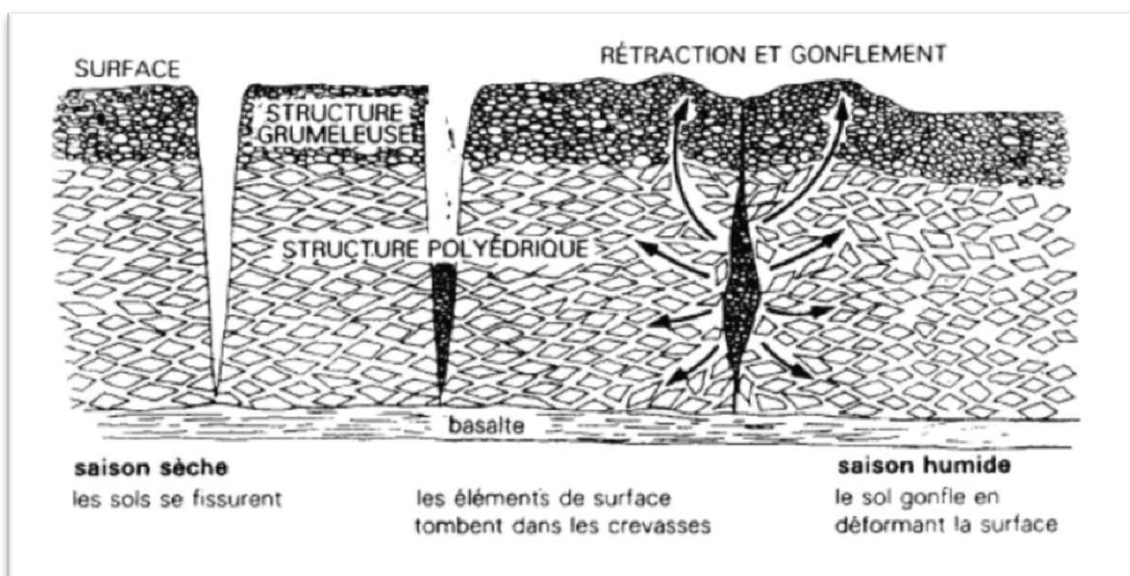


Figure II.1 : Conséquence du gonflement des argiles dans la destruction d'un sol [13].

II.4.4.2 Tassements

Le tassement du sol est sa déformation verticale due à l'application des contraintes extérieures telles que les remblais, les fondations ou son propre poids. Les tassements peuvent être uniformes ou différents d'un point à l'autre selon la nature du sol en place [18].

II.4.4.3 Glissements

Un glissement de terrain correspond à un déplacement généralement lent (de quelques mètres par an à quelques millimètres par jour) sur une pente, le long d'une surface de rupture dite surface de cisaillement, d'une masse de terrain cohérente, de volume et d'épaisseur variables : quelques mètres cubes dans le cas du simple glissement de talus ponctuel à quelques millions de mètres cubes dans le cas d'un mouvement de grande ampleur pouvant concerner l'ensemble d'un versant [18].

II.4.5 Conséquences enregistrées

Les désordres provoqués par le gonflement affectent généralement les constructions apportant de faible contrainte sur le sol support. La pathologie dépend du type d'ouvrage. Les phénomènes de retrait et de gonflement de certains sols argileux ont été observés depuis longtemps dans les pays à climat aride et semi-aride où ils sont à l'origine de nombreux dégâts causés tant aux bâtiments qu'aux réseaux et voiries [18].

II.4.5.1 Cas des bâtiments

Pour les structures de génie civil on peut observer les désordres suivants : Fissuration des structures, Distorsion des ouvertures, Rupture des canalisations et Décollement des bâtiments [18].



Figure II.2 : Vue partielle d'un alignement de constructions ayant subi des basculements à Boudraa Salah [14].

II.4.5.2 Cas des Chaussées

Le gonflement peut provoquer des désordres importants à la structure de la chaussée. Le désordre subis par la chaussée se résume généralement à des fissures qui apparaissent à la fin de la saison sèche sur ses accotements. En saison de pluie ces fissures permettent à l'eau de s'infiltrer plus facilement entraînant la saturation de ces zones et par conséquent leur gonflement, engendrant ainsi l'apparition de déformation à la surface de la chaussée, puis l'apparition de fissures longitudinales qui peuvent être assimilées à la chute de la portance dans les zones latérales de la chaussée entraînant l'affaissement des bords. Ces phénomènes sont accélérés par le flux routier. Ces désordres s'amplifient avec le début de la saison sèche.



Figure II.3 : Dégradation des routes [15].

II.4.5 Relations entre caractéristiques du sol et les propriétés thermiques

La température du sol est influencée à l'échelle locale par des échanges avec l'atmosphère (flux radiatif avec le ciel, convection due au vent, degré hygrométrique de l'air...), ces éléments varient dans le temps et dans l'espace, Cependant le sol a une grande inertie thermique de par sa masse et son volume. Si la surface du sol se réchauffe et se refroidit presque instantanément, les couches plus profondes mettent plus de temps à se modifier, mais en général, l'amplitude thermique saisonnière ou journalière diminue avec la profondeur. Si le changement de température des couches superficielles est pratiquement instantané, celui des couches profondes se fera avec un décalage dans le temps qui dépend de la texture de la porosité et d'humidité du sol. La réaction physique du sol à la sécheresse et aux canicules concerne essentiellement les paramètres suivants :

- La dynamique du profil hydrique ;
- La dynamique du profil salin ;

- La réorganisation structurale du sol ;
- Le flux thermique du sol vers l'atmosphère.

Ces paramètres sont en relation avec les caractéristiques du sol (texture, type d'argile, humidité, structure, salinité, gypse, qualité et doses d'irrigation et couleur du sol, recouvrement du sol...), l'intensité du réchauffement et le degré hygrométrique de l'air. Ils entraînent des changements au niveau du comportement et du fonctionnement du sol et de la couverture végétale ainsi qu'une augmentation anormale de la température de l'air. Les actions à mener pour s'adapter à ces phénomènes naturels que sont la sécheresse et les canicules est d'agir sur les différents paramètres cités précédemment. Le sol est le siège d'un stockage et d'un transport de chaleur qui sont déterminés par ses propriétés thermiques qui sont la capacité et la conductivité thermiques [16].

II.4.5.1 La capacité thermique des sols

La température du sol dépend de la quantité de chaleur reçue et de la quantité de chaleur perdue. L'énergie solaire est le principal facteur. La capacité thermique caractérise l'aptitude d'un matériau à stocker la chaleur, les sols riches en matière organique (MO) peuvent stocker plus de chaleur que les sols pauvres. De même du point de vue du comportement thermique les sols très hydratés et les sols riches en MO mettent plus de temps à se réchauffer que les sols secs et pauvres en MO pour un même apport d'énergie [16].

II.4.5.2 Conductivité thermique du sol

Le transfert de chaleur dans le sol a lieu par convection et par conduction et se traduit par un transport de la chaleur. Il se révèle que les sols riches en MO conduisent mal la chaleur. Ils se réchauffent et se refroidissent lentement. La conductivité est une fonction croissante de la teneur en eau, mais différente selon les constituants. Un sol saturé en eau se réchauffe et se refroidit plus vite et plus pour les sols sableux que pour les sols riches en MO [16].

II.5 Conclusion

On peut conclure que l'évolution des sols fins est due à la présence des minéraux argileux dans les sols tels que : les marnes, les argiles, etc. Qui manifestent une grande sensibilité à l'air (retrait et fissuration désagrégation progressive des couches de sol...) et une forte affinité pour l'eau (avec les conséquences classiques de l'humidification : gonflement, déconsolidation, perte des caractéristique mécaniques...).



Chapitre III

Chapitre III : La dimension fractale et ses méthodes de calcul

III.1 Introduction

Diverses définitions des objets fractals ont été proposés, ces définitions mathématiques sont parfois un peu formelles et pas toujours très parlantes au premier abord pour le physicien. Pour une structure fractale donnée, elles fournissent la plupart du temps la même valeur pour la dimension fractale, mais ce n'est pas toujours le cas, certaines de ces définitions peuvent cependant s'avérer plus commodes ou plus précises que d'autres pour le calcul, ou plus pointues pour caractériser une propriété physique.

III.2 Définition des fractales

Le mot « fractale » est inspiré du mot latin « fractus » qui signifie irrégulier ou brisé ce sont des objets infinis possédant une structure géométrique répétitive et autosimilaire.

Le terme « fractal » a été introduit par B.B. Mandelbrot (fractal, c'est-à-dire qui a été fractionné à l'infini, du latin « fractus » dérivé du verbe « franger », briser). Une définition à la fois précise et générale d'un objet fractal est difficile, nous le définirons avec Mandelbrot comme un ensemble qui présente des irrégularités à toutes les échelles [17].

III.3 Exemple de fractals

III.3.1 Corps humain

On entend par structure fractale dans la nature des motifs particuliers dont la reproduction récursive génère une autosimilarité entre les différentes échelles d'observation. Ces structures occupent pour un volume fini un espace maximal, sans interférence entre les éléments du motif de la fractale. Dans le corps humain, on découvre régulièrement de nouvelles preuves montrant que notre organisme est fractal. Le premier organe identifié comme tel fut le système pulmonaire. Cette organisation permet principalement de pousser les capacités d'échanges à leur maximum en intégrant une surface la plus grande possible dans un volume faible [17].

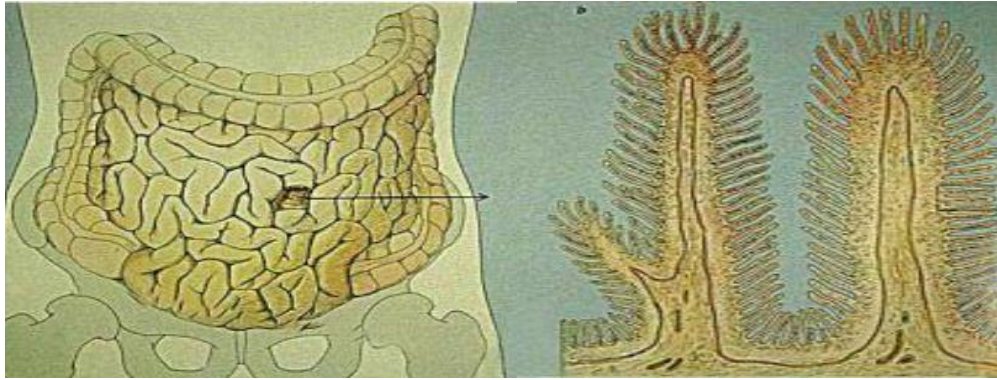


Figure III.1 : Vue de l'ensemble de l'intestin grêle et détail de la paroi intestinale [18].

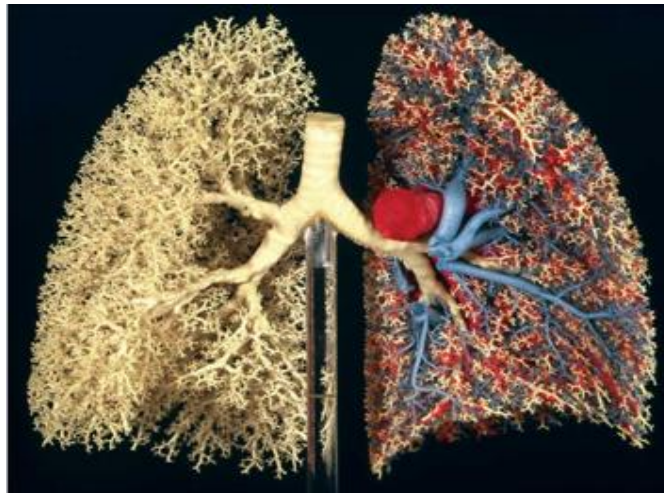


Figure III.2 : Système pulmonaire [18].

III.3.2 Dans la nature

De nombreux objets naturels ressemblent à des fractales. Comme le chou ou la fougère. Mais ces objets naturels ne sont pas de vraies fractales, puisque leur complexité n'est pas infinie. La complexité s'arrête au niveau de l'atome, et non au niveau de l'infiniment petit. De même, elle ne s'étend pas dans l'infiniment grand [18].

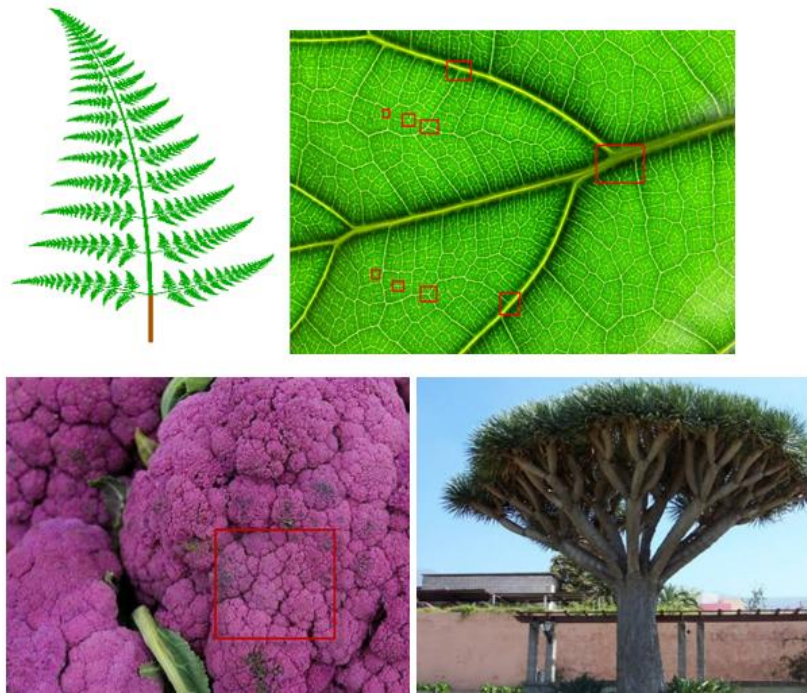


Figure III.3: Quelques formes fractales dans la nature [18].

➤ Les nuages

Le nuage, qui se forme par condensation de la vapeur d'eau, présente un contour morcelé et brisé qui possède le même motif lorsque l'on change d'échelle, il a une surface ayant une courbure fractale [23].

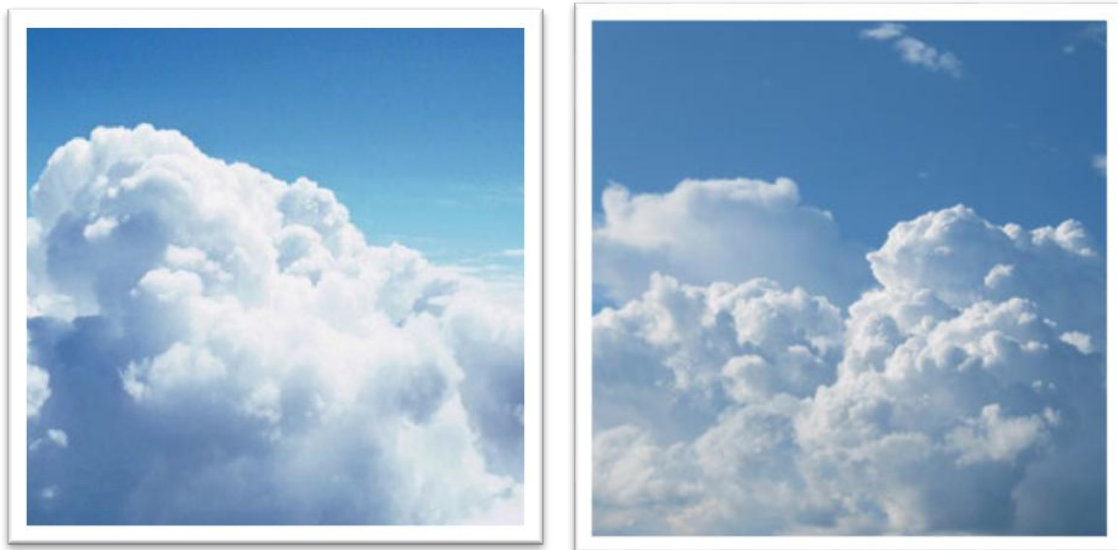


Figure III.4: Les nuages (exemple des structures fractales) [18].

➤ **Les rivières, fleuves et cours d'eau**

De fait, lorsque l'on observe d'une vue satellite un fleuve. On voit des rivières qui se jettent dedans, des petites rivières qui se jettent dans ces rivières, des ruisseaux qui se jettent dans ces petites rivières, etc. la formation des fleuves est due à l'écoulement de l'eau, qui se fraye un chemin dans le paysage minéral de manière fractale. Ainsi un fleuve et ses affluents sont un exemple de la fractalité du monde géologique.

De plus, les tracés réalisés par les réseaux hydrographiques ont des formes de fractales.

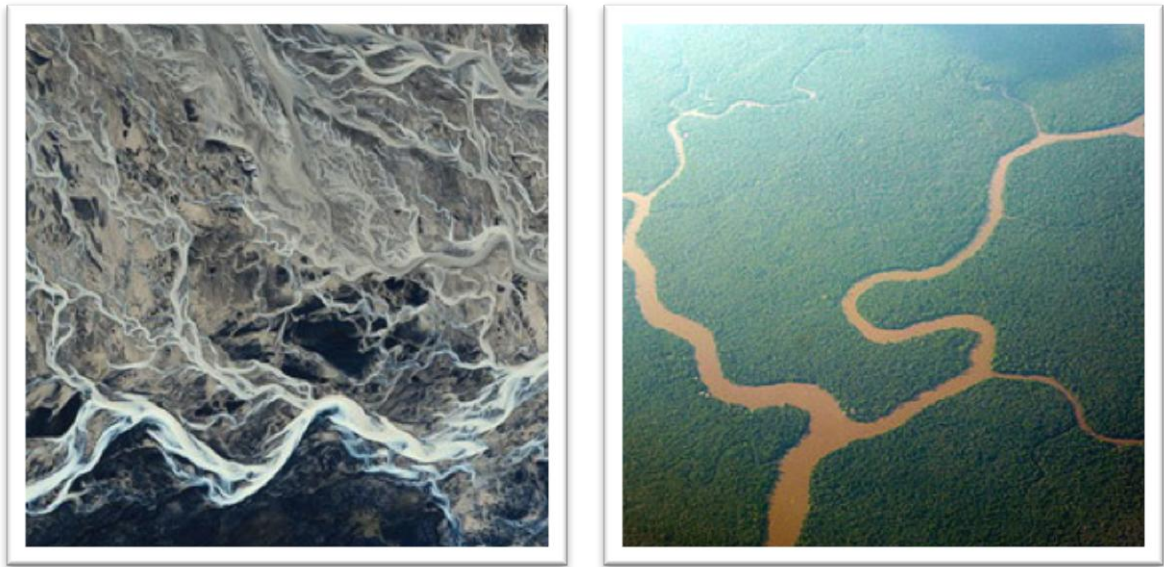


Figure III.5 : Image d'un réseau hydraulique [18]. **Figure III.6 :** Image d'un fleuve d'eau [18].

➤ **Les éclairs et la foudre**

L'éclair se produit pendant un orage, tout d'abord parce que nous l'avons vu les charges négatives dans les nuages se sont accumulées en suffisante quantité. Mais aussi parce qu'il pleut et que l'eau, est conductrice de l'électricité. En effet, l'éclair va chercher le moyen le plus simple d'accéder au sol, pour rétablir le déséquilibre de charges. Ainsi, l'éclair se fraye un chemin de gouttes d'eau en gouttes d'eau, chaque fois allant vers le bas en passant par la goutte d'eau la plus proche. Lorsque deux gouttes d'eaux sont sensiblement à la même distance, l'éclair se divise. Ainsi, la position des gouttes d'eau étant aléatoire, l'éclair se forme aléatoirement dans l'air en ayant une structure fractale [18].



Figure III.7 : Image des éclairs [18].

➤ **La géométrie des fractures, des fragmentations et des fissures**

Les fissures ou les fractures provoquées par l'eau, la sécheresse ou encore les forces de compression donnent des motifs que nous connaissons bien sur la terre ou les roches [23].

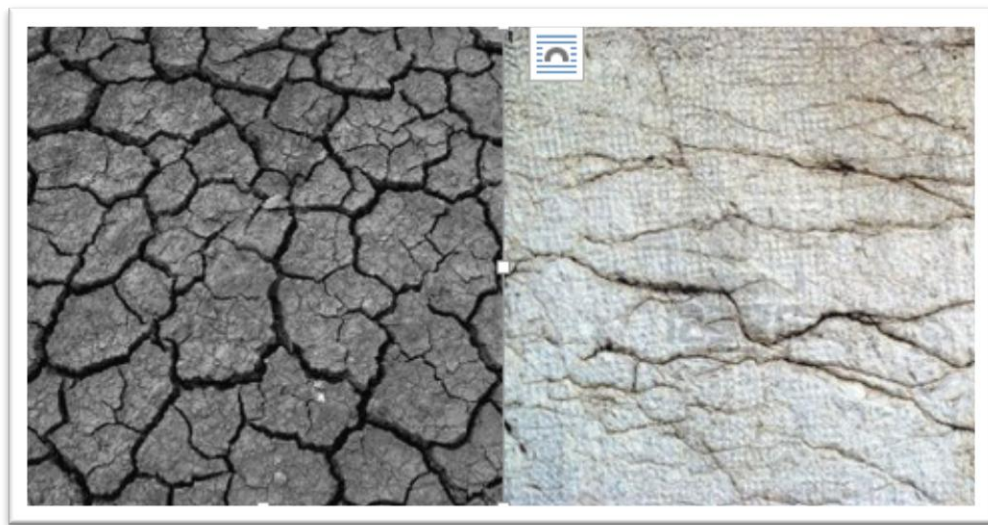


Figure III.8: Image des fissures et fractures dans le sol [18].

III.4 Dimension fractale

La dimension fractale est un nombre qui mesure le degré d'irrégularité ou de la fragmentation d'un objet, ou la mesure de la rugosité d'une surface, et cette notion de dimension fractale est appliquée aux objets invariants d'échelle.

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

III.4.1 Dimension euclidienne ou topologique

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

Exemple : La dimension d'un point est zéro (0), une ligne droite a pour support un espace de dimension un (1), un plan est un espace de dimension deux (2), un volume est inscrit dans un espace de dimension trois (3).

On remarque qu'il existe un lien direct entre la dimension de l'objet étudié et son unité de mesure, un objet de dimension deux se mesure en m² et un objet de dimension trois en m³ et ce n'est pas forcément le cas pour une courbe fractale [19].

III.4.2 Le calcul de la dimension fractale en génie civil

Le calcul de la dimension fractale est l'une des caractéristiques principales de la géométrie fractale, elle a été utilisée dans de très nombreux domaines d'applications aussi variés qu'en Astronomie, la Biologie et le Génie Civil où plusieurs chercheurs ont pu développer la notion de la géométrie fractale pour modéliser la structure poreuse du sol, décrire les fissures dans les roches ainsi que le calcul de la dimension fractale des grains constituant le sol, bien qu'elle décrit bien l'irrégularité d'un grain de matériau granulaire.

Les méthodes du calcul les plus courantes sont :

- La méthode des masses.
- La méthode des lignes parallèles.
- La méthode de Line Dévider (méthode du diviseur) Selon Mandelbrot.
- La méthode Surface-Périmètre (Area-Perimeter).

Mais les nouvelles méthodes choisies à appliquer dans notre étude sont les suivantes :

III.4.2.1 Méthode de comptage des boîtes (box counting)

Cette méthode est la plus fréquemment utilisée et la plus populaire en pratique.

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 boîtes et compté, et on refait la même opération mais cette fois avec des boîtes de tailles décroissantes ainsi de suite...

Cette méthode est basée sur le principe que l'image du grain correspond au nombre de boîte en fonction de ses tailles, et cette relation est représentée par la formule suivante :

$$N(X>x) = Kx^{-D_{FR}} \quad (III.1)$$

- x : dimension des boîtes
- $N(X > x)$: nombre des boîtes
- K : constante
- DF : dimension fractale

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

$$DF = -m$$

m : la pente de la droite la mieux adaptée à l'équation [20].

III.4.2.1.1 Calcul de la dimension fractale du contour du grain seulement

Soit un grain donné, après prise de photo et traitement d'image on délimite le contour du grain et on lui applique le maillage par des carrés de dimensions identiques prédéterminées, on remarque le contour du grain et on lui applique le maillage par des carrés de dimensions identiques prédéterminées, on remarque que le contour du grain est situé à l'intérieur des grilles. Les carrés contenus dans le contour du grain sont comptés, et on refait la même opération du maillage mais cette fois-ci avec des dimensions décroissantes des cases et ainsi de suite. La dimension fractale est ainsi calculée. Ce processus est répété pour chaque grain [20].

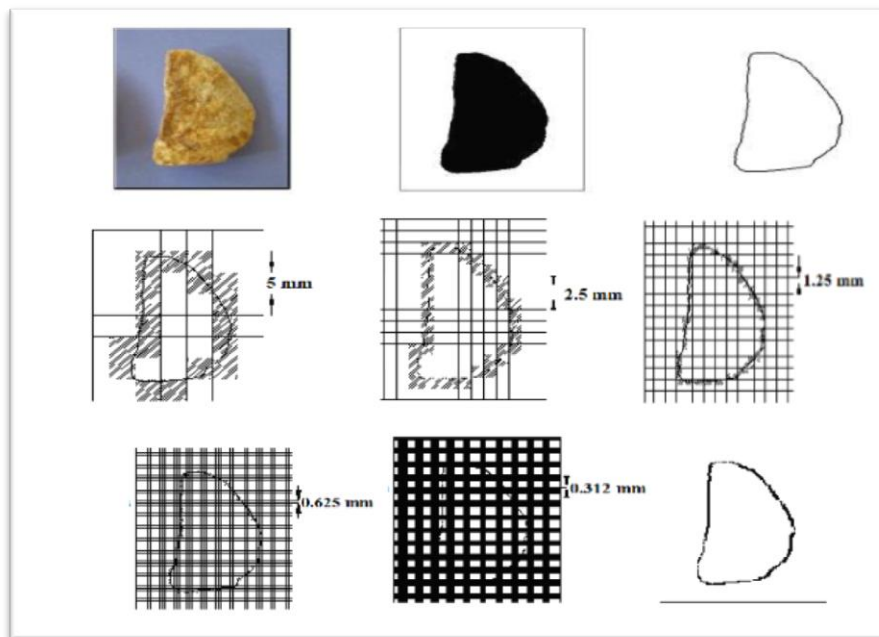


Figure III.9 : Différentes étapes de maillage de l'image du grain et illustration de la méthode de Box Counting [21].

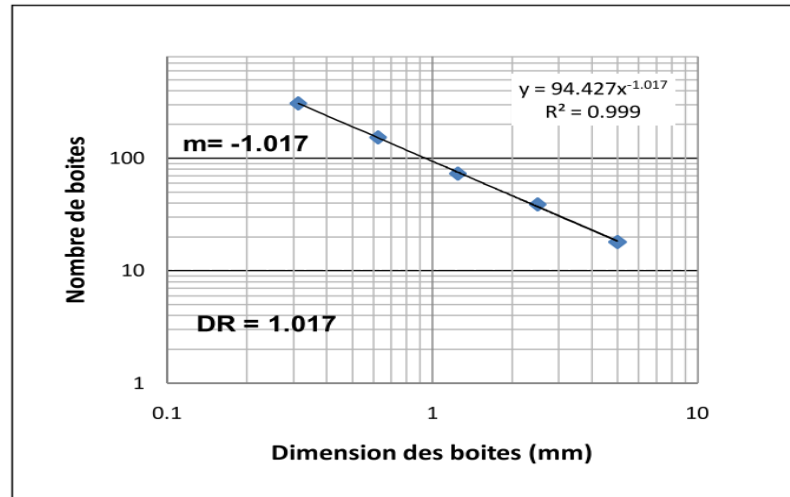


Figure III.10 : Calcul de la dimension fractale de la rugosité du grain [21]

III.4.2.1.2 Calcul de la dimension fractale de la surface intérieure du grain

Soit le même grain donné dans la figure (III.11), on refait les mêmes opérations (maillage de l'image), mais cette fois-ci avec prise en compte du nombre de boîtes se trouvant à l'intérieur de la surface du grain.

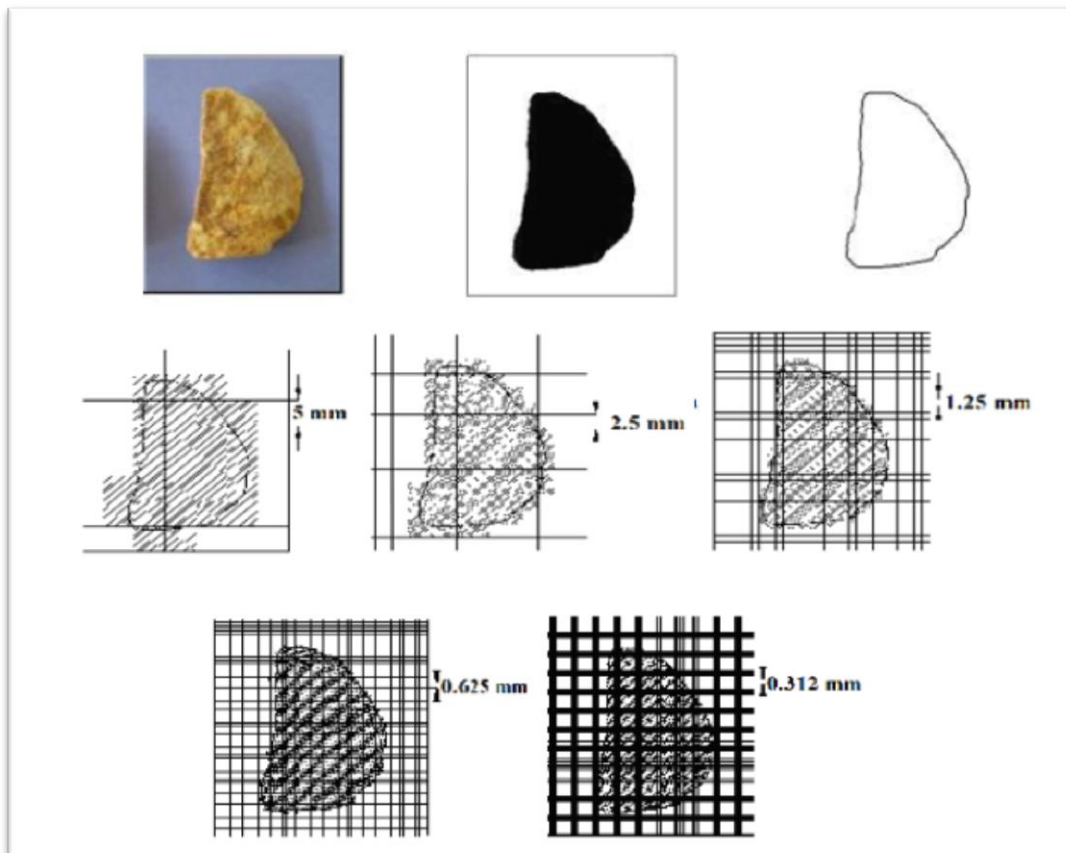


Figure III.11 : Différentes étapes de maillage de l'image du grain avec prise en compte de la surface intérieure du grain [21].

La figure (18) est l'application de la méthode de Comptage des Boîtes (Box Counting) avec prise en compte de la surface intérieure du grain. La dimension fractale calculée est une dimension de fragmentation ($DF_{FR} = -m = 0.9799$).

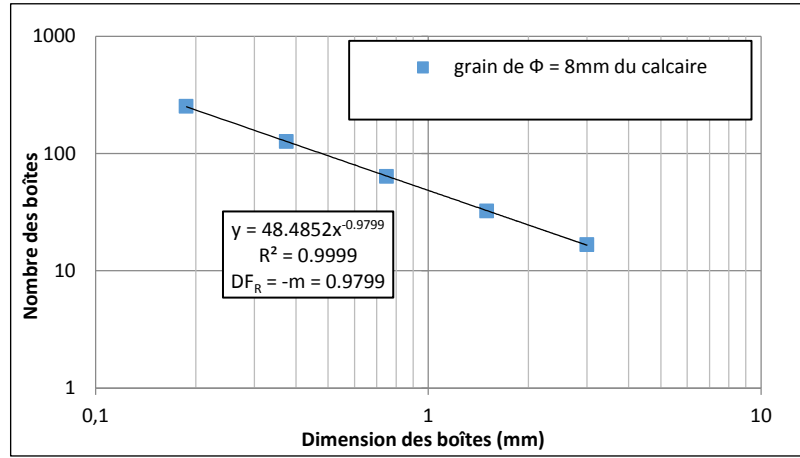


Figure III.12 : Calcul de la dimension fractale de fragmentation de la surface intérieure du grain [21].

III.4.2.2 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 [26].

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

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

Le rapport de partitionnement est alors :

$$r = \frac{s}{M} \quad (III.3)$$

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.4).

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

$$n_r(l, k) = l' - k' + 1 \quad (III.4)$$

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 [23] .

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.14). 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 [21].

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 :

$$\left(\frac{M}{2}\right) \geq s > 1, \text{ et } s' = \frac{s}{\alpha} \quad (\text{III.9})$$

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 :

$$n_r(l, k) = \begin{cases} \text{ceil} \left[\frac{(l'-k')}{s'} \right] & \text{si } (l \neq k). \\ 1 & \text{si } (l = k). \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

➤ 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 :

$$\left(\log \left(\frac{1}{r} \right), \log (N_r) \right) = \left(\log \left(\frac{1}{s} \right), \log (N_s) \right) \quad (\text{III.11})$$

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

$$s' = s = 3 \text{ et } n_r(l, k) = \left\lceil \frac{(3-2)}{3} \right\rceil = 1 \text{ cube} \quad (\text{III.12})$$

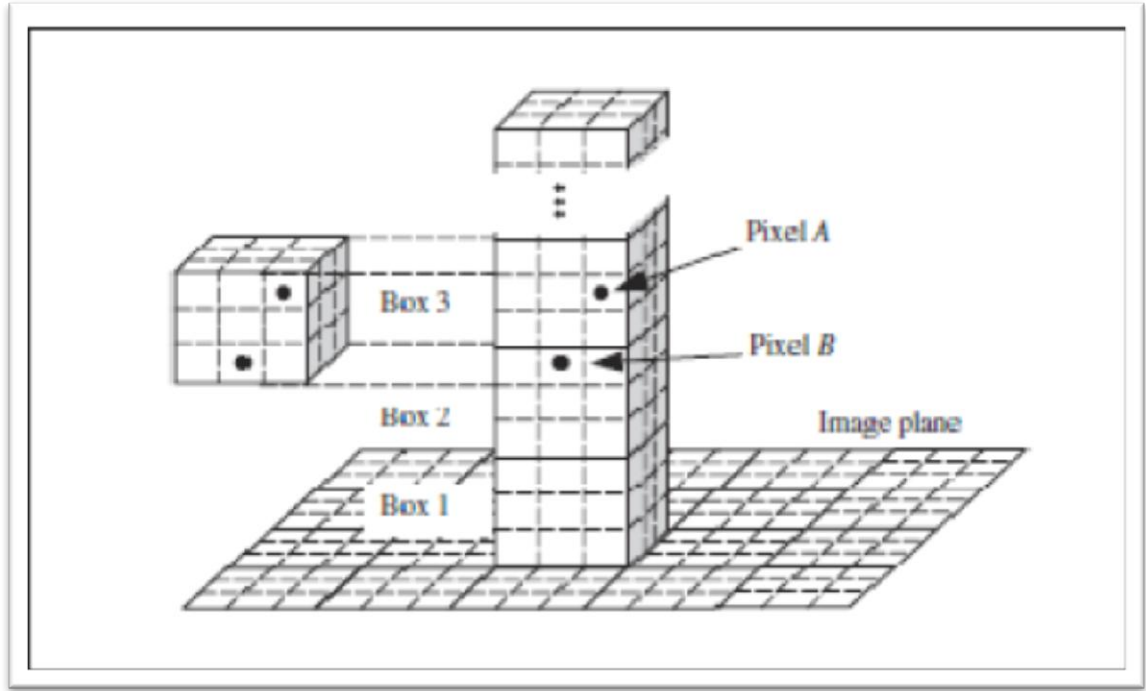


Figure III.14 : Deux pixels appartenant à deux cubes différents d'altitude 3 alors que leur distance suivant (oz) est inférieure à [23].

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 (24) se définit comme suit : pour une image de taille ($M \times M$) prenant pour

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

$$r = s \quad (III.13)$$

$$s = 2^g \quad (III.14)$$

$$g = 1, 2, \dots, \log(M) - 1 \quad (III.15)$$

$$G/s' = M/s \quad (III.16)$$

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 [28], Du [29] et Lee [30]. L'une d'elles a été proposée par Jin [31] ; elle est connue sous le nom de Relative Differential Box Counting (RBCD). Le nombre $n_s(l, k)$ est calculé comme suit :

$$n_s(l, k) = g_{\max}(l, k) - g_{\min}(l, k) \quad (III.17)$$

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.15).

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

$$N_s = \sum_{l,k} \text{ceil} \left[\frac{M \times (n_s(l,k))}{s \times G} \right] \quad (\text{III.18})$$

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

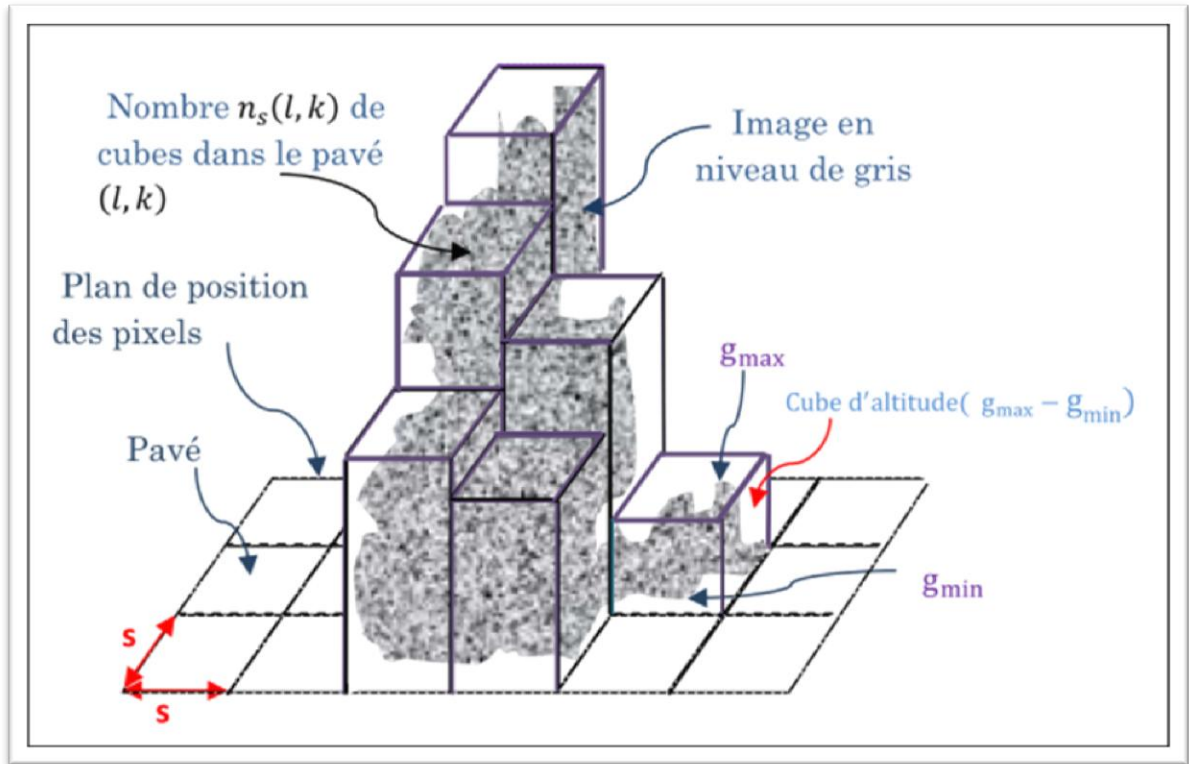


Figure III.15 : Nombre N_s de cubes qui couvre l'image [24].

Cheng [28] 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 [29], ils combinent la méthode de Jin [31] avec celle de Cheng [28] 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 :

$$n_r(i, j) = g_{\max}(i, j) - g_{\min}(i, j) \quad (\text{II.19})$$

$g_{\max}(i, j)$ 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 :

$$N_r = \sum_{i,j} \text{ceil} \left[\frac{M}{g} (n_r(i, j)) / r \right] \quad (\text{III.20})$$

Une autre modification proposée récemment par Lee et Hsieh [30] consiste à calculer $n_r(l, k)$, avec $r = s/M$, de la façon suivante :

$$n_r(l, k) = 2 \left(\frac{\sigma(l, k)}{s'} \right) + 1 \quad (\text{III.21})$$

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.

$$\sigma(l, k) = \sqrt{\frac{\sum_{i,j} (g(i, j) - m)^2}{N}} \quad (\text{III.22})$$

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) .

III.5 Conclusion :

Une fractale est une figure géométrique qui se répète infiniment à l'intérieur d'elle-même, elle est obtenue à partir d'une forme géométrique, appelée initiateur, sur laquelle on effectue la toute première modification pour obtenir une autre forme nommé générateur.



Chapitre IV

Chapitre IV : Essais d'identification

IV.1 Introduction

Cette partie expérimentale a nécessité la réalisation de plusieurs séries d'essais d'identification, 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 nous renseignent 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 notre travail les essais d'identification physique qui ont été effectués sur les deux types du sol étudiés sont :

- ❖ 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.
- ❖ L'activité de SKEMPTOM.

Ainsi qu'une analyse chimique.

IV.2 Localisation des sites des échantillons

Les matériaux utilisés dans ce travail sont des marnes qui constituent généralement les différents sols de la région du nord algérien et souvent rencontrées dans la région de la Grande Kabylie.

- ❖ Échantillon N° 01

L'échantillon N° 01 est prélevé d'un site à Mekla, projet : 143 logements promotionnels. La profondeur de sondage est entre 7,20m et 7,90m (Figure IV.1).



Figure IV.1 : Site de prélèvement de la marne de Mekla

❖ Échantillon N° 02

L'échantillon N° 02 prélevé d'un site à Ait Toudart -Daïra : Ouassif, projet : 130 logements promotionnel. La profondeur de sondage est entre 11,05m et 11,45m (Figure IV.2).

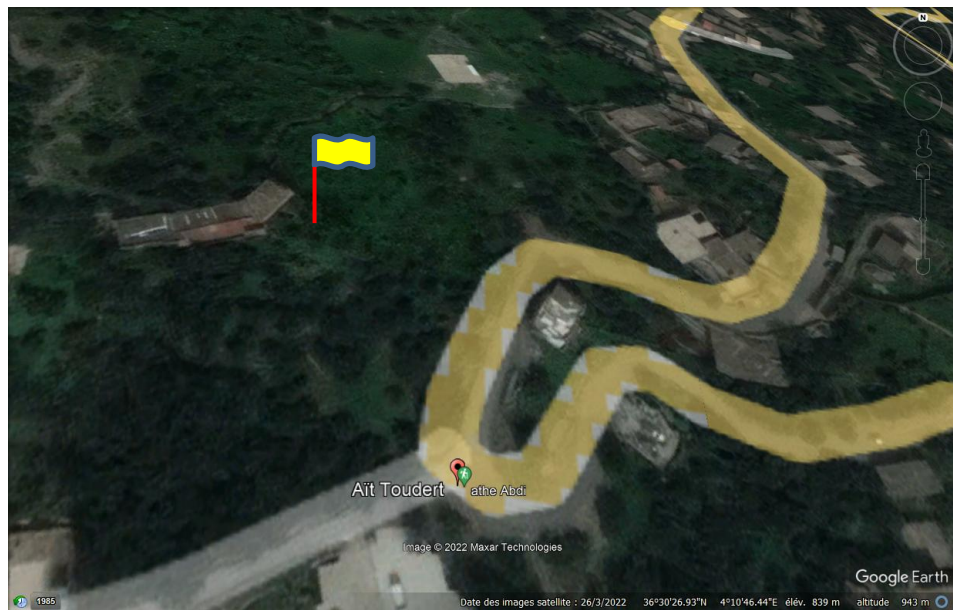


Figure IV.2 : Site de prélèvement de la marne d'Ait Toudert.

▪ Échantillon N° 03

L'échantillon N° 03 prélevé d'un site à Azazga, projet : promotion immobilière. La profondeur de sondage est entre 7,60m et 8m (Figure IV.3).



Figure IV.3 : Site de prélèvement de la marne d'Azazga.

- Échantillon N° 04

L'échantillon N° 04 est prélevé d'un site à boghni, projet : bâtiment (R+5) à usage d'habitation et service. La profondeur de sondage est entre 4m et 4,5m (Figure IV.4).



Figure IV.4 : Site de prélèvement de la marne de Boghni

- Échantillon N° 05

L'échantillon N° 05 prélevé d'un site à Oued Fali (Daïra : Draâ Ben Kheda) projet : 500/1000 logements AADL (Bloc 20). La profondeur de sondage est entre 6,55m et 7m (Figure IV.5).



Figure IV.5 : Site de prélèvement de la marne d'Oued Fali.

IV.3 Caractéristiques physiques

IV.3.1 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.

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

IV.3.2 Masse volumique des sols.

- **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 1000 kg/m³.

▪ **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.

▪ **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 :

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

IV.3.3 Indice des vides et degré de saturation :

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

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

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 (Tableau IV.1).

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

Avec :

$$Sr = \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \times \left(\frac{w}{e} \right) \quad (IV.9)$$

Tableau IV.1 : 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

IV.3.4 Les limites d'ATTERBERG (NF P 94-051)

La norme NF P94-51 (mars 1993) destinée à la détermination des deux limites d'Atterberg ; la limite de liquidité à la coupelle et la limite de plasticité au rouleau) s'applique aux sols dont les éléments ont une dimension inférieure à 0,4mm (Figure IV.6).

Ces limites sont :

- La limite de liquidité est une teneur en eau qui sépare l'état liquide de l'état plastique). Elle est fixée conventionnellement comme la valeur de la teneur en eau, exprimée en pourcentage, pour laquelle une rainure de dimensions normalisées se ferme sur une longueur de 1 cm sous l'effet de 25 chocs appliqués au moyen de l'appareil de Casagrande.
- La limite de plasticité est la teneur en eau qui sépare l'état plastique de l'état solide. Cette limite est fixée conventionnellement comme la valeur de la teneur en eau, exprimée en pourcentage, pour laquelle un rouleau de sol confectionné manuellement, à dimensions fixées se fissure.

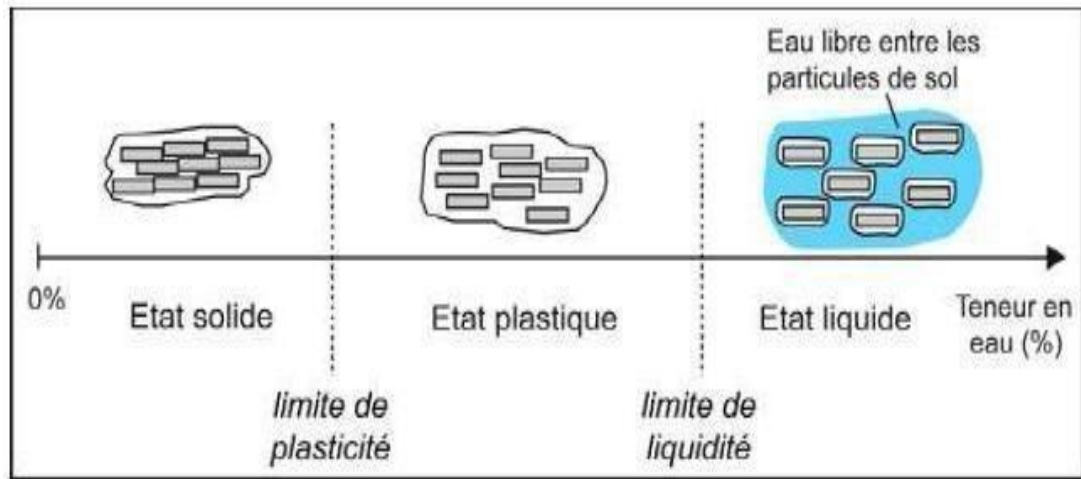


Figure IV.6 : Limites d'Atterberg [25].

▪ **La procédure de l'essai**

L'essai s'effectue en deux phases qui sont la recherche de la limite de liquidité à la coupelle de Casagrande et la recherche de la limite de plasticité au rouleau.

Pour la préparation de l'échantillon, 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 μm . 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.

A-1) La détermination de la limite de liquidité :

L'essai se fait au moyen d'un appareil normalisé, appelé coupelle de Casagrande. Cet appareil est constitué d'une coupelle d'une dizaine de centimètres de diamètre, d'un socle rigide et d'un système cranté permettant de soulever et de laisser retomber la coupelle, d'une hauteur constante fixée à 10 mm, à raison de deux coups par seconde.

Après le contrôle du fonctionnement de l'appareil et de la pointe de l'outil à rainurer qui doit être inférieure à 2,2 mm, tout en réglant la hauteur de chute de la coupelle, on malaxe la totalité du tamisât afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide avec une spatule, on étend une masse de pâte sur la coupelle qui doit être propre et sèche. Cette dernière est étalée en plusieurs couches pour éviter d'emprisonner les bulles d'air, présentant à la fin de l'opération un aspect symétrique. Ensuite, on trace une rainure à l'aide de l'outil à rainurer en forme de V, comme est indiqué dans la figure suivante (Figure IV.8) :



Figure IV.7 : Coupelle de Casagrande.

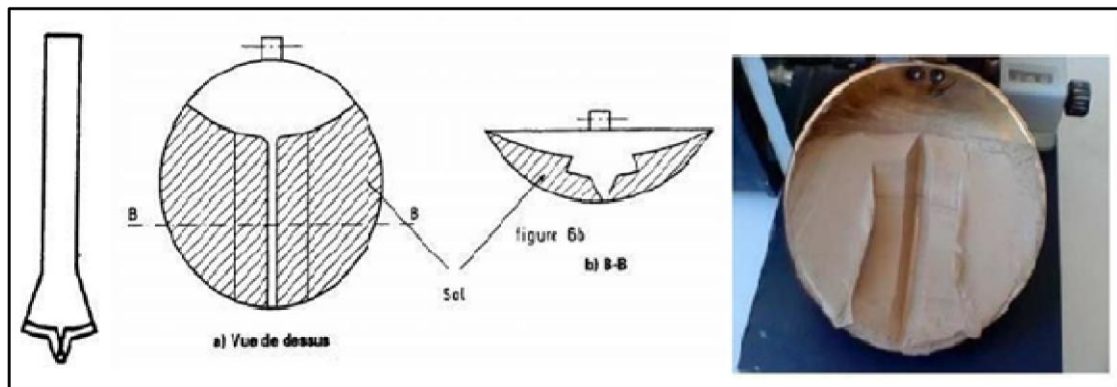


Figure IV.8 : La fermeture de la rainure [29].

On imprime à la coupelle une série de chocs, tout en comptant le nombre qui doit être compris entre 15 et 35, nécessaires pour que les lèvres de la rainure se rejoignent sur une longueur d'environ 1cm (Figure IV.9).

Enfin, on prélève une quantité de sol de chaque côté des lèvres de la rainure et au voisinage de l'endroit où elles se sont refermées, afin de déterminer la teneur en eau. L'essai est renouvelé 4 fois pour différentes teneurs en eau obtenues soit par assèchements, soit par addition d'eau, de façon à couvrir une plage de coups allant de 15 à 35.

- **La détermination de la limite de plasticité :**

La teneur en eau au point de transition entre les états plastique et solide. C'est la teneur en eau conventionnelle d'un rouleau de sol qui se fissure au moment où son diamètre atteint $3 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ de diamètre et une longueur de 10 à 15 cm (Figure IV.9).

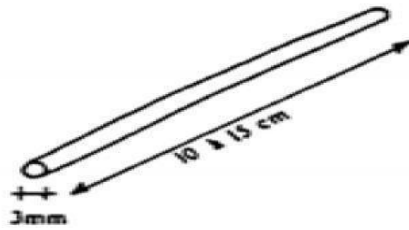


Figure IV.9 : La confection du rouleau [30].

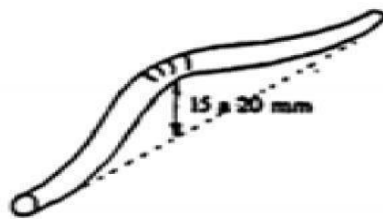


Figure IV.10 : La fissuration et brisure du rouleau [30].

▪ 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.

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

▪ 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.2 : L'indice de consistance.

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

IV.3.5 L'activité AC :

La granulométrie, caractérisée par le pourcentage des grains dont la dimension est inférieure à $2\mu\text{m}$ (proportion d'argile F2: % $< 2\mu\text{m}$) nous aide à calculer l'activité (A_c) de SKEMPTON selon la norme **NF P94-056** en utilisant l'équation suivante :

$$\text{L'activité de Skempton : } A_c = I_p / F_2. \quad (\text{IV.12})$$

Tableau IV.3 : Classes de l'activité A_c .

Activité A_c	Dénomination
$0 < A_c < 0,5$	Inactif
$0,5 < A_c < 0,75$	Peu actif
$0,75 < A_c < 1,25$	Normal
$1,25 < A_c < 2$	Actif
$2 < A_c$	Très actif

IV.3.6 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 (Figure IV.12)

Si le test est positif, la zone humide est teintée de bleu c'est-à-dire on arrête le dosage. (Figure IV.13)



Figure IV.11 : Déroulement de l'essai au bleu de méthylène.



Figure IV.12 : Tache avec zone humide incolore.

Figure IV.13 : Tache avec zone humide teintée en bleu.

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

$$\text{VBS} = \frac{Mb}{Ms} \times 100 \quad (\text{IV.13})$$

Avec : $Mb = V \times 100$ (IV.14)

Mb : la masse de bleu permettant la saturation par adsorption (g).

Ms : la masse sèche de la prise d'essai (g).

V : le volume de solution de bleu utilisée (cm³).

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

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

IV.3.7 Tableau des résultats

Tableau IV.5 : Différents caractéristiques physique des matériaux étudiés.

Site	W %	ρ_s (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_h (g/cm ³)	e	Sr %	Ip %	Ic	AC	VBS	WL %
Ouad Fali	11,47	2,41	1,94	2,17	0,121	83,03	15	1,76	1,25	8,33	38
Appréciation	Moyenne	/	Dense	Humide	Très Compactée	Détrempée	Peu Plastique	Dure	Active	Très argileuse	/
Mekla	12,34	2,5	1,93	2,17	0,798	87,62	26	1,44	0,67	11,6	50
Appréciation	Moyenne	/	Dense	Humide	Moins compacte	Détrempée	Peu Plastique	Dure	Peu active	Très argileuse	/
Azazga	19,17	2,17	1,74	2,07	0,785	97,16	26	1,18	0,67	6,66	50
Appréciation	Moyenne	/	Moyenne	Légèrement humide	Moins compacte	Détrempée	Peu Plastique	Dure	Peu active	Argileuse	/
Boghni	26,34	2,67	2,04	2,25	0,770	81	24,12	0,978	1,22	8,33	48
Appréciation	élevée	/	Dense	Légèrement humide	Moins compacte	Détrempée	Peu Plastique	Mi Dure	Normal	Très Argileuse	/
Ait Toudert	14,14	2,35	1,88	2,15	0,632	78	16,34	1,70	0,65	6,66	42
Appréciation	Moyenne	/	Dense	Humide	Moins compacte	Détrempée	Peu Plastique	Dure	Peu active	Argileuse	/

Après les essais physiques réalisée, on constate que les échantillons relevés sont des sols argileux à très argileux (Tableau IV.5), c'est la raison d'avoir un potentiel de gonflement moyen et un potentiel de retrait élevé, son comportement plastique dur est conditionné que le sol est compacté (l'indice des vides est faible) et partiellement saturé avec une teneur en eau moyenne.

IV.4 L'analyse chimique :

Ces essais ont été réalisés au laboratoire LNHC de Bouira.

IV.4.1 Teneur en carbonate de calcium CaCO_3 (NF P 94 – 048) – Méthode du calcimètre

▪ Principe de l'essai

L'essai consiste à déterminer le volume de dioxyde de carbone (CO_2) dégagé sous l'action d'acide chlorhydrique en excès (dans des conditions de température et de pression atmosphérique connues) par un échantillon préparé pour l'essai.



Figure IV.14 : Appareil de détermination de CaCO_3 .

▪ Mode opératoire

La détermination de la teneur en CaCO_3 s'effectue au calcimètre Dietrich-Fröling.

- En première étape : L'essai consiste à mesurer à l'aide d'une burette à gaz le volume de CO_2 dégagé par la réaction du HCl d'un volume de 10 ml sur le carbonate de calcium de contenu 1g.
- En deuxième étape : soit une prise d'échantillon de masse 1g passant au tamis de 0.2mm diluée dans une solution de CaCO_3 ce qui donnera par la suite un volume de CO_2 . L'acide chlorhydrique dilué décompose le carbonate de calcium selon la réaction :



Figure IV.15 : Principales étapes de la méthode de calcimètre.

La teneur en CaCO_3 d'un sol fin est un bon indice de sa résistance mécanique et de sa sensibilité à l'eau. Suivant la valeur de cette teneur, le comportement du sol évolue depuis celui d'une argile jusqu'à celui d'une roche, la valeur de transition étant aux alentours de 6070%. En complément de leur classification géotechnique.

Tableau IV.6 : La description des sols en fonction de leur teneur en CaCO_3 .

Teneur en CaCO_3 (%)	Désignation du sol
0-10	Argile
10-30	Argile marneuse
30-70	Marne
70-90	Calcaire marneux
90-100	Calcaire

IV.4.2 Teneur en matières organiques-(NF P 94-047) - Méthode par calcination :

Certains sols, issus de dépôts géologiquement récents, peuvent contenir de la matière organique. On les identifie in situ à leur couleur grise à noire, à la présence de débris végétaux et à leur odeur.

Au laboratoire, la teneur globale en matière organique se mesure sur le résidu passant au tamis 0,4 mm, préalablement séché à 65°, que l'on fait réagir à l'eau oxygénée. Un deuxième étuvage permet par différence de connaître le poids et donc la teneur en matière organique.



Figure IV.16 : Détermination de la teneur pondérale en matières organiques.

Au-delà de 2 à 3 % de matière organique, l'utilisation des sols en remblais peut engendrer des problèmes de tassements à long terme. Les sols contenant plus de 5 % de matière organique sont à proscrire.

Tableau IV.7 : Description des sols en fonction de leur teneur en matières organiques.

Teneur en matière organique (%)	Désignation en géotechnique
0-3	Sol inorganique
3-10	Sol faiblement organique
10-30	Sol moyennement organique
>30	Sol très organique

IV.4.3 Sulfates solubles dans l'acide -selon la norme NF EN 1744-1 (P 18-660-1)

▪ Principe de l'essai

Les sulfates, extraits à l'acide chlorhydrique dilué à partir d'une prise d'essai du granulat, sont dosés par gravimétrie.

La teneur en ion sulfate est exprimée en pourcentage de masse du granulat.

▪ Préparation de la prise d'essai

Concasser et réduire le sous-échantillon par étapes. Broyer ensuite continuer à réduire jusqu'à obtenir une masse d'environ 20 g passant au tamis étalon de 0,125 mm. Prendre environ 2 g de cette matière comme prise d'essai. Si un séchage est nécessaire en cours de préparation, la température ne devra pas dépasser $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ pour éviter l'oxydation des sulfures.



Figure IV.17 : Détermination des sulfates solubles dans l'acide.

Tableau IV.8 : Définition des classes d'agressivité des sols en fonction de la teneur en sulfates SO_4

Teneur en sulfates SO_4^- (%) dans le sol sec	Degré d'agressivité	symbole	Niveau de protection
0,24-0,6	Faiblement agressif	A1	1
0,6-1,2	Moyennement agressif	A2	2
1,2-2,4	Fortement agressif	A3	2
>2,4	Très fortement agressif	A4	3

IV.4.4 Chlorures solubles dans l'eau-NF EN 1744-1 (P 18-660-1)

Une prise d'essai d'un granulat est traitée à l'eau pour en extraire les ions chlore. La méthode d'analyse du soluté est basée sur le titrage de Volhard, où l'on ajoute à la solution contenant les chlorures un excès d'une solution de nitrate d'argent ; la quantité n'ayant pas réagi est titrée en retour par une solution étalon de Thiocyanate, en employant une solution de sulfate d'ammonium et de fer comme indicateur. Les chlorures sont exprimés et rapportés en teneur en ion chlore en pourcentage massique du granulat.



Figure IV.18 : Détermination des chlorures solubles dans l'eau.

IV.4.5 Tableau des résultats

Tableau IV.9 : Différentes caractéristiques chimiques.

Site	Compositions chimiques			
	CaCO ₃ (%)	Matière organique (MO)	SO ₄ (%)	CI(%)
Ouad Fali	21,80	2,63	traces	traces
Désignation géotechnique	Argile marneuse	Sol inorganique	/	/
Mekla	traces	2,50	traces	traces
Désignation géotechnique	/	Sol inorganique	/	/
Azazga	5,50	2,62	0,06	0,071
Désignation géotechnique	Argile	Sol inorganique	Faiblement agressif	Pas d'agressivité
Boghni	0,84	2,09	0,49	0,14
Désignation géotechnique	argile	Sol inorganique	Faiblement agressif	Pas d'agressivité
Ait Toudert	4,55	2,85	Traces	0,48
Désignation géotechnique	Argile	Sol inorganique	/	Pas d'agressivité

Les résultats obtenus de l'analyse chimique (Tableau IV.9), montrent que tous les matériaux étudiés 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.

Remarque

Les résultats obtenus de l'analyse chimique (Tableau IV.9), montrent que tous les matériaux étudiés ne sont pas des marnes mais c'est des argiles.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents résultats des essais d'identifications réalisés au laboratoire, ce qui nous a permis d'avoir une idée sur la nature physique et chimiques de nos échantillons de sol étudiés.



Chapitre V

Chapitre V : Étude des effets climatiques au laboratoire

V.1 Introduction

Après avoir identifié nos sols, dans ce chapitre on passe à la présentation et l'interprétation des résultats obtenus dans les deux essais climatiques (essais aux canicules et essai de dégradabilité) réalisés dans cette étude, pour pouvoir ensuite calculer la dimension fractale de ces échantillons.

Ces essais ont été réalisés au laboratoire de recherche **LGEA**, de l'université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou.

V.2 Préparation des échantillons

- On ramène les échantillons et on les coupe en des tronçons de dimensions supérieures à celle de l'anneau de la boîte circulaire de l'essai du cisaillement direct.
- On place l'anneau sur le tronçon et on presse manuellement.
- Les échantillons sont taillés jusqu'à obtenir une surface lisse avec un diamètre de 63 mm et une hauteur de 25,4 mm (les mêmes dimensions de l'anneau) (Figure V.1).



Figure V.1 : Préparation des échantillons.

V.3 Les essais réalisés

Les essais réalisés représentent l'effet de climat sur le sol.

- Essai aux canicules.
- Essai de dégradabilité.

V.3.1 Essai aux canicules

V.3.1.1 Principe d'essai

Après avoir imbibé les échantillons à la température ambiante, ils sont soumis à 10 cycles de 24h. Chaque cycle comporte un refroidissement à 20 °C et un réchauffement à une température de 57°C.

V.3.1.2 Appareillage

Les éléments constituant l'appareillage sont :

- étuve ventilée (65 ± 5) °C ;
- tares, les barques ;
- balance de précision ;
- eau distillée.

V.3.1.3 Déroulement d'essai :

Après avoir préparé les échantillons, il y a une procédure à suivre avant de poser les échantillons dans l'étuve, cette procédure est composée de 3 étapes :

- 1^{er} étape représente la saison d'hiver, on a imbibé les échantillons jusqu'à saturation à la pression atmosphérique pendant trois jours (15ml, 10ml, 5ml), on ajoute une quantité d'eau chaque 1h 30mn (Figure V.2).



Figure V.2 : Saturation d'un échantillon à l'aide d'une seringue.

- 2^{eme} étape qui représente l'été, sécher les échantillons à l'étuve pendant 24h à 65°C jusqu'à avoir une masse constante.

Et la dernière étape, les échantillons sont soumis aux canicules du mois de Juillet et le mois d'aout mois les plus chauds de l'année, le programme est comme suivi :

- Une température de 57c°, et un degré d'humidité constant (provoqué par des barques remplis d'eau posé dans l'étuve) pendant 10h.
- Une température de 20c°, le degré d'humidité constant (provoqué par des barques remplis d'eau posé dans l'étuve) pendant 14h.

La procédure porte 10 cycle de réchauffement/refroidissement dont le 1^{er} cycle débute par un réchauffement et le dernier se termine par un réchauffement pour avoir 10 cycles complets.

On pèse et on prend en photos les échantillons à l'état naturel, après étuvage à la fin de l'essai.

V.3.1.4 Les images retenues des échantillons :

❖ Site de Mekla

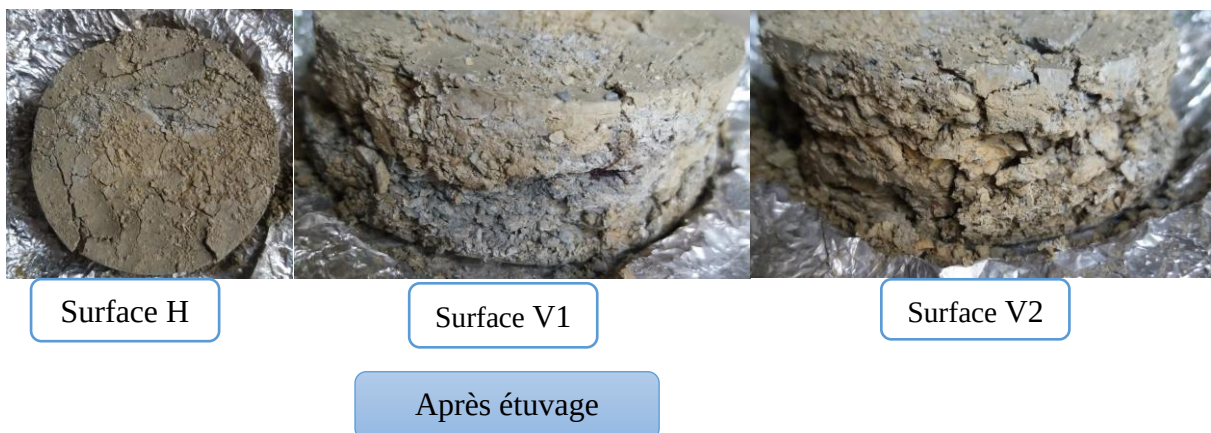
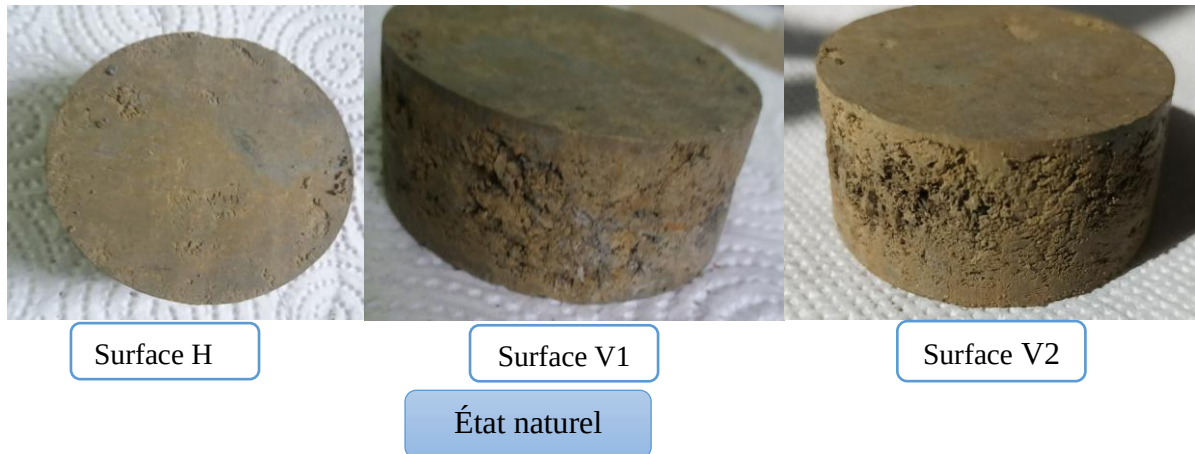




Figure V.3 : Images de l'échantillon de la marne de Mekla au cours de l'essai aux canicules.

❖ Site d'Ait thoudart

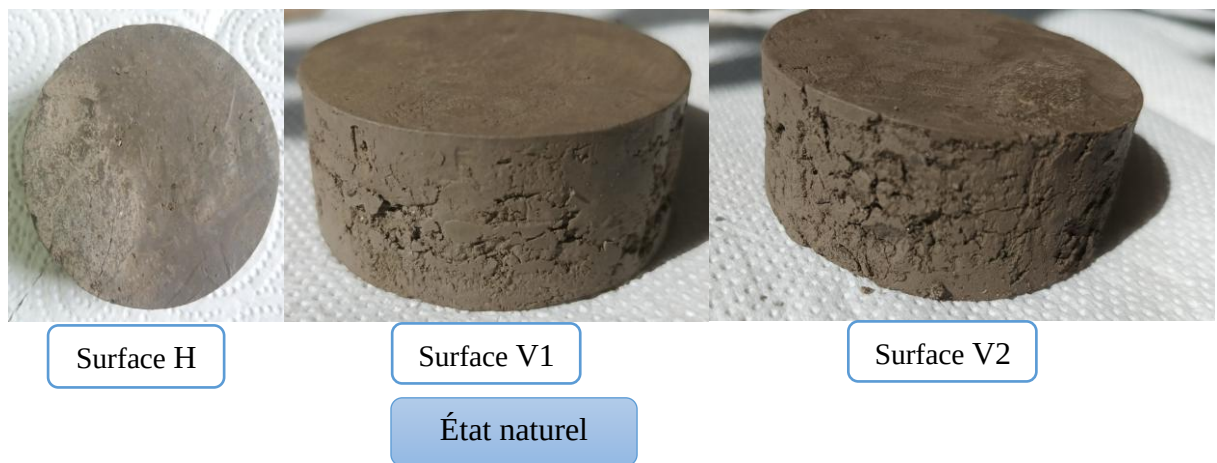




Figure V.4 : Images de l'échantillon de la marne d'Ait Toudart au cours de l'essai aux canicules.

❖ Site d'Azazga

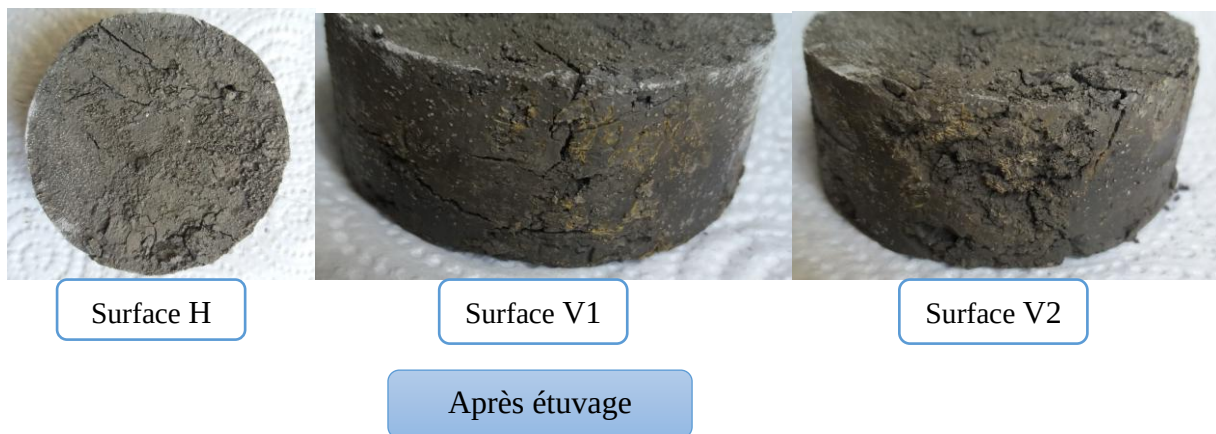




Figure V.5 : Images de l'échantillon de la marne d'Azazga au cours de l'essai aux canicules.

❖ **Site de Boghni**





Figure V.6 : Images de l'échantillon de la marne de Boghni au cours de l'essai aux canicules.

❖ Site d'Ouad fali

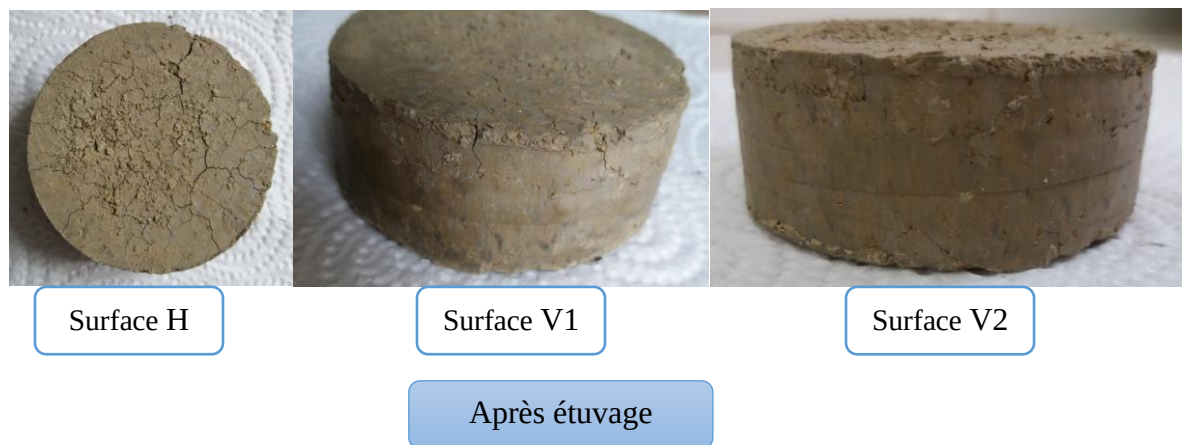




Figure IV.7: Images de l'échantillon de la marne d'Ouad Fali au cours de l'essai aux canicules.

V.3.1.5 Interprétation des résultats et images

L'observation des échantillons au cours de cet essai (Figure V.3,4,5,6 et 7). a montré un gonflement volumique irréversible de tous les échantillons durant la période d'imbibition jusqu'à saturation.

Après l'étuvage on a remarqué l'apparition des microfissures qui se développent au cours de l'essai jusqu'au dernier cycle ainsi qu'un changement de leur structure.

Tous les échantillons ont subi un retrait cumulé au cours de cet essai et l'élargissement des fissures est favorisé dans les plans de faiblesse préexistants et à l'intérieur des échantillons.

V.3.1.6 Les résultats des mesures de masse obtenus :

Les résultats relevés avant l'essai (état naturel), après étuvage et à la fin d'essai sont présentés ci-dessous (Tableau V.1) :

Tableau V.1 Variation de la masse des échantillons au cours de l'essai aux canicules.

Sites	Boghni	Azazga	Ait Toudart	Wouad Fali	Mekla
Avant l'essai	163,938	160,343	171,825	165,835	147,065
Après étuvage	145,567	139,776	169,545	142,871	124,900
À la fin de l'essai	149,561	139,876	165,435	140,176	120,707

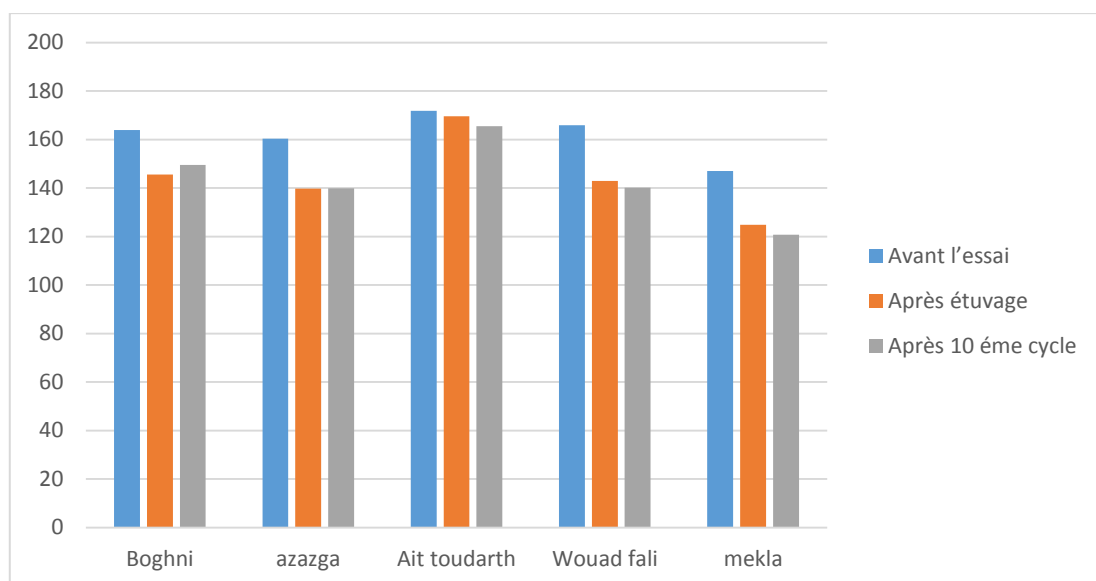


Figure V.8 : Variation de la masse des échantillons au cours d'essai aux canicules.

V.3.1.7 Interprétation des résultats

Les résultats obtenus (Figure V.8) ont montré que les masses des échantillons diminuent au cours de l'essai aux canicules, c'est dû au phénomène de retrait-gonflement, qui a un rôle très important pour ces pertes, avec une légère augmentation à la fin de l'essai pour les marnes de Boghni et Azazga comparé à leurs masses après l'étuvage, cette augmentation peut être expliquée par l'humidité à l'intérieure de l'étuve.

V.3.2 Essai de Dégradabilité

V.3.2.1 But de l'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 soumis à quatre cycles d'immersion-séchage, en débutant par le séchage puis l'immersion comme suit :

- 8 heures de séchage.
- 16 heures d'immersion.

V.3.2.2 Appareillage :

Les éléments constituant l'appareillage sont :

- étuve ventilée (65°) °C ;
- tares, les bacs ;
- seringue ;
- eau distillée ;
- balance de précision à $\pm 0,1$ gr.

V.3.2.3 Déroulement de l'essai

Les échantillons sont placés dans des bacs dans l'étuve et sont mis aux conditions normalisées (**suivant la norme P94-067**), après leurs préparations. Le 1er cycle débute par une mise en immersion et le 4eme cycle se termine par un séchage, un cycle est réalisé comme suit :

- Imbiber les échantillons pendant 8h ; la quantité d'eau ajouter est alternative comme une pluie avec une seringue chaque 1h (15ml, 10ml, 5ml).
- Séchage pendant 16h ; Après chaque phase d'immersion et avant introduction de l'échantillon dans l'étuve, on procède au siphonage de l'eau restant dans le bac métallique jusqu'à ce qu'il n'y ait pas risque d'entraînement de particules solides dans l'écoulement.

On pèse les échantillons sans les particules fines à la fin de chaque cycle et à la fin de l'essai.

V.3.2.4 Images retenues

❖ Site de Boghni

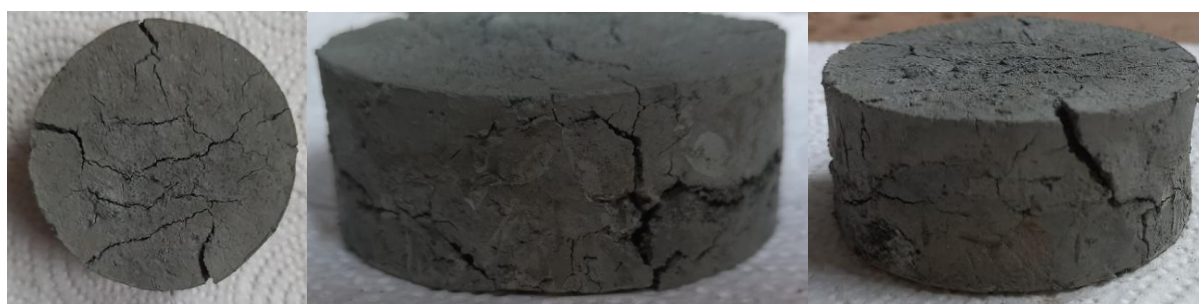


Surface H

Surface V1

Surface V2

État naturel



Surface H

Surface V1

Surface V2

1^{er} cycle



Figure V.9 : Images de l'échantillon de marne de Boghni au cours de l'essai de dégradabilité.

❖ Site de Mekla



Surface H

Surface V1

Surface V2

État naturel



Surface H

Surface V1

Surface V1

1^{er} cycle



Surface H

Surface V1

Surface V2

2^{ème} cycle

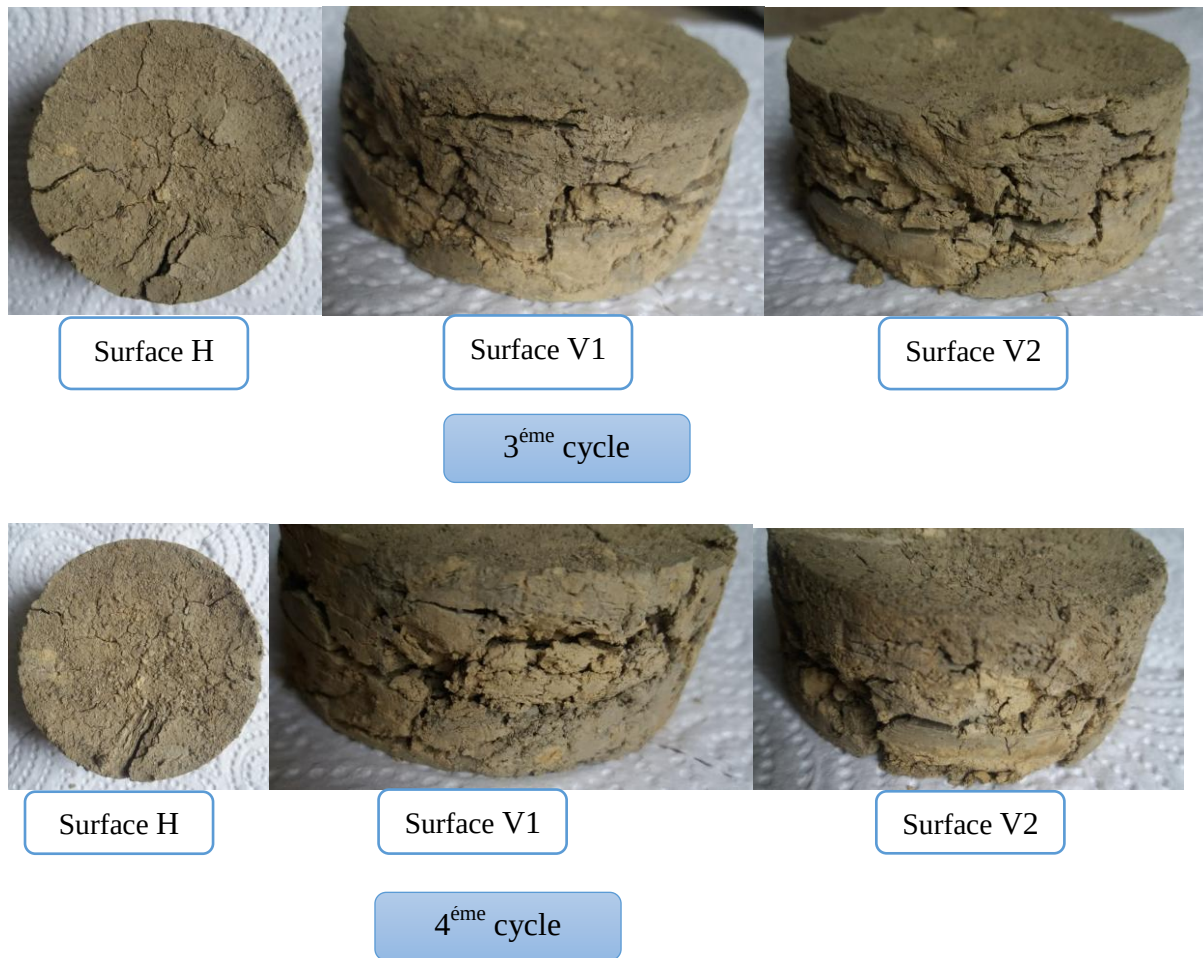
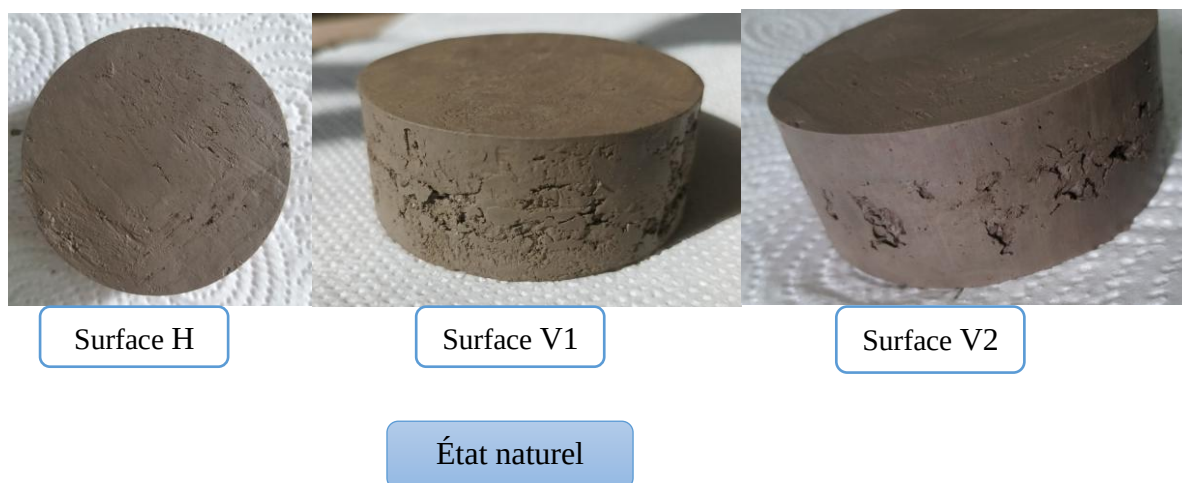


Figure V.10 : Images de l'échantillon de marne de Mékla au cours de l'essai de dégradabilité.

❖ Site d'Ait Toudart



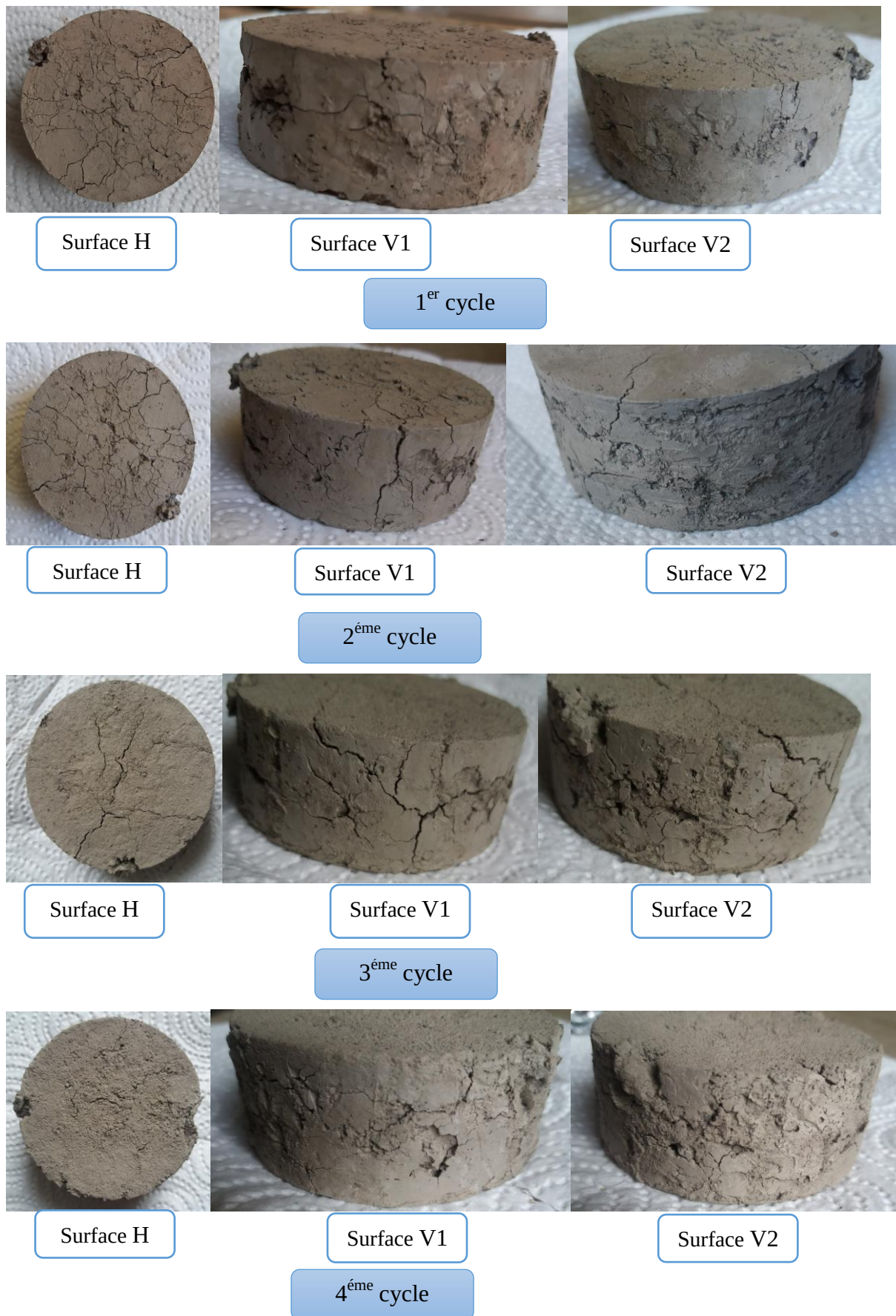


Figure V.11: Images de l'échantillon de la marne d'Ait Toudart au cours de l'essai de dégradabilité.

❖ Site d'Azazga



Surface H



Surface V1



Surface V2

État naturel



Surface H



Surface V1



Surface V2

1^{er} cycle



Surface H



Surface V1



Surface V2

2^{ème} cycle

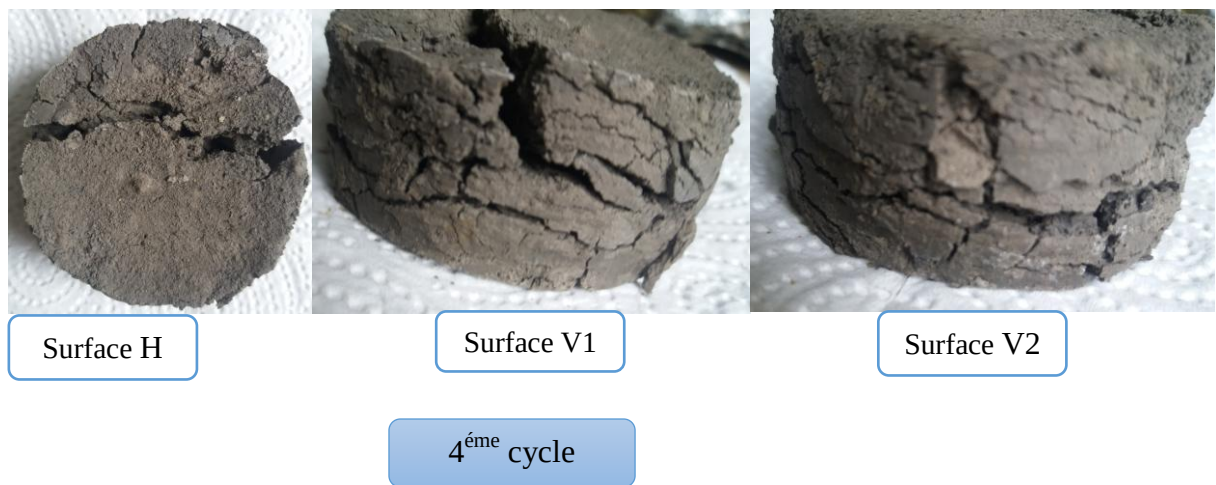
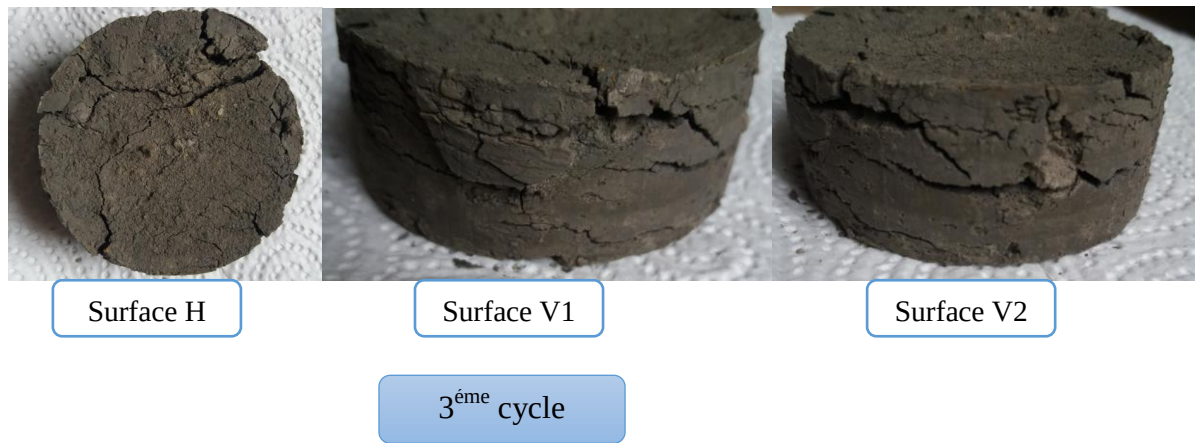


Figure V.12: Images de l'échantillon de la marne d'Azazga au cours de l'essai de dégradabilité.

❖ Site d'Ouad Fali





Surface H

Surface V1

Surface V2

1^{er} cycle



Surface H

Surface V1

Surface V2

2^{ème} cycle



Surface H

Surface V1

Surface V2

3^{ème} cycle

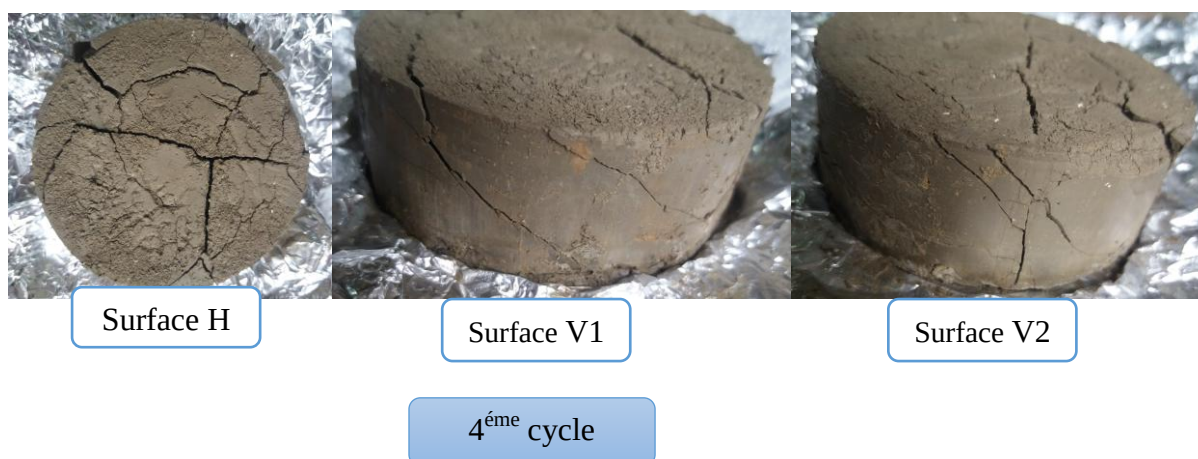


Figure V.13: Images de l'échantillon de marne d'Ouad Fali au cours de l'essai de dégradabilité.

V.3.2.5 Interprétation des résultats

Après avoir observé les échantillons au cours de l'essai et d'après les images prises (Figure V.9, 10, 11, 12 et 13), on remarque le gonflement volumique irréversible de tous les échantillons au début de l'essai, et l'apparition des fissures à partir de 1^{er} cycle, ces derniers continuent à s'élargir à la fin de chaque cycle ce qui nous laisse dire que les échantillons ont subi un retrait cumulé au cours des cycles de séchage-émersion.

Et on remarque aussi que les échantillons de marne d'Azazga et d'Ouad Fali s'éclatent à la fin du 3^{ème} cycle, on peut dire que ce phénomène a été engendré lorsque les minéraux se transforment et déclenchent le phénomène de retrait-gonflement (généralement la montmorillonite et les illites qui ont des potentiels élevés pour le gonflement). Donc on peut dire que les marnes d'Azazga et Ouad Fali se comportent comme des argiles gonflantes.

V.3.2.6 Les résultats des mesures de masse obtenus :

Les résultats des mesures de masse obtenus, pour les différents échantillons avant et après chaque cycle de l'essai, sont présentés ci-dessous (Tableau V.2) :

Tableau V.2 : Variation de la masse des échantillons au cours de l'essai de dégradabilité.

Sites	Boghni	Azazga	Ait Toudarth	Wouad Fali	Mekla
État naturel	168,231	159,245	170,228	166,833	145,168
Après 1 ^{er} cycle	155,751	140,276	151,258	148,363	123,103
Après 2 ^{em} cycle	154,852	138,678	150,559	148,263	121,206
Après 3 ^{em} cycle	154,051	137,770	150,155	147,854	119,797
Après 4 ^{em} cycle	153,355	136,082	149,960	146,466	118,710

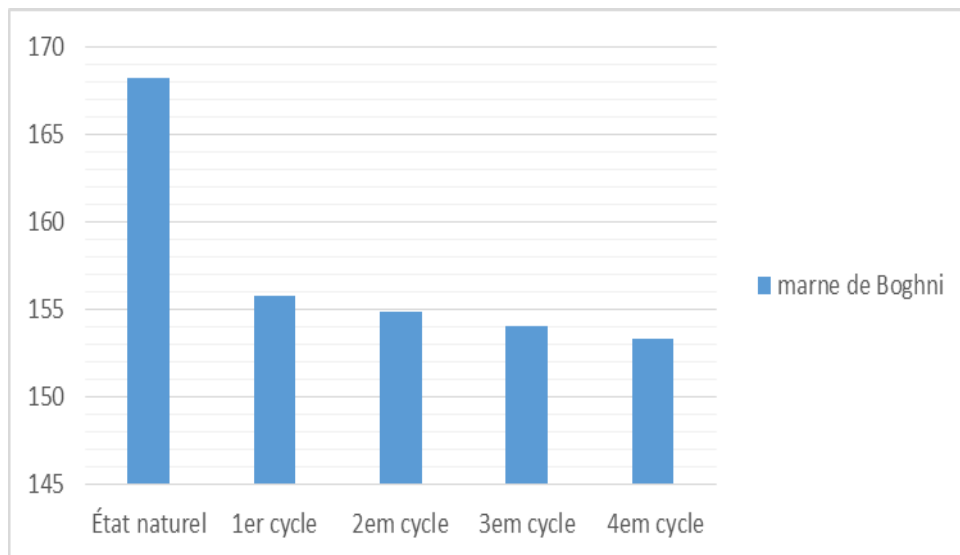


Figure V.14 : Variation des masses d'échantillon de marne de Boghni au cours de l'essai de Dégradabilité.

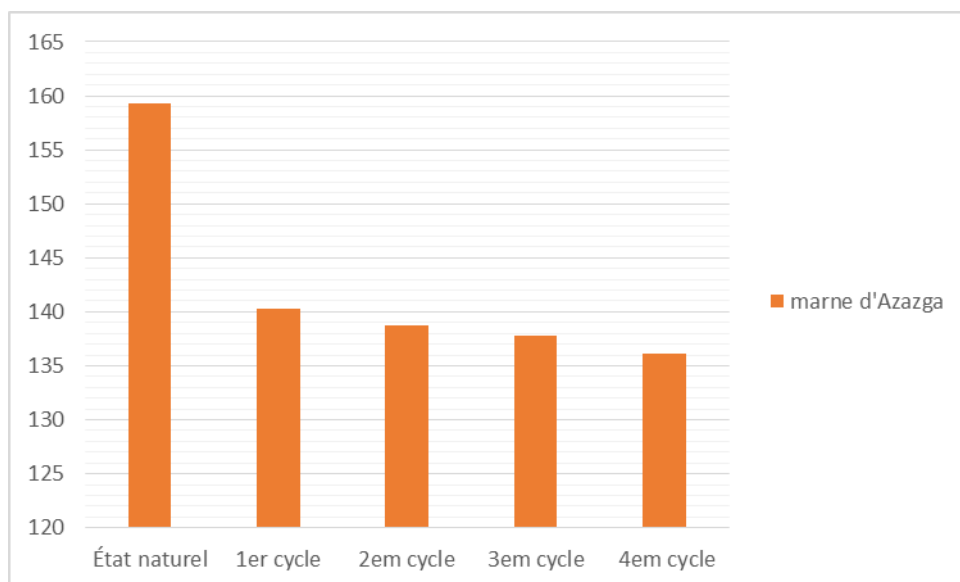


Figure V.15 : Variation des masses d'échantillon de marne d'Azazga au cours de l'essai de Dégradabilité.

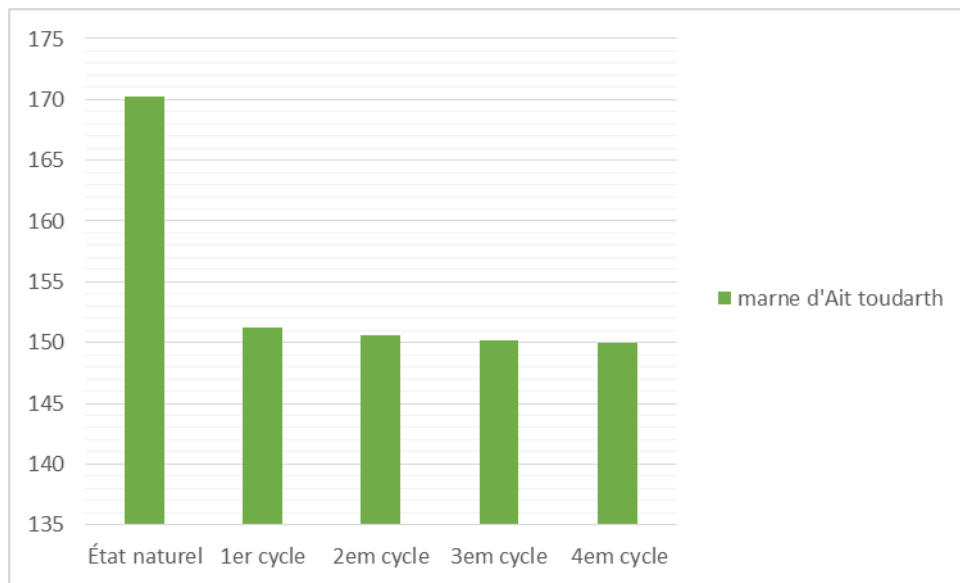


Figure V.16 : Variation des masses d'échantillon de marne d'Ait Toudart au cours de l'essai de Dégradabilité.

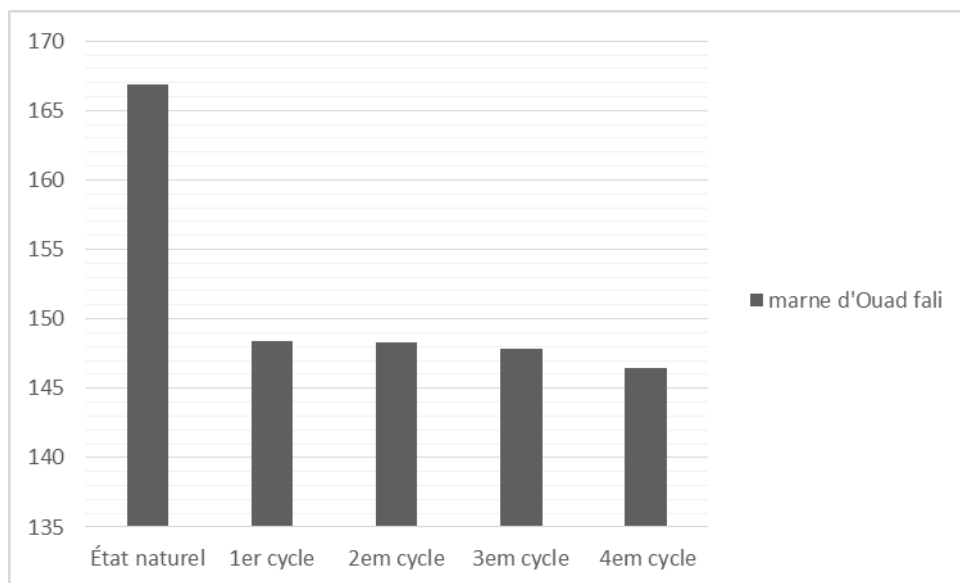


Figure V.17 : Variation des masses d'échantillon de marne de Boghni au cours de l'essai de Dégradabilité.

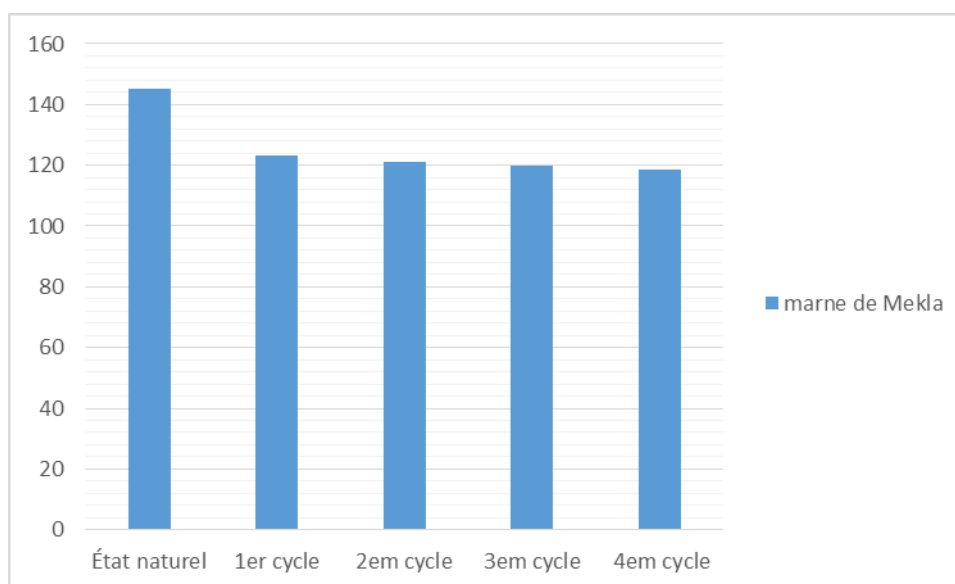


Figure V.18: Variation des masses d'échantillon de marne de Mékla au cours de l'essai de Dégradabilité.

V.3.2.7 Interprétation des résultats

D'après les résultats obtenus (Figure V.14, 15, 16, 17 et 18) on remarque que les masses des échantillons diminuent après chaque cycle, c'est dû au phénomène de retrait-gonflement, qui a un rôle très important pour ces pertes.

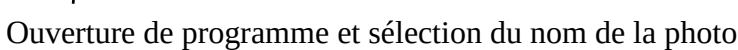
V.4 Conclusion

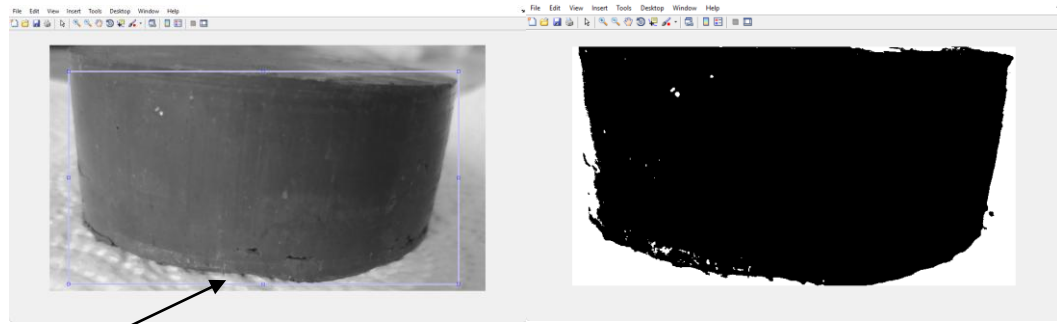
Ce chapitre a représenté les sollicitations des essais climatiques saisonnières cycliques appliquées aux échantillons étudiés, ce qui nous a permis d'avoir une idée sur les effets de retrait-gonflement, les fissures et même le changement de la texture et de la structure des échantillons. La présence 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 dans ce chapitre par l'étude de la variation de la dimension fractale (en 2D et 3D) à l'aide d'un logiciel MATLAB.

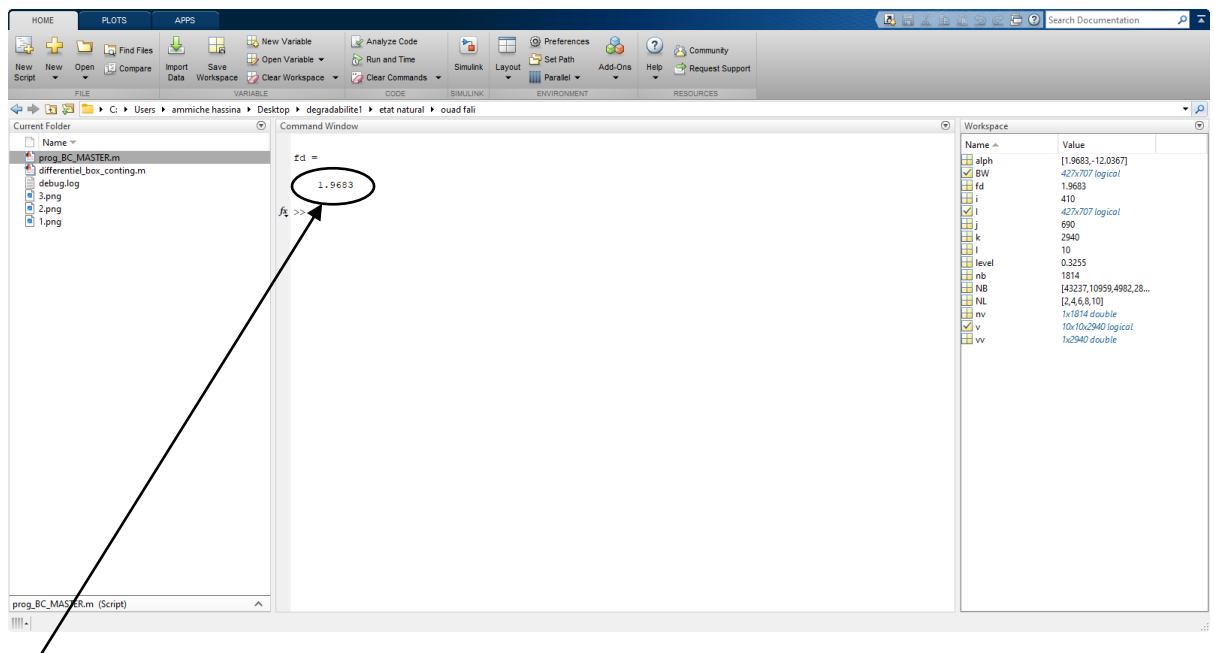


Chapitre VI





Rognage de l'image



Affichage de résultat du calcul de la DF_R .

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

VI.3 Présentation des résultats

VI.3.1 Résultats de l'essai aux Canicules

❖ Marne de Mekla

Tableau VI.1 : Résultats de calcul de la dimension fractale de la marne de Mekla.

Échantillon de Mekla			
	Surface H	Surface V1	Surface V2
État naturel	1,9675	1,8601	1,8962
Après Étuvage	1,8680	1,8574	1,8292
Après 10 ^{ème} cycle	1,7118	1,7879	1,6765

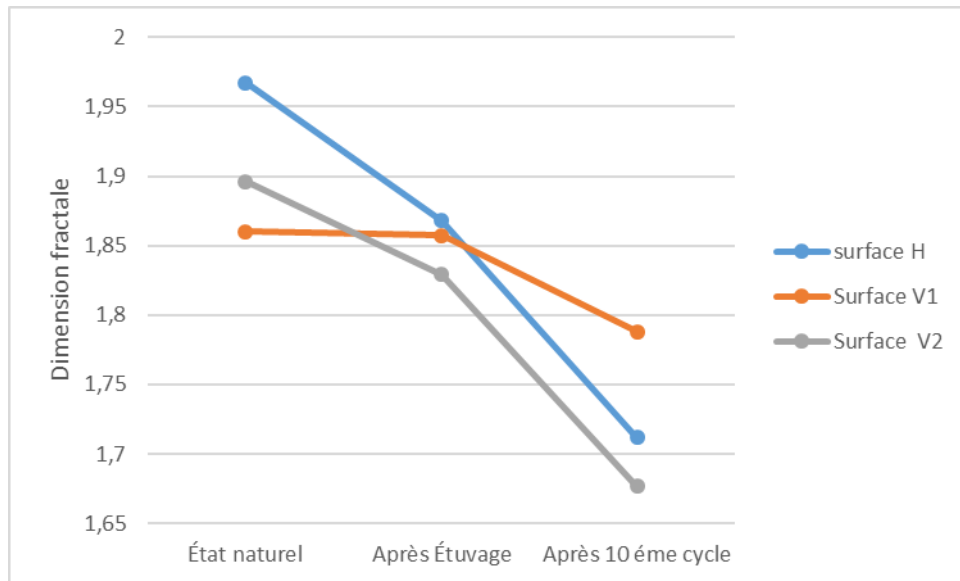


Figure VI.2 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai aux canicules pour l'échantillon de marne de Mekla.

❖ **Marne d'Ait Toudert**

Tableau VI.2 : Résultats de calcul de la dimension fractale de la marne d'Ait Toudert.

<i>Échantillon d'Ait Toudert</i>			
	Surface H	Surface V 1	Surface V2
État naturel	1,9384	1,9884	1,9072
Après Étuvage	1,9114	1,8996	1,8766
Après 10 ^{ème} cycle	1,9101	1,8898	1,8639

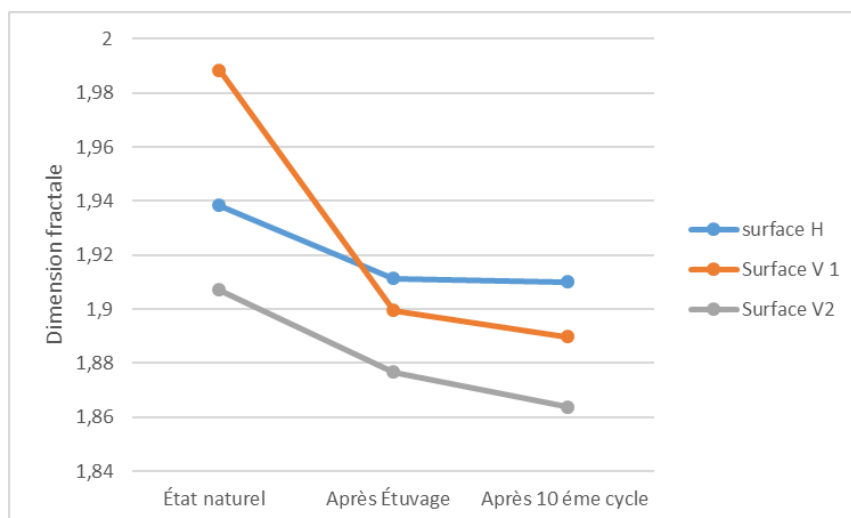


Figure VI.3 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai aux canicules pour l'échantillon de marne d'Ait Toudert.

❖ Marne d’Azazga

Tableau VI.3 : Résultats de calcul de la dimension fractale de la marne d’Azazga

<i>Échantillon d’Azazga</i>			
	Surface H	Surface V 1	Surface V2
État naturel	1,9432	1,8153	1,9290
Après Étuvage	1,8519	1,6262	1,7799
Après 10 ^{ème} cycle	1,8500	1,6102	1,5802

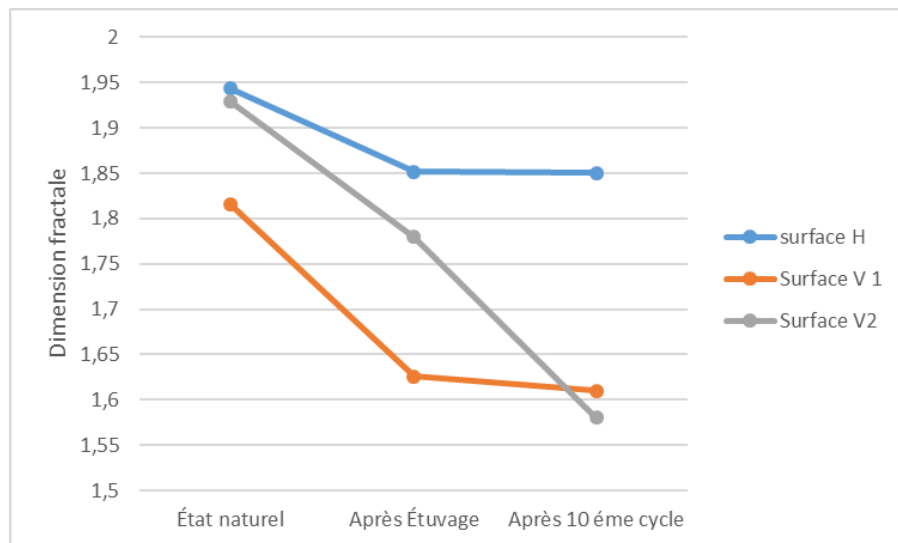


Figure VI.4 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai aux canicules pour l'échantillon de marne d’Azazga.

❖ Marne de Boghni

Tableau VI.4 : Résultats de calcul de la dimension fractale de la marne de Boghni

<i>Échantillon de boghni</i>			
	Surface H	Surface V 1	Surface V2
État naturel	1,9880	1,8762	1,7758
Après Étuvage	1,7348	1,8232	1,7500
Après 10 ^{ème} cycle	1,7023	1,7587	1,5511

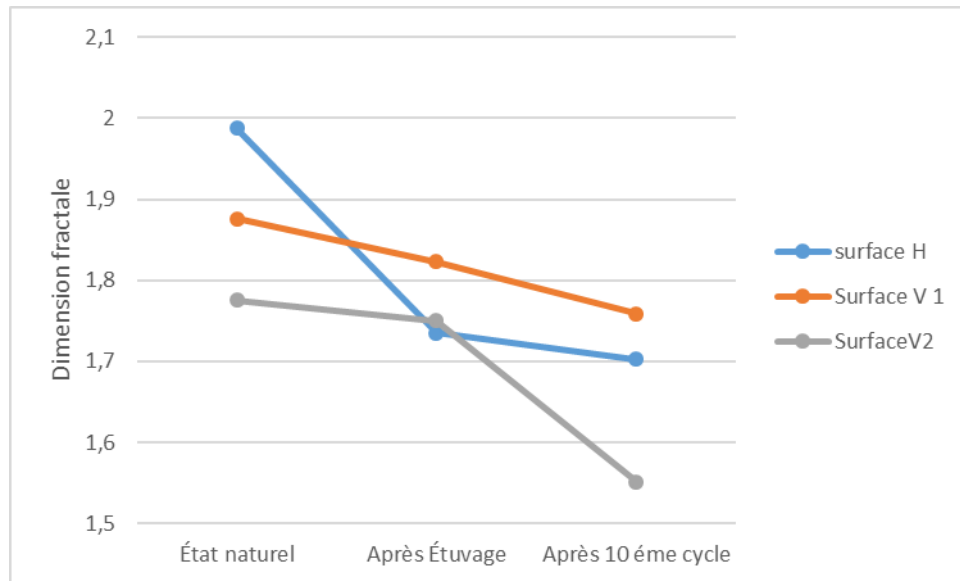


Figure VI.5 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai aux canicules pour l'échantillon de marne de Boghni.

❖ **Marne d'Oued Fali**

Tableau VI.5 : Résultats de calcul de la dimension fractale de la marne d'Oued Fali.

<i>Échantillon d'Oued Fali</i>			
	Surface H	Surface V 1	Surface V2
État naturel	1,9598	1,9029	1,9119
Après Étuvage	1,8634	1,8937	1,8561
Après 10 ^{ème} cycle	1,8548	1,8907	1,6939

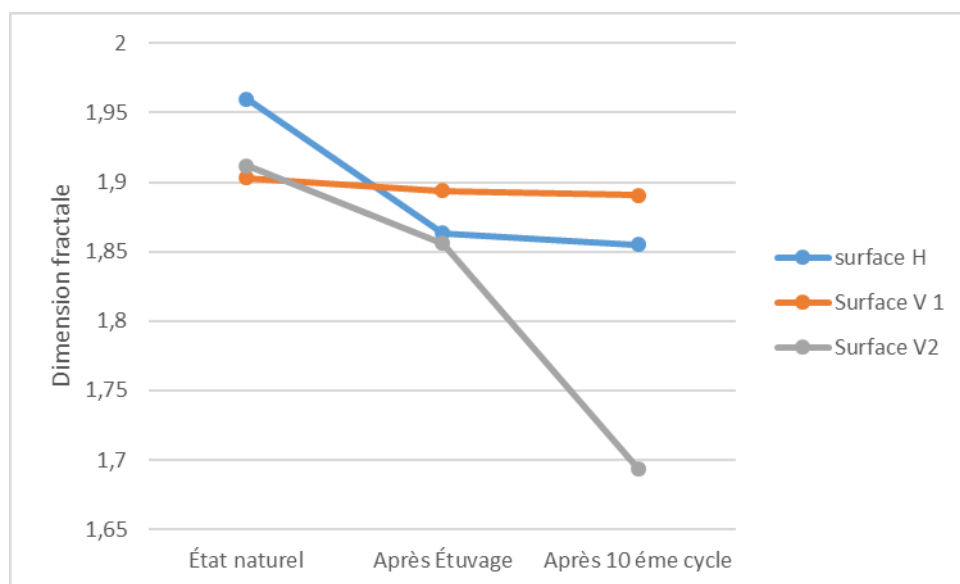


Figure VI.6 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai aux canicules pour l'échantillon de marne d'Oued Fali.

VI.3.2 Résultats de l'essai de Dégradabilité

❖ **Marne de Mekla**

Tableau VI.6 : Résultats de calcul de la dimension fractale de marne de Mekla.

Échantillon de Mekla			
	Surface H	Surface V1	Surface V2
État naturel	1,9537	1,8424	1,8789
1 ^{er} cycle	1,8992	1,8381	1,8665
2 ^{ème} cycle	1,8194	1,8135	1,8219
3 ^{ème} cycle	1,7417	1,8053	1,8068
4 ^{ème} cycle	1,4696	1,8003	1,7354

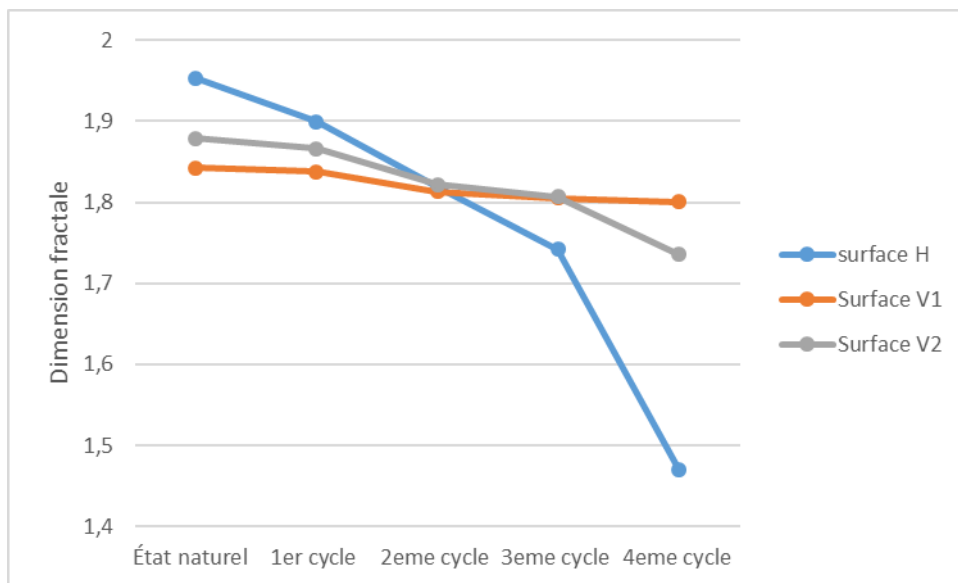


Figure VI.7 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai de dégradabilité pour l'échantillon de marne d'Mekla.

❖ **Marne de d'Ait Toudert**

Tableau VI.7 : Résultats de calcul de la dimension fractale de marne d'Ait Toudert

Échantillon d'Ait Toudert			
	Surface H	Surface V1	SurfaceV2
État naturel	1,9081	1,8490	1,9015
1 ^{er} cycle	1,8973	1,8310	1,8980
2 ^{ème} cycle	1,8424	1,8062	1,8778
3 ^{ème} cycle	1,8166	1,7999	1,7877
4 ^{ème} cycle	1,5642	1,7753	1,7081

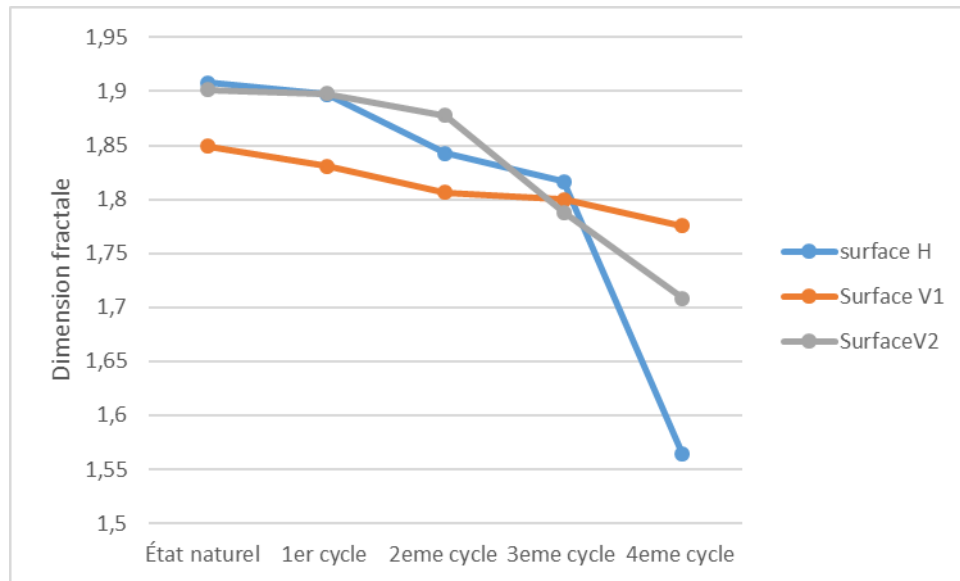


Figure VI.8 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai de dégradabilité pour l'échantillon de marne d'Ait Toudart.

❖ **Marne d'Azazga**

Tableau VI.8 : Résultats de calcul de la dimension fractale de marne d'Azazga

Échantillon d'Azazga			
	Surface H	Surface V1	Surface V2
État naturel	1,9430	2,0013	1,9640
1 ^{er} cycle	1,9324	1,8880	1,9573
2 ^{ème} cycle	1,9308	1,8642	1,9351
3 ^{ème} cycle	1,9291	1,8580	1,9090
4 ^{ème} cycle	1,8634	1,8320	1,7563

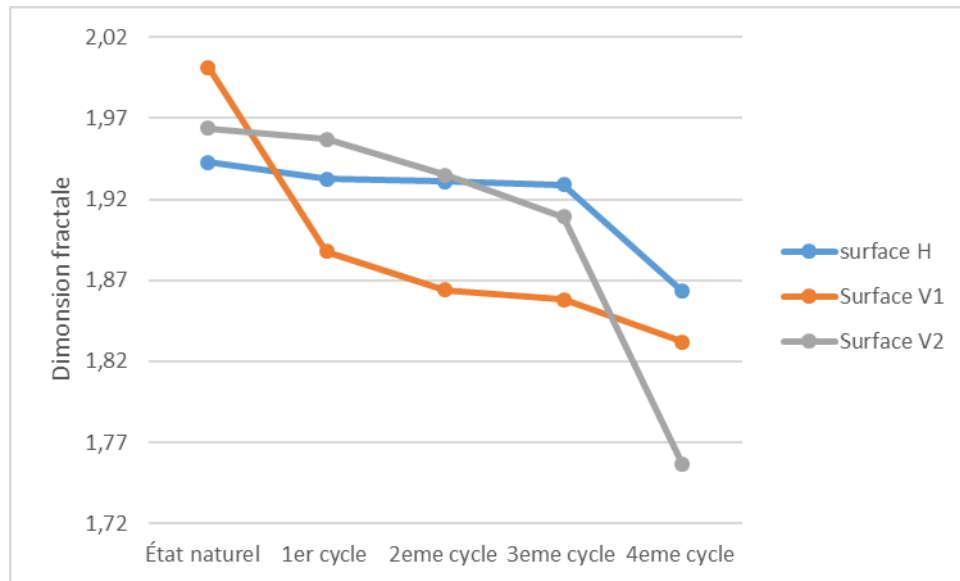


Figure VI.9 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai de dégradabilité pour l'échantillon de marne d'Azazga.

❖ **Marne de Boghni**

Tableau VI.9 : Résultats de calcul de la dimension fractale de marne de Boghni.

Échantillon de Boghni			
	Surface H	Surface V1	Surface V2
État naturel	1,9202	1,9674	1,9578
1 ^{er} cycle	1,9094	1,8357	1,8891
2 ^{ème} cycle	1,8891	1,7307	1,8578
3 ^{ème} cycle	1,8835	1,7288	1,8006
4 ^{ème} cycle	1,6753	1,7139	1,7655

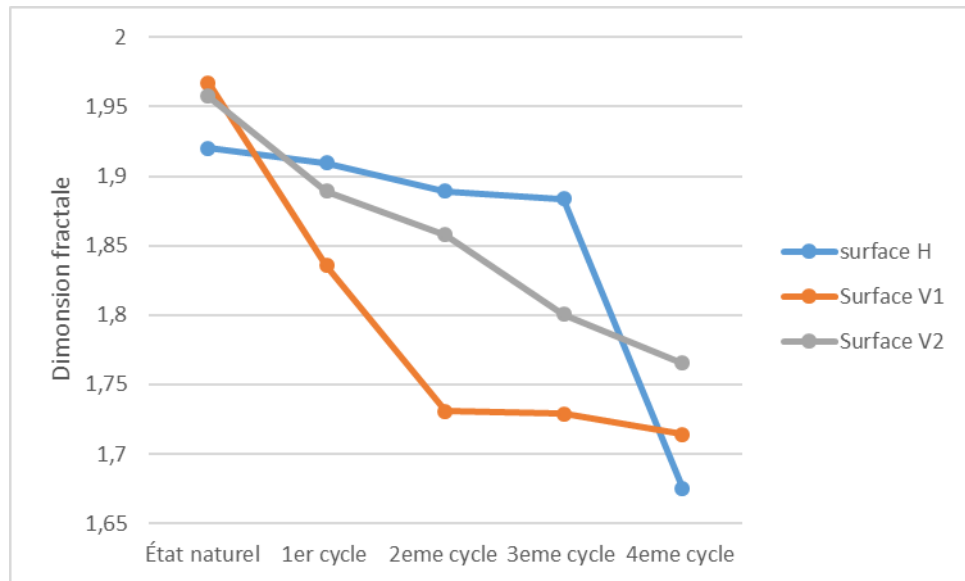


Figure VI.10 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai de dégradabilité pour l'échantillon de marne d'Boghni.

❖ Marne d'Oued Fali

Tableau VI.10 : Résultats de calcul de la dimension fractale de marne d'Oued Fali.

Échantillon d'Oued Fali			
	Surface H	Surface V1	Surface V2
État naturel	1,9615	1,9504	1,9543
1 ^{er} cycle	1,9581	1,9329	1,9358
2 ^{ème} cycle	1,9197	1,9244	1,9029
3 ^{ème} cycle	1,9027	1,8971	1,8991
4 ^{ème} cycle	1,8294	1,8909	1,8444

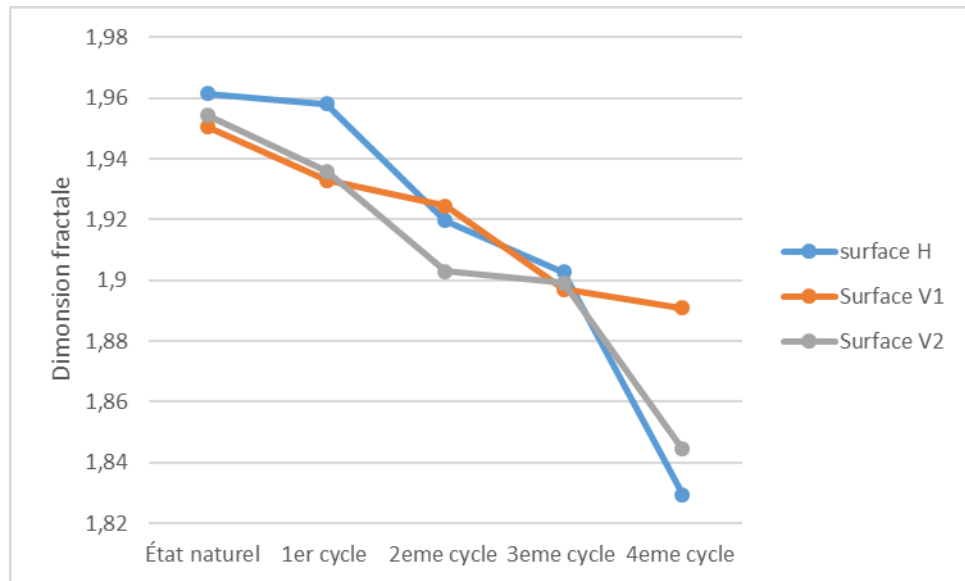


Figure VI.11 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai de dégradabilité pour l'échantillon de marne d'Oued Fali.

VI.4 Interprétation des résultats

Après l'analyse des figures (VI.2, ...VI.11) on remarque que les valeurs de la dimension fractale DF_R , calculée avec la méthode Box Counting bidimensionnelle, diminuent avec l'augmentation du nombre de cycles appliqués, durant les deux essais réalisés. À la fin de chaque essai la rugosité augmente par rapport à son état initial, cette augmentation est causée par les fissures et le changement d'état de la texture des échantillons, comme on remarque également la diminution de la DF_R calculée, cette diminution peut être expliquée par le changement de la texture, l'augmentation de la rugosité des échantillons et même la propagation de leurs fissures, causés par la présence des minéraux sensibles à l'eau et le potentiel de gonflement élevé dans les échantillons de marne étudiés.

VI.5 Conclusion

D'après les résultats obtenus dans ce chapitre on remarque bien l'influence des différents cycles des essais sur les résultats du calcul de la dimension fractale et on conclut que la dimension fractale DF_R , calculée avec la méthode Box Counting bidimensionnelle, est affectée par la structure et les changements de la texture et de la forme des échantillons.



Chapitre VII

Chapitre VII : Calcul de la dimension fractale en 3D

VII.1 Introduction

Comme la méthode déjà utilisée dans le chapitre précédant, une autre méthode a été développée pour améliorer la méthode de Compactage de Boîte bidimensionnel (BC), Cette méthode appelée la méthode de Compactage Différentiel de Boîtes tridimensionnelles (DBC), l'analyse dans cette méthode est mise en œuvre sur les niveaux de gris de l'image.

Dans ce chapitre le calcul de la dimension fractale a été effectué par la méthode tridimensionnelle appliquée sur les mêmes images des échantillons sélectionnés pour la méthode de calcul déjà utilisé à l'aide du programme Matlab R 2016a.

VII.2 Présentation des résultats

VII.2.1 Résultats de l'essai de Canicules

❖ Marne de Mekla

Tableau VII.1 : Résultats de calcul de la dimension fractale de la marne de Mekla.

Échantillon de Mekla			
	Surface H	Surface V 1	Surface V2
État naturel	2,0223	2,0967	2,1388
Après étuvage	2,0208	2,0606	2,0284
Après 10 ^{ème} cycle	2,0198	2,0364	1,9694

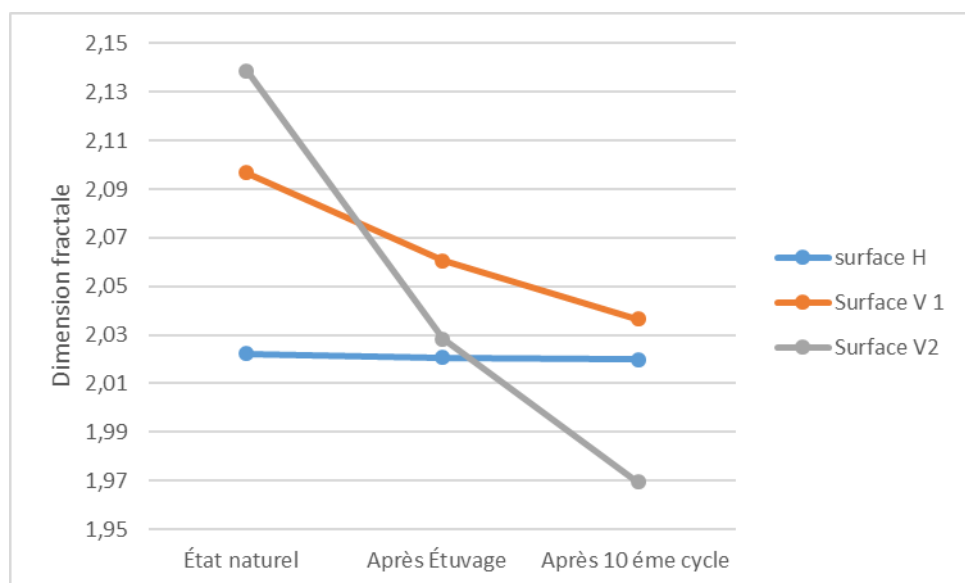


Figure VII.1 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai aux canicules pour l'échantillon de marne de Mekla.

❖ **Marne d'Ait Toudert**

Tableau VII.2 : Résultats de calcul de la dimension fractale de la marne d'Ait Toudert.

<i>Échantillon d'Ait Toudert</i>			
	Surface H	Surface V 1	Surface V2
État naturel	2,0489	2,0982	2,0642
Après étuvage	2,0291	2,0514	2,0621
Après 10^{ème} cycle	2,0242	2,0371	1,9838

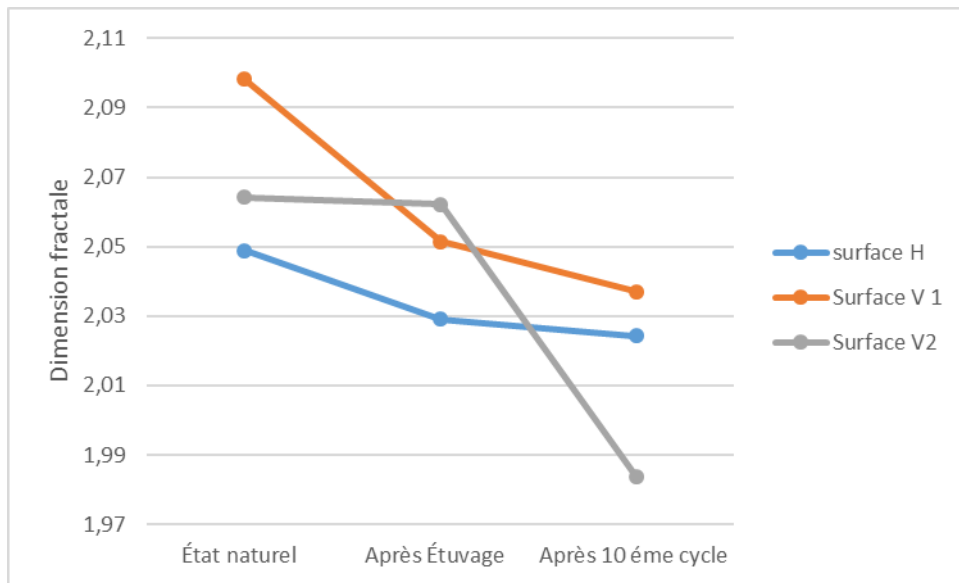


Figure VII.2 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai aux canicules pour l'échantillon de marne d'Ait Toudert.

Tableau VII.3 : Résultats de calcul de la dimension fractale de la marne d'Azazga.

<i>Échantillon d'Azazga</i>			
	Surface H	Surface V1	Surface V2
État naturel	2,0529	1,9768	2,0331
Après étuvage	2,0487	1,9737	1,9345
Après 10^{ème} cycle	2,0198	1,9273	1,9769

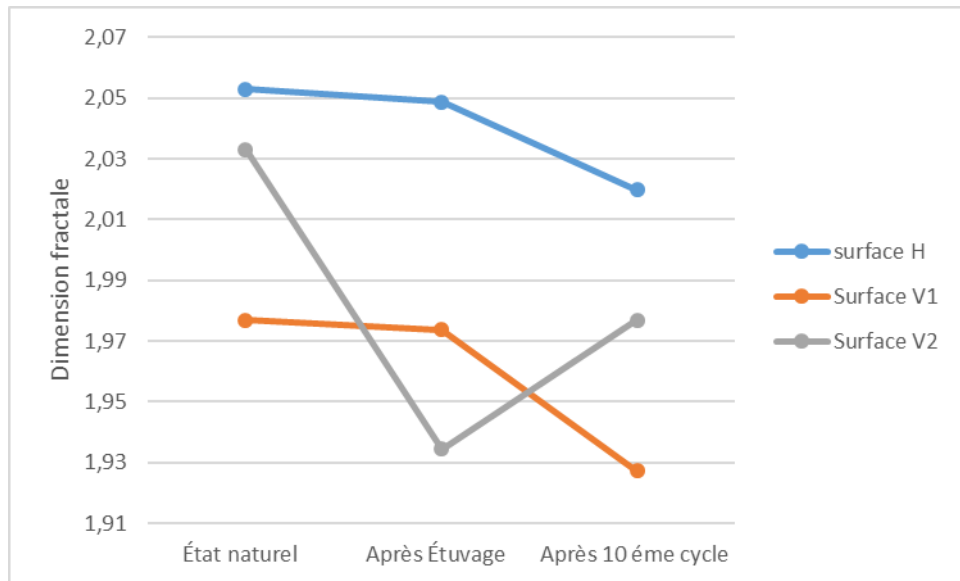


Figure VII.3: Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai aux canicules pour l'échantillon de marne d'Azazga.

Tableau VII.4 : Résultats de calcul de la dimension fractale de la marne de Boghni

<i>Échantillon de Boghni</i>			
	Surface H	Surface V1	Surface V2
État naturel	1,9906	2,0350	2,0813
Après étuvage	2,0107	2,0285	2,0557
Après 10 ^{ème} cycle	2,0137	2,0454	2,0480

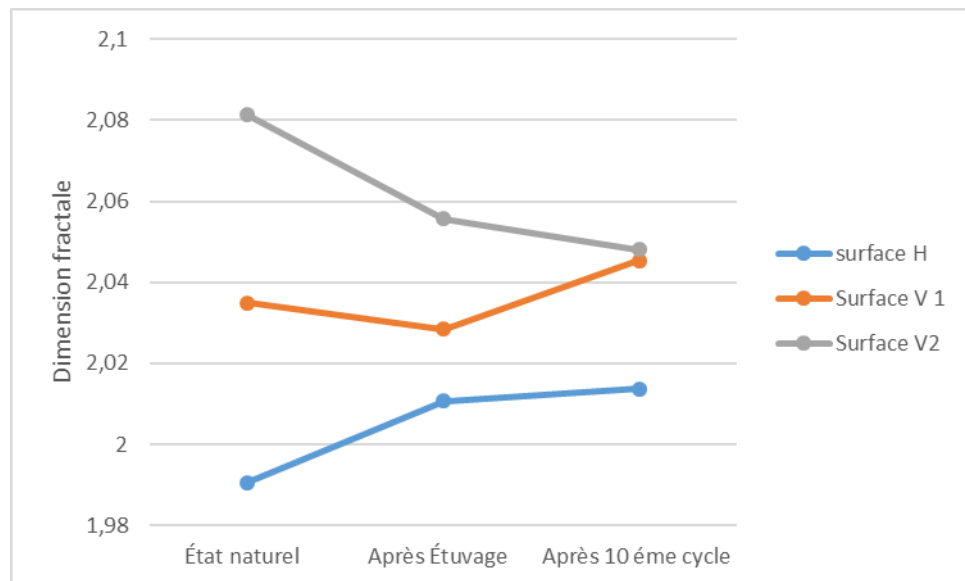


Figure VII.4 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai aux canicules pour l'échantillon de marne de Boghni.

Tableau VII.5 : Résultats de calcul de la dimension fractale de la marne d'Oued Fali.

<i>Échantillon d'Ouad Fali</i>			
	Surface H	Surface V1	Surface V2
État naturel	1,995	2,0037	2,0810
Après étuvage	2,0279	1,9107	2,0178
Après 10 ^{ème} cycle	2,0634	1,9983	1,9275

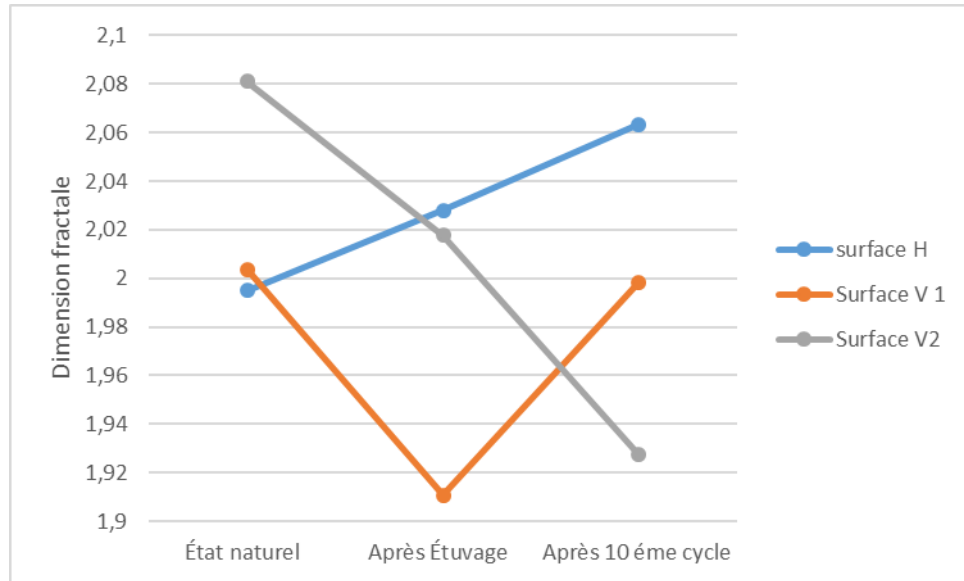


Figure VII.5 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai aux canicules pour l'échantillon de marne d'Oued Fali.

VII.2.2 Résultats de l'essai de Dégradabilité

Tableau VII.6 : Résultats de calcul de la dimension fractale de marne de Mekla.

<i>Échantillon de Mekla</i>			
	Surface H	Surface V1	Surface V2
État naturel	1,9961	2,0640	2,1147
1 ^{er} cycle	1,997	2,0590	2,0924
2 ^{ème} cycle	1,9974	2,0545	2,0693
3 ^{ème} cycle	1,9984	2,0518	2,0395
4 ^{ème} cycle	1,9995	2,0163	2,0300

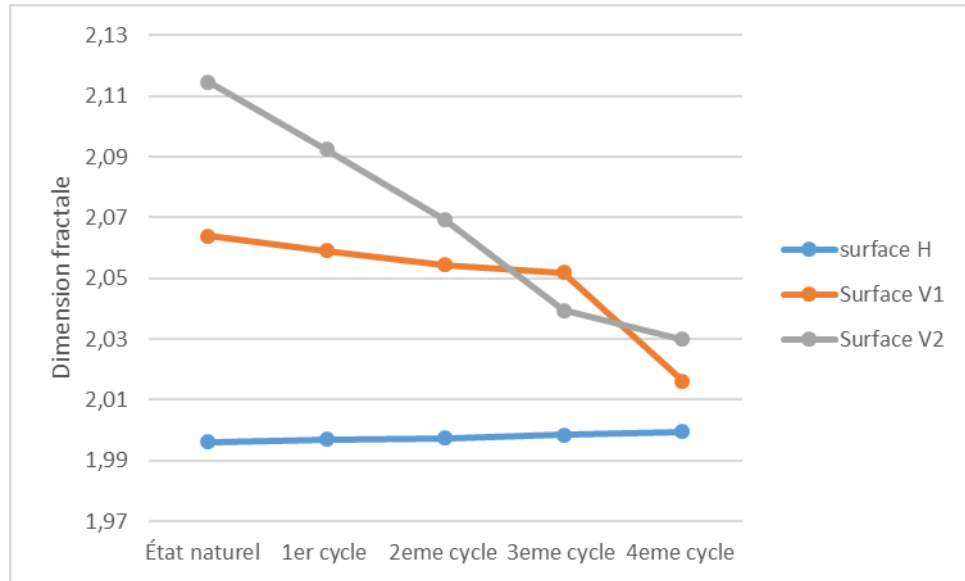


Figure VII.6 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai de dégradabilité pour l'échantillon de marne d'Mekla.

Tableau VII.7 : Résultats de calcul de la dimension fractale de marne d'Ait Toudert

<i>Échantillon d'Ait Toudert</i>			
	Surface H	Surface V1	Surface V2
État naturel	2,0133	2,0946	2,0675
1 ^{er} cycle	1,9968	2,0600	2,0424
2 ^{ème} cycle	2,0164	2,0386	2,0348
3 ^{ème} cycle	2,0154	2,0357	2,0323
4 ^{ème} cycle	2,0232	2,0321	2,0198

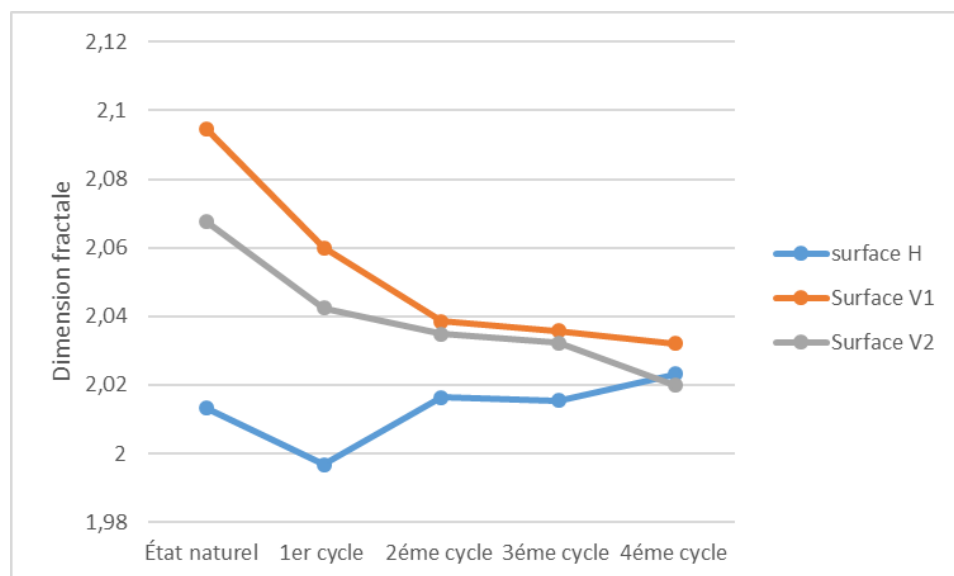


Figure VII.7 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai de dégradabilité pour l'échantillon de marne d'Ait Toudart.

Tableau VII.8 : Résultats de calcul de la dimension fractale de marne d’Azazga.

<i>Échantillon d’Azazga</i>			
	Surface H	Surface V1	Surface V2
État naturel	2,0600	2,0195	2,0131
1^{er} cycle	2,0583	2,0190	2,0071
2^{ème} cycle	2,0068	2,0162	1,9653
3^{ème} cycle	2,0059	2,0132	2,0388
4^{ème} cycle	2,0044	2,0033	2,0757

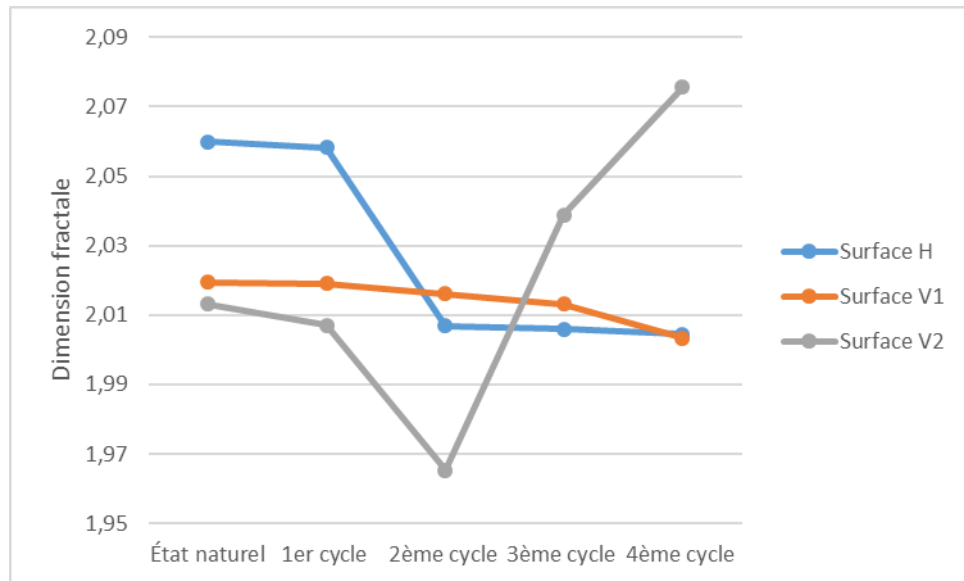


Figure VII.8 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai de dégradabilité pour l'échantillon de marne d'Azazga.

Tableau VII.9 : Résultats de calcul de la dimension fractale de marne de Boghni.

<i>Échantillon de Boghni</i>			
	Surface H	Surface V1	Surface V2
État naturel	2,0245	2,0275	2,0562
1^{er} cycle	2,0232	2,0251	2,0576
2^{ème} cycle	2,0222	2,0221	2,0409
3^{ème} cycle	2,0219	2,0151	2,0388
4^{ème} cycle	2,0208	2,0080	2,0306

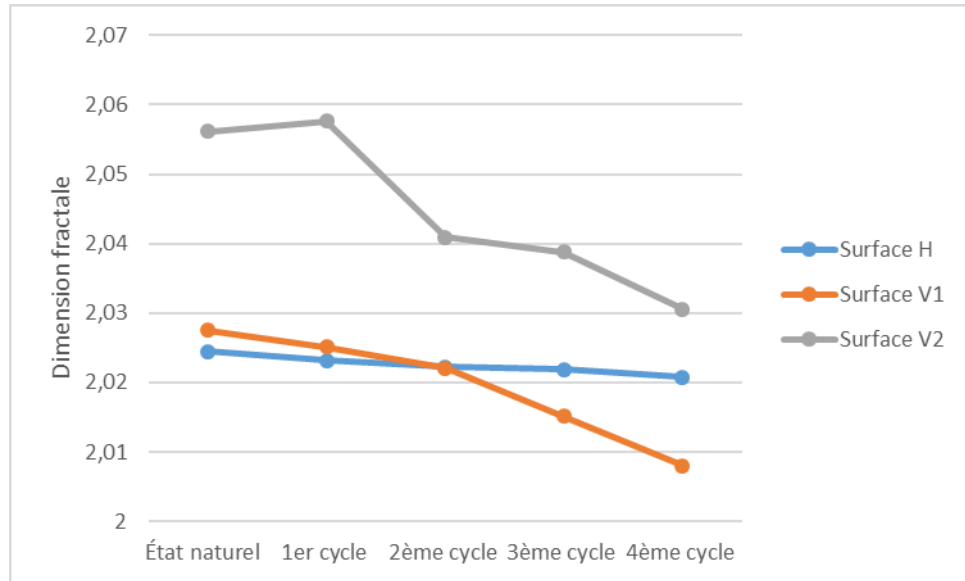


Figure VII.9 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai de dégradabilité pour l'échantillon de marne de Boghni.

Tableau VII.10 : Résultats de calcul de la dimension fractale de marne d'Oued Fali.

Échantillon d'Oued Fali			
	Surface H	Surface V1	Surface V2
État naturel	1,982	2,0137	2,0064
1 ^{er} cycle	1,9837	2,0316	1,9975
2 ^{ème} cycle	1,9904	2,0321	2,0142
3 ^{ème} cycle	1,9922	2,0238	1,9982
4 ^{ème} cycle	1,9964	2,0136	2,0018

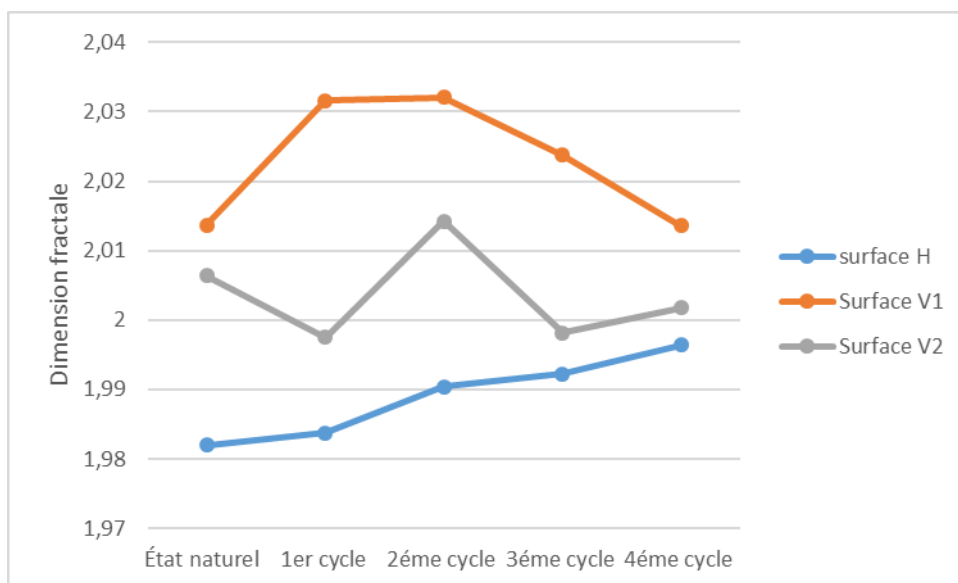


Figure VII.10 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai de dégradabilité pour l'échantillon de marne d'Oued Fali.

VII.2.3 Interprétation des résultats

On remarque sur toutes les figures déjà présentées que la variation de la dimension fractale n'est pas linéaire, bien au contraire on a des différentes pentes qui varient au cours des deux essais comme suit :

-la diminution de DF des échantillons de marne de Mekla et Ait Toudert au cours de l'essai aux canicules (Figures VII.1 et Figure VII.2), et la même remarque pour la marne de Boghni pendant l'essai de dégradabilité (Figure VII.9).

-Sur l'échantillon de marne de Mekla, (essai de dégradabilité) figure VII.6, on a remarqué une légère augmentation de la DF sur une face et sa diminution sur les deux autres faces.

-Sur plusieurs figures on remarque que la DF diminue sur certaines faces après l'étuvage pour ensuite augmenter à la fin de l'essai aux canicules (Figures VII.3, VII.4 et VII.5), ou elles diminuent aux premiers cycles de l'essai de dégradabilité pour ensuite augmenter au cours des derniers cycles (Figures VII.7 et VII.8).

-Finalement pour l'échantillon d'Oued Fali (essai de dégradabilité) on voit la dimension fractale pour chaque face a changé d'une manière différente à l'autre face (VII.10).

L'augmentation de la DF peut être justifiée par l'ouverture des fissures dans l'échantillon et sa diminution est remarquée quand les fissures commencent à se refermer.

VII.3 Conclusion

La variation de DF d'un sol est affectée par sa dimension, sa forme, sa nature et la sollicitation appliquée.

Les résultats du calcul de la dimension fractale obtenus avec cette méthode prouvent son efficacité.

CONCLUSION GÉNÉRALE

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

Les principaux résultats obtenus permettent de tirer les conclusions suivantes :

-Le climat a un rôle important sur le changement de la texture, du volume et même des paramètres physiques des sols, les marnes sont classées parmi les sols influencés par les changements climatiques.

-La présence des minéraux sensibles à l'eau a un rôle très important dans le changement de comportement des échantillons.

- La dimension fractale suit les changements de forme et la déformation des échantillons. En effet, la dimension fractale est affectée par la structure et les changements de texture et de forme des échantillons.

-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 leur rugosité. Les algorithmes donnent donc une estimation satisfaisante de la dimension fractale.

La présente étude nous a permis d'explorer la relation entre le climat et le sol et comprendre mieux les influences climatiques sur le sol étudié, on a pu aussi faire une comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats analytiques du calcul de la dimension fractale par le logiciel MATLAB.

Le retrait-gonflement des sols et l'érosion de leur couche superficielle sont causés par les changements climatiques et la circulation des eaux en surface et en profondeur. 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 des protections et d'améliorations du sol.

Références Bibliographiques

- [1] **KHERARNA. A (2017)** « Les changements climatiques au Nord-est algérien Évolution récente et projections futures » mémoire de fin d'étude à l'Université Badji Mokhtar de Annaba.
- [2] **ANONYME (2014)** « Climat dans le monde » site internet <https://www.globe-trotting.com/post/ou-et-quand-partir-en-voyage-climat-dans-le-monde>.
- [3] **RHISSA.B (2017-2018)** « Étude de changement climatique au Nord-Est algérien » mémoire de fin d'étude à l'Université Badji Mokhtar de Annaba.
- [4] **ANONYME (2014)** «pensées unique» site internet <http://www.pensee-unique.fr/oceans.html> .
- [5] **ANONYME (2014)** «réchauffement climatique» site internet <http://www.notreplanete.info>.
- [6] **BATES, BRYSON, KUNDZEWICZ, ZBIGNIEW W, WU, Shaohong et al. (2008)** « Climate change and Water »: technical Paper vi. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- [7] **ANONYME** «Le monde et le climat» site internet <https://http://www.mathcurve.com/courbes2d/tautochrone/tautochrone.shtml>.
- [8] **LERAU.J (2005/2006)** « Chapitre 1 » cours de géotechnique 1 à Institut National Des Sciences de Toulouse
- [9] **BRETTE.A (2002)** « les sols » Cours de laboratoire partie 6, 19300 au Lycée Pierre Caraminot.
- [10] **YAHIA-AISSA. M (1999)** « Comportement hydromécanique d'une argile gonflante fortement compactée. » Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, CERMES, Paris.
- [11] **KICHI.H (2013-2014)** « Caractérisation mécanique et minéralogique des marnes de la Grande Kabylie » mémoire de fin d'étude à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [12] **NOBARI. E et DUNCAN. J (1972)** « Effect of reservoir filling on stresses and movements in earth and rockfill dams » International Report N°.TE-72-1, University of California, pp. 1-186.
- [13] **BAYER. E.D et RHODES. H.F.R (1932)** «Aggregate analysis as an aid in the study of soil structure relationships » 3. Amer. Soc. Agron. 24920-930.
- [14] **FROSSARD. E (2009)** « Scale effects in granular fill shear strength and in stability of large rockfill structures » XVIIth ICSMFE, Alexandria, Egypt, 5-9 Oct.
- [15] **YAHMI. L (2017/2018)** « Étude de la variation de la dimension fractale des marnes sous conditions caniculaires » mémoire de fin d'étude à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.

- [16] **ZITA .M (2016/2017)** « les effets des sollicitations saisonnières sur les sols argileux et détermination de la dimension fractale » mémoire de fin d'étude à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.
- [17] **JOSIANE. L (2006)** « La géométrie fractale » Mémoire de fin d'étude à l'Université trois-Rivieres de Québec.
- [18] **ANONYME** «futura sciencee,» site internet www.futura-sciences.com.
- [19] **GOUYET J.F (1992)** « Physique et Structure Fractales » Edition Paris New York.
- [20] **MONDELBROT. B.B (1975)** « Les objets fractals, forme, hasard dimension » 190pp Éditions Flammarion.Paris
- [21] **BOUZEBOUDJA .A (2016)** « L'influence de la dimension fractale en 3D sur les caractéristiques mécaniques des matériaux granulaires », 2016.
- [22] **SARKAR. N et CHAUDHURI. B.B (1992)** « An efficient Differential Box-Counting approach to compute fractal dimension of textural images » Pattern. Recognition Letters, vol. 25, pp. 1035-1041.
- [23] **LI. J, DU. Q et SUN. C (2009)** « An improved box-counting method for image fractal dimension estimation » Pattern Recognition, vol. 42, pp. 2460-2469.
- [24] **PLESHANOV. V. S, NAPRYUSHKIN. A.A et KIBITKIN. V.V (2010)** « Use of the Theory of Fractals in Image Analysis Tasks » vol. 46, no. 1, pp. 86-97
- [25] **CHEHEB. F (2016)** « Étude expérimentale et analytique de la perméabilité des argiles stratifiées. » Thème de Master en génie civil option Géotechnique et Environnement, LGEA, Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [26] **SARKAR. N et CHAUDHURI. B.B (1992)** « An efficient Differential Box-Counting approach to compute fractal dimension of textural images » Pattern. Recognition Letters, vol. 25, pp. 1035-1041.
- [27] **SUN. W, XU. G, GONG. P et LIANG. S (2006)** « Fractal analysis of remotely sensed images : Areview of methods and applications » International Journal of Remote Sensing, vol. 27, no. 22, pp. 4963-4990.
- [28] **CHENG. Q (1999)** « The gliding box method for multifractal modeling » Computer. Geoscience, vol. 25, pp. 1073-1079
- [29] **DU. G et YEO. T.S (2002)** « A novel Multifractal Estimation Method and Its Application to Remote Image Segmentation » IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, vol. 40, no.4, pp. 980-982.
- [30] **LEE. W.L et HSIEH. K.S (2010)** « A robust algorithm for the fractal dimension of images and its applications to the classification of natural images and ultrasonic liver images » Signal Processing, vol. 90, pp. 1894-1904.
- [31] **JIN. X.C, HONG. S.H et JAYASOORIAH (1995)** « A practical method for estimating fractal dimension » Pattern Recognition Letters, vol. 16, pp. 457-464.

Normes utilisées (AFNOR : reconnaissance et essais)

- **NF P 94-093_Proctor_Octobre (1999)** : « Détermination des références du compactage d'un matériau. »
- **NFP 94- 041 (1995)** : « Analyse granulométrique, méthode de tamisage par voie humide. »
- **NFP 94-050 (1995)** : « Détermination de la teneur en l'eau pondérale des matériaux- Méthode par étuvage ».
- **NFP 94-051 (1993)** : « Détermination des limites d'Atterberg la limite à la coupelle – limite de plasticité au rouleau ».
- **NFP 94- 053 (1991)** : « Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire. Méthode de la trousse coupante, du moule et de l'immersion dans l'eau »
- **NFP 94-057 (1992)** : « Analyse granulométrique des sols par sédimentométrie »
- **NFP 94-060-1** : « Détermination conventionnelle de la limite retrait sur le passant à 400µm d'un matériau ».
- **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 1367-1 (2000)** : « Essais pour déterminer les propriétés thermiques et l'altérabilité des granulats, Partie 1 : Détermination de la résistance au gel/dégel ».
- **NF EN 1367-4 (1998)** : « Essais pour déterminer les propriétés thermiques et l'altérabilité des granulats, Partie 4 : Détermination du retrait au séchage ».