

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté de Génie de la Construction
Département de Génie Civil
Laboratoire de Géomatériaux, Environnement et Aménagement (LGEA)



MEMOIRE DE MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Génie Civil

Option : Géotechnique et Environnement

Réalisé par :

Mr : ZETA MADANI

Sujet :

***Les effets des sollicitations saisonnières sur les
sols argileux et détermination de la dimension
fractale***

Devant le jury composé de :

Mr MELBOUCI Bachir, Professeur à l'UMMTO Président
M^{me} BOUZEBODJA Aldjia, Maître Assistante-A à l'UMMTO.....Promotrice
M^{me} BAIDI Fawzia, Maître Assistante-A à l'UMMTO.....Examinatrice

Année Universitaire : 2016/2017



REMERCIEMENTS

En premier lieu, je remercie DIEU, Le Tout-Puissant, de m'avoir aidé à arriver au terme de ce travail et grâce à Qui toutes bonnes choses arrivent.

Mes vifs remerciements vont à ma promotrice, Mme BOUZEBoudja Aldjia, Maître Assistante-A à l'UMMTO, pour sa prise en charge pédagogique, ses conseils judicieux, ses orientations et sa patience.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude au Professeur MELBOUCI Bachir, Professeur à l'UMMTO et directeur de laboratoire LGEA, pour les moyens qu'il a mis à ma disposition afin de pouvoir réaliser ce travail et pour avoir accepté de présider le jury de soutenance du présent mémoire.

Mes sincères remerciements vont aussi vers le membre du jury, M^{me} BAIDI Fawzia, Maître Assistante-A à l'UMMTO, qui me fait l'honneur d'examiner ce modeste travail.

Enfin, mes sincères remerciements et ma profonde gratitude sont exprimés pour toutes les personnes qui m'ont aidé à réaliser ce travail ; l'ingénieur du laboratoire LGEA Mr LACHEBI Kamal et les doctorants de géotechnique qui m'ont aidé beaucoup dans la réalisation des essais, à tous les responsables et les employés des deux entreprises LNHC d'Alger et de Tizi-Ouzou et le laboratoire privé de travaux publics et construction de Tizi-Ouzou, qui m'ont donné des échantillons intacts et même des idées sur les essais. A mon ami Toufik, avec qui j'ai partagé les meilleurs moments durant deux ans.

Dédicace

Je dédie ce lapidaire travail :

A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et elle m'a soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir atteindre mes buts.

A mon très cher frère Mohamed, qui m'a toujours soutenu.

A ma chère sœur Mehdiya et son mari Djamel et son enfant Mohamed, qui m'ont toujours encouragé pour continuer jusqu'à la fin.

A ma grande mère et mes tantes et ses enfants Chaouki, Malek, Mohamed.

A Tata Rabia et mes cousins et mes cousines, à toute la famille ZETAH.

A Tous mes amis d'enfance et de mon quartier : Mohamed, Abdelhak, Sidali, Lotfi, Abdallah et les autres, à mes amis de l'université : Mehammed, Salim, Abdelhakim, Amine, Sofiane et Mehdi.

A tous les étudiants de ma promotion et de la cité universitaire BOUKHALFA, Bloc F son oublier mon ami Toufik avec qui j'ai partagé les meilleurs moments durant les deux dernières années.

SOMMAIRE

Remerciements	
Dédicace	
Liste des symboles et notations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
INTRODUCTION GENERALE.....	1
PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE :	
Chapitre I : Objet fractals et la dimension fractale	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Définition de fractale et son histoire	4
I.3 Objet fractal.....	6
I.3.1 Définition.....	6
I.3.2 Caractéristique d'un objet fractale.....	6
I.3.2.1 Autosimilarité.....	7
I.3.2.2 Classification des objets fractals.....	7
I.3.2.2.1 fractales non déterministes.....	7
I.3.2.2.2 fractales déterministes.....	9
I.4 Méthodes Fractales.....	10
I.5 Notion de dimension fractale.....	11
I.5.1 Dimension fractale.....	11
I.5.1.1 Dimension euclidienne ou topologique.....	12
I.5.1.2 Dimension de Hausdorff ou dimension fractale.....	13
I.6 Application à la dimension fractale.....	14
I.6.1 Le flocon de Koch.....	14
I.6.2 Triangle de Sierpinsky (Bertrand et Converset, 2006).....	15
I.6.3 Tapis de Sierpinsky	15
I.6.4 Ensembles de Julia	16
I.6.5 Ensemble de Mandelbrot	16
I.6.6 Eponge de Menger	18
I.7 Conclusion.....	19

Chapitre II : Calcul de la dimension fractal et son application

II.1	Introduction.....	21
II.2	Surface-Périmètres (Area-Périmètres).....	21
II.3	Line Divider (méthode du diviseur).....	23
II.4	Méthode des lignes parallèles.....	25
II.5	Méthode des masses.....	26
II.6	Méthode de compactage des boîtes (box counting)	27
II.6.1	Calcul de la dimension fractale du contour du grain seulement.....	28
II.6.2	Calcul de la dimension fractale de la surface intérieure du grain.....	29
II.7	Conclusion.....	30

Chapitre III : Influence climatique sur le sol étudié

III.1	Introduction.....	32
III.2	Présentation De Matériau Étudiés.....	32
III.2.1	Définition et Origine Des Argiles.....	32
III.2.2	Structure des argiles.....	32
III.2.3	Les principaux types de minéraux argileux.....	33
III.2.3.1	La kaolinite $[\text{Si}_2 \text{Al}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4]$	33
III.2.3.2	La montmorillonite $[\text{Si}_4 \text{Al} (2-x) \text{Mg}_x \text{O}_{10} (\text{OH})_2, n\text{H}_2\text{O}]$	34
III.2.3.3	Les illites $[\text{Si} (4-x) \text{Al}_x \text{Al}_2 \text{O}_{10} (\text{OH})_{2x} \text{K}]$	36
III.2.4	Les minéraux argileux et le système « argile – eau ».....	37
III.2.5	Caractéristique physique des argiles.....	37
III.2.5.1	Paramètres d'état	37
III.2.5.2	Paramètres de nature.....	38
III.2.6	Caractéristiques mécaniques des argiles.....	38
III.2.7	Caractéristique hydraulique des argiles	38
III.2.8	Texture des argiles.....	39
III.3	le climat et ses effets sur le matériau étudié	40
III.3.1	Situation géographique	40
III.3.2	Climat De Tizi-Ouzou.....	41
III.3.3	Précipitations.....	41
III.4	Influence climatique sur l'argile.....	42
III.4.1	Le retrait-gonflement	42
III.4.2	Les fissures	43

III.4.3 Transformations des minéraux.....	45
III.5 Conclusion.....	45
PARTIE EXPERIMENTALE :	
Chapitre IV : Identification du sol étudié	
IV.1 Introduction.....	47
IV.2 Origine des matériaux utilisés	47
IV.3 Caractéristiques physiques et minéralogiques.....	48
IV.3.1 Caractéristiques physiques.....	48
IV.3.1.1 Teneur en eau naturelle W % (NF P 94 – 050) – Méthode par étuvage.....	48
• Interprétation des résultats.....	49
IV.3.1.2 Masse volumique des sols.....	49
a) Masse volumique des grains solides des sols selon (NF P 94 – 054) – Méthode au pycnomètre.....	49
b) Masse volumique humide de sol (NF P 94 - 053) – Méthode de l’immersion dans l’eau.....	50
c) Masse volumique du sol sec (NF P 94 – 064)	50
IV.3.1.3 Indice des vides et Degré de saturation.....	51
a) Indice des vides (e).....	51
b) Degré de saturation S_r (%).....	51
IV.3.1.4 L’analyse granulométrique par la sédimentation [NF P 94- 056].....	52
a) Principe de l’essai.....	52
b) La procédure de l’essai.....	52
c) Les résultats des analyses granulométriques par sédimentation	53
d) Interprétation des résultats	55
IV.3.1.5 Les limites d’ATTERBERG [NF P 94-051].....	55
IV.3.1.5.1 La procédure de l’essai.....	56
a) La détermination de la limite de liquidité	56
b) La détermination de la limite de plasticité	57
c) L’indice de plasticité.....	58
d) Résultats des limites d’Atterberg.....	58
d.1 La limite de plasticité.....	58
d.2 La limite de liquidité	59
e) Interprétation des résultats	62

IV.3.1.6 L'activité AC	62
IV.3.1.7 Mesure du potentiel de gonflement.....	62
IV.3.1.7.1 Classifications.....	63
a) <i>Classifications selon un seul paramètre</i>	63
b) Combinaison de deux paramètres.....	63
IV.3.1.8 Mesure du potentiel de retrait	64
IV.3.1.9 Valeur au bleu de méthylène (VBS) (NF P 94 – 068) – Essai à la tâche.....	65
• Interprétation des résultats.....	66
IV.3.2 Analyse des compositions minéralogiques des échantillons étudiés.....	67
IV.3.2.1 Principe de la diffraction aux rayons X.....	67
IV.3.2.2 Principe du MEB:.....	68
IV.3.2.3 Minéralogie des sites étudiés	69
IV.3.2.4 Images Au Microscope Électronique À Balayage (MEB)	70
IV.4 Conclusion.....	72

Chapitre V : Les essais réalisés sur le sol étudié

V.1 Introduction.....	74
V.2 Préparation des échantillons.....	74
V.2.1 Etape de préparation.....	74
V.3 les essais réalisés.....	75
V.3.1 essai gel dégel.....	75
V.3.1.1 Principe d'essai.....	75
V.3.1.2 Appareillage.....	75
V.3.1.3 Déroulement d'essai.....	76
V.3.1.4 Images des échantillons.....	76
• Interprétation des images des échantillons	78
V.3.1.5 Les résultats obtenus	79
• Interprétation des résultats.....	81
V.3.2 Essai de Dégradabilité.....	82
V.3.2.1 But de l'essai.....	82
V.3.2.2 Appareillage.....	82
V.3.2.3 Le déroulement de l'essai.....	82
V.3.2.4 Les images retenues des échantillons.....	83

• Interprétation des images des échantillons	86
V.3.2.5 Les résultats obtenus.....	87
• Interprétation des résultats.....	88
V.4 Conclusion.....	88

Chapitre IV : Le calcul de la dimension fractale par la méthode box counting

IV.1 Introduction.....	90
IV.2 Application de la méthode Box Counting.....	90
IV.3 Les résultats et interprétations.....	91
• Résultats de l'essai Dégradabilité	91
• Résultats de l'essai gel dégel.....	94
• Interprétation des résultats.....	98
IV.4 Conclusion.....	99
CONCLUSION GENERALE.....	100
Annexe A.....	101
Annexe B.....	104
REFERENCE.....	111

LISTE DES SYMBOLES ET NOTATIONS

<i>Notation</i>	<i>Définition</i>
W	Teneur en eau (%).
w_w	Masse de l'eau (g).
w_s	Masse de l'échantillon à l'état sec (g).
m₁	Masse du pycnomètre vide (g).
m₂	Masse du pycnomètre plein d'eau (g).
m₃	Masse du pycnomètre avec le matériau (g).
m₄	Masse du pycnomètre avec le matériau et l'eau (g).
m_s	Masse sèche (g).
m_h	Masse humide (g).
ρ_w	Masse volumique de l'eau égale à 1 (g/cm³).
ρ_s	La masse volumique des particules solides (g/cm³).
ρ_d	Masse volumique du sol sec (g/cm³).
ρ_h	Masse volumique humide (g/cm³).
e	Indice des vides.
Sr	Degrés de saturation (%).
Y_s	Poids spécifique des grains solides (N/m³).
Y_w	Poids spécifique (N/m³).
V_s	Volume des grains solides (cm³)
V_v	Volume des vides (cm³)
V_w	Volume de l'eau (cm³).
R	Lecture sur le pycnomètre.
R'	Lecture corrigée.
D	Diamètre des grains (mm).
T	Température de burette (°C).
T'	Température de la burette ambiante (°C).
W_L	Limite de liquidité (%).
W_p	Limite de plasticité (%).
I_p	Indice de plasticité (%).
I_c	Indice de consistance (%).

VBS	La valeur de bleu de sol.
M_s	Masse sèche de la prise d'essai (g).
M_b	La masse de bleu permettant la saturation par adsorption (g).
F2	Proportion d'argile F2 %<2μm.
A_c	Activité de Skempton.
DF_R	Dimension fractale de rugosité.
DF	Dimension fractale.
C	Une valeur constante qui décrit la similitude de la forme fractale.
P	Périmètre du grain (mm).
A	Surface du grain (mm).
P (l)	Périmètre polygone (mm).
D_{tot}	Dimension totale de fractale.
λ	Espacement constant sur un ensemble de lignes parallèles.
M(R<r)	Masse cumulative des particules avec la taille R plus petite qu'un comparatif donnée de classer (g).
M_t	Masse totale des particules (g).
r	Taille de l'ouverture des passoires (mm).
r_L	Dimension des particules maximale définie par la plus grande ouverture de la taille des passoires (mm).
X	Dimension des boîtes.
N(X>x)	Nombre des boîtes.
K	Constante.
M	La pente de la droite la mieux adaptée à l'équation.
F	Argile de site de Freha (passé par les conditions initiales de chaque essai).
F.N	Argile de site de Freha à l'état naturel (sans passé aux conditions).
C.V	Argile de site de centre ville de Tizi-Ouzou (passé par les conditions initiales de chaque essai).
C.V.N	Argile de site de centre ville de Tizi-Ouzou (sans étuvage).

LISTE DES FIGURES

Chapitre I :

Figure I.1 : exemples anciens sur la géométrie fractale (LEHAMEL.M, 2011).....	6
Figure I.2 : les photos montrent quelque objet fractal dans la nature (OUTAYEB.S, 2016)...	8
Figure I.3: Exemple de fractales aléatoires (BOUZEBOUDJA.A ,2016).....	9
Figure I.4 : Fractale dite ensemble de MANDELBROT. (JOSIANE. L, 2006).....	10
Figure I.5: Approximation de la longueur de la cote de Grande-Bretagne à l'aide d'une ligne polygone (JOSIANE. L, 2006).....	11
Figure I.6: Les trois dimensions entières (FALCONER. K. 1990).....	13
Figure I.7.a: Etapes de construction de la courbe de Von Koch.....	14
Figure I.7.b : courbe de Von Koch(LEHAMEL.M, 2011).....	14
Figure I-8: triangle de Sierpinsky (LEHAMEL.M, 2011).....	15
Figure I.9 : tapis de Sierpinsky. (BOUDET. A, 2008).....	16
Figure I.10 : Ensemble de Julia, création en spirale (BOUDET. A, 2008).....	16
Figure I.11, a : Deux représentations, une en plan large et un zoom sur un détail (BELCASTRO. P, 2009)	17
Figure I.11, b : la texture lumineuse de modèle de sorbet de la version quadratique du Mandelbrot (BELCASTRO.P, 2009).....	17
Figure I.12: Eponge de Menger (YEZLI.S, 2011).....	18

Chapitre II :

Figure II.1: Exemple d'une image binaire obtenue après l'analyse d'image d'un grain de sable (ACHIR. M, 2011).....	21
Figure II.2 : Calcul du périmètre et de la surface d'un grain ($\Phi = 6.3$ mm) à l'aide de logiciel Auto-CAD 2009).....	22
Figure II.3: Application de la méthode Surface-Périmètre sur les grains du schiste (8 mm de diamètre). (BOUZEBOUDJA.A, 2016).....	23
Figure II-4: a): le grain de sable après l'analyse de l'image. Le reste des figures contient les polygones tracés sur grains avec une taille de mesure. b): 2 mm. c) : 1 mm et d) 0.25mm (BOUZEBOUDJA.A, 2016).....	24

Figure II-5: calcul de la dimension fractale (a) Totale (b) Texturale (D1) et structurale (D2) (BOUZEBOUDJA.A, 2016).....	24
Figure II.6 : Présentation des exemples sur l'application de la méthode des lignes parallèles sur un grain de 5 mm (YEZLI. S, 2011).....	25
Figure II.7 : Détermination de la dimension fractale par la méthode des lignes parallèles (YEZLI. S, 2011).....	26
Figure II-8 : Détermination de la dimension fractale DFr par la méthode des masses (BOUZEBOUDJA.A, 2016).....	27
Figure II-9 : Différentes étapes de maillage de l'image du grain et illustration de la méthode de Box Counting (OUTAYEB.S, 2016).....	28
Figure II-10: Calcul de la dimension fractale de la rugosité du grain (ACHIR, M.2001).....	29
Figure II.11 a: Différentes étapes de maillage de l'image du grain avec prise en compte de la surface intérieure du grain (OUTAYEB.S, 2016).....	29
Figure II.11 b : Calcul de la dimension fractale de fragmentation de la surface intérieure du grain (ACHIR, M.2001).....	30

Chapitre III :

Figure III.5: Couches tétraédriques, octaédriques (MADJNOUN.A, 2014).....	33
Figure III.2: a) Schéma de la structure de la kaolinite (LAMBE.A (1953)) ; b) Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite. (MADJNOUN.A, (2014)).....	34
Figure III.3 : photographie d'une kaolinite prise au microscope électronique à balayage (DJONKAML A.Y, (2010)).....	34
Figure III.4 : Photographie d'une montmorillonite prise au microscope Électronique à balayage (LAMBE.A (1953)).....	35
Figure III.5: Schéma de la structure de la montmorillonite (LAMBE.A (1953)).....	35
Figure III.6: Vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite. (MADJNOUN.A, 2014).....	35
Figure III.7: Schéma de la structure de l'illite (LAMBE.A (1953)).....	36
Figure III.8: photographie d'une illite prise au microscope électronique à balayage. (LAMBE.A (1953)).....	36
Figure III.9 : Photographie MEB de texture matricielle (a: Argile Verte de Romainville) et texture agrégé (b : Argile de Bavent) (VINCENT.L et Al. 2009).....	39

Figure III.10: wilaya de Tizi-Ouzou.....	40
Figure III.11: Conséquence du gonflement des argiles dans la déstructuration d'un sol (FAGEL.N, 2005).....	44
Figure III.13: Schéma présente le Mécanisme de gonflement - retrait des argiles (CALVET.R, 2009).....	44
Figure III.14: les fissures avec ses différents degrés.....	45

Chapitre IV :

Figure IV-6 : Image de satellite qui donne les sites d'échantillonnage.....	48
Figure IV.2 : Les étapes de l'essai au pycnomètre.....	49
Figure IV.3 : Matériel d'essai au pycnomètre.....	49
Figure IV.4 : Matériel d'essai de l'immersion dans l'eau.....	50
Figure IV.5 : Matériel d'essai du poids volumique du sol sec.....	50
Figure IV-6: Matériel d'essai d'Analyse granulométrique par sédimentométrie.....	53
Figure IV-7 : Analyse granulométrique par sédimentation site (Friha).....	54
Figure IV-8: Analyse granulométrique par sédimentation site (centre ville).....	55
Figure IV-9: Limite limites d'Atterberg [Santamarina, 2001].....	56
Figure IV-10 : Les matériels utilisés.....	57
Figure IV-11 : Le mortier malaxé.....	57
Figure IV.12 : Le remplissage de la coupelle de Casagrande.....	57
Figure IV.13 : La fermeture de la rainure (CHEHEB.F ,2016).....	57
Figure IV.14: La confection du rouleau (CHEHEB.F ,2016).....	58
Figure IV-15 : La fissuration et brisure du rouleau (CHEHEB.F ,2016).....	58
Figure IV.16: Courbe de limite de liquidité. L'argile de Friha.....	60
Figure IV.17 Courbe de limite de liquidité. L'argile de centre ville.....	60
Figure IV.18: Présentation de la plasticité des sols étudiés dans l'abaque de Casagrande.....	61
Figure IV.19: potentiel de retrait (Building Research Establishment, 1980).....	64
Figure IV.20: Matériel d'essai au bleu de méthylène (Essai à la tâche). Résultats de l'essai à la tâche.....	65
Figure IV.21 : Principe de la diffraction aux rayons X (MADJNOUN.A, 2014).....	68
Figure IV.22: Diagramme montrant le principe de la microscopie électronique à Balayage (MADJNOUN.A, 2014).....	69

Figure IV.23 : Le MEB utilise pour la réalisation des observations (MADJNOUN.A, 2014).....	69
Figure IV.24 : Image MEB réalisée sur un échantillon extrait de la région de Fréha de Tizi-Ouzou.....	70
Figure IV.25 : Image MEB réalisée sur un échantillon extrait de la région de Centre ville de Tizi-Ouzou.....	71

Chapitre V:

Figure V.1: Préparation de l'échantillon.....	74
Figure V.2: Matériel utilisé.....	75
Figure V.3: les images d'échantillon N°1 d'argile Fréha à état naturel, après étuve et après enceinte climatique.....	77
Figure V.4: les images d'échantillon d'argile (C.V.N) à état naturel, après étuve et après enceinte climatique.....	78
Figure V.5: la variation de la masse d'argile C.V au cours d'essai.....	80
Figure V.6: la variation de la masse d'argile Fréha au cours d'essai.....	80
Figure V.7: la variation de la masse des deux sites d'argile à l'état naturel au cours d'essai.....	81
Figure V.8: la technique d'imbibé par la seringue.....	83
Figure V.9: Evaluation d'échantillon N°1 d'argile Centre ville (C.V) pendant l'essai Dégradabilité, à l'état naturel et après chaque cycle.....	84
Figure V.10: Evaluation d'échantillon N°1 d'argile Fréha (F) pendant l'essai Dégradabilité, à l'état naturel et après chaque cycle.....	85
Figure V.17: la variation de la masse d'argile Fréha au cours d'essai Dégradabilité.....	87
Figure V.12: la variation de la masse d'argile centre ville au cours d'essai Dégradabilité...	88

Chapitre VI:

Figure VI.1 : exemple du calcul DFR par le logiciel MATLAB R2009b.....	91
Figure VI.2 : courbe de variation de la dimension fractale en fonction des cycles climatiques de l'essai Dégradabilité de l'échantillon N°1 de C.V.....	92
Figure VI.3 : courbe de variation de la dimension fractale en fonction des cycles	

climatiques de l'essai Dégradabilité de l'échantillon N°2 de C.V.....	92
Figure VI.4 : courbe de variation de la dimension fractale en fonction des cycles climatiques de l'essai Dégradabilité de l'échantillon N°1 de F.....	93
Figure VI.5 : courbe de variation de la dimension fractale en fonction des cycles climatiques de l'essai Dégradabilité de l'échantillon N°2 de Fr.....	94
Figure VI.6: courbe de variation de la dimension fractale en fonction des cycles climatiques de l'essai Dégradabilité de l'échantillon N°1 de F.....	94
Figure VI.7: courbe de variation de la dimension fractale en fonction des cycles climatiques de l'essai Dégradabilité de l'échantillon N°2 de F.....	95
Figure VI.8: courbe de variation de la dimension fractale en fonction des cycles climatiques de l'essai Dégradabilité de l'échantillon N°3 de F.N.....	96
Figure VI.9: courbe de variation de la dimension fractale en fonction des cycles climatiques de l'essai Dégradabilité de l'échantillon N°1 de C.V.....	96
Figure VI.10: courbe de variation de la dimension fractale en fonction des cycles climatiques de l'essai Dégradabilité de l'échantillon N°2 de C.V.....	97
Figure VI.11: courbe de variation de la dimension fractale en fonction des cycles climatiques de l'essai Dégradabilité de l'échantillon N°3 de C.V.N.....	98

Annexe A :

Figure A.1 : Les images prises pendant la réalisation des essais d'identifications.

Annexe B :

Figure B.1: les images d'échantillon N°2 d'argile Centre ville (C.V), après chaque cycle de l'essai de Dégradabilité.

Figure B.2 : les images d'échantillon N°1 d'argile Fréha (F), après chaque cycle de l'essai de Dégradabilité.

Figure B.3 : les images d'échantillon d'argile (F.N) à état naturel, après étuve et après enceinte climatique.

Figure B.4 : les images d'échantillon N°2 d'argile Fréha(F) à état naturel, après étuve et après enceinte climatique.

Figure B.5 : les images d'échantillon N°1 d'argile Centre ville(C.V), à état naturel, après étuve et après enceinte climatique.

Figure B.6 : les images d'échantillon N°2 d'argile Centre ville(C.V), à état naturel, après étuve et après enceinte climatique.

LISTE DES TABLEAUX :

Chapitre III :

Tableau III-1 : Minéraux argileux.....	36
Tableau III-2 : Caractéristiques physiques générales des argiles.....	37
Tableau III.3 : climatologique de Tizi-Ouzou (période 2001-2015).....	41
Tableau III.4 : Précipitations moyennes mensuelles et totaux pluviométriques (en mm) à certaines localités de la région d'étude (période 1989-2008).....	42

Chapitre IV :

Tableau IV.1: Détermination de la teneur en eau naturelle.....	48
Tableau IV.2: Masse volumique des grains solides.....	49
Tableau IV.3: masse volumique humide.....	50
Tableau IV.4: Classification les masses volumiques sec.....	50
Tableau IV.5: Masse volumique du sol sec.....	51
Tableau IV.6: Indice des vides pour les 2 sites.....	51
Tableau IV.7: L'état de saturation du matériau.....	51
Tableau IV.8: Degré de saturation pour les 2 sites.....	51
Tableau IV.9: Résultats des analyses granulométriques par sédimentométrie pour le site Friha.....	53
Tableau IV.10: Résultats des analyses granulométriques par sédimentométrie pour le site centre ville.....	54
Tableau IV.11 : Résultats des limites de plasticité.....	59
Tableau IV.12: Limite de liquidité de l'échantillon N°02(Argile de Friha).....	59
Tableau IV-13: Limite de liquidité de l'échantillon N°01(Argile centre ville).....	59
Tableau IV-14: les teneurs en eau obtenues en ordonnée et le logarithme du nombre de coups égale à 25.....	60
Tableau IV-15: les résultats et les appréciations.....	61
Tableau IV-16: l'indice de consistance.....	61
Tableau IV-17: résultats de l'indice de consistance.....	62
Tableau IV.18: Activité (AC) de SKEMPTEN pour les deux sols	62

Tableau IV.19 : Evaluation du potentiel de gonflement à partir de l'indice de plasticité (MOUROUX et al ,1988).....	63
Tableau IV.20: Résultats du potentiel de gonflement à partir de l'indice de plasticité (D'après Mouroux et al ,1988).....	63
Tableau IV.21 : Degré d'expansion en fonction de limite de liquidité et l'indice de plasticité (D'après Snethen et al ,1977).....	63
Tableau IV.22 : Résultats de Degré d'expansion en fonction de limite de liquidité et l'indice de plasticité (D'après Snethen et al ,1977).....	63
Tableau IV.23: Evaluation du potentiel de gonflement à partir de l'indice de plasticité.....	64
Tableau IV.24: Désignation du sol en fonction de son VBS.....	66
Tableau IV.25: Résultats des valeurs au bleu de méthylène.....	66
Tableau IV.26: Résultats finale des expériences.....	67
Tableau IV.27 : La composition minéralogique estimative semi quantitative.....	69

Chapitre V:

Tableau V.1: la variation de la masse de l'argile C.V pendant l'essai.....	79
Tableau V.2: la variation de la masse de l'argile F pendant l'essai.....	80
Tableau V.3: la variation de la masse de l'argile C.V.N et F.N pendant l'essai enceinte climatique.....	81
Tableau V.4: la variation de la masse d'argile au cours de l'essai.....	87

Chapitre VI:

Tableau VI.1: la variation de la dimension fractale en fonction les cycles pour l'argile C.V N°1.....	91
Tableau VI.2: la variation de la dimension fractale en fonction les cycles pour l'argile C.V N°2.....	92
Tableau VI.3: la variation de la dimension fractale en fonction les cycles pour l'argile C.V N°2.....	93
Tableau VI.4: la variation de la dimension fractale en fonction les cycles pour l'argile C.V N°2.....	93
Tableau VI.5 : la variation de la dimension fractale en fonction les cycles pour l'argile F. N°1.....	94

Tableau VI.6 : la variation de la dimension fractale en fonction les cycles pour l'argile F. N°2.....	95
Tableau VI.7: la variation de la dimension fractale en fonction les cycles pour l'argile F.N N°3.....	95
Tableau VI.8: la variation de la dimension fractale en fonction les cycles pour l'argile C.V, N°1.....	96
Tableau IV.9 : la variation de la dimension fractale en fonction les cycles pour l'argile C.V, N°2.....	97
Tableau VI.10 : la variation de la dimension fractale en fonction les cycles pour l'argile C.V.N N°3.....	97

INTRODUCTION GENERALE :

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

L'Algérie est pleinement concernée par le problème des argiles gonflantes ; qui sont présentes dans de nombreuses régions du nord et du sud du pays. Le phénomène de gonflement affecte chaque année divers types de structures (Bâtiment, chaussée, etc.) causant des désordres considérables, qui imposent des reprises en sous-œuvre très coûteuses. Le caractère gonflant de certaines argiles est lié en premier lieu au changement climatique, d'autres facteurs, tels que la structure du sol, sa densité et sa teneur en eau initiale, peuvent affecter de manière significative les déformations de ces argiles, ces déformations peuvent présenter des modifications de la texture et du volume en fonction des variations de la teneur en eau du terrain. Lors des périodes de sécheresse, le manque d'eau entraîne un tassement irrégulier du sol en surface par le retrait. À l'inverse, un nouvel apport d'eau dans ces terrains produit un phénomène de gonflement.

Les sol étudiés dans ce travail sont prélevés de la wilaya de Tizi-Ouzou ; cette dernière est située dans une zone à climat semi-aride, dont la géologie comporte des formations argileuses caractérisées par une forte variation de volume lorsque les conditions de leur équilibre sont modifiées (phénomènes climatiques naturels dus à une sécheresse prolongée ou une période très froide...), Des désordres importants apparaissent fréquemment dans les sols argileux (des variations de volumes, des changements de textures et même des changements de minéraux).

Dans ce travail de recherche, nous explorons la possibilité de mettre en relation le climat et le sol et comprendre mieux les influences climatiques sur le sol étudié avec une étude analytique par un logiciel, avec une comparaison des résultats expérimentaux avec les résultats analytiques à la fin.

Ce mémoire s'articule principalement en deux parties: une recherche bibliographique et une étude expérimentale.

La première partie est bibliographique, elle est composée de trois chapitres ;

Le premier chapitre est consacré à la définition des fractales et la dimension fractale est leur utilisation.

Le deuxième chapitre présente les méthodes de calcul de la dimension fractal et son application et la méthode utilisée dans cette étude.

Le troisième chapitre présente des généralités et l'influence climatique sur le sol, particulièrement les argiles, leurs propriétés et leurs minéralogies, suivis par des petites notions sur climat de Tizi-Ouzou et à la fin ses différentes influences sur le sol étudié.

La deuxième partie est expérimentale, elle est composée de trois chapitres :

Le quatrième chapitre est consacré pour la localisation et l'identification des sols prélevés, par des essais d'identification (analyse granulométrique par sédimentation, limites d'Atterberg, bleu de méthylène...).

Le cinquième chapitre présente les deux essais climatiques (essai Gel-dégel et 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 avec le logiciel MATLEB, par les images prises pour les échantillons durant les essais. Ce qui nous a permis de faire une comparaison entre les résultats obtenues par la méthode expérimentale et ceux obtenues par la méthode analytique.

Enfin, les deux annexes ont été organisées comme suit :

ANNEXE A montre les images prises pendant la réalisation des essais d'analyse granulométrique par sédimentation et l'essai d'Atterberg.

ANNEXE B représente les images des échantillons prises au cours des essais de dégradabilité et de gel-dégel.

Chapitre 1

***OBJETS FRACTALS ET LA DIMENSION
FRACTALE***

I.1 Introduction :

Pendant des milliers d'années, les connaissances mathématiques au sujet des objets fractals étaient pratiquement nulles. À l'époque des Grecs, les seules formes qui étaient étudiées étaient le cercle, le carré, le triangle, etc. Toutes les autres formes n'étaient pas considérées, car elles étaient de natures asymétriques et dites imparfaites, ce n'est qu'au 17^{ème} siècle qu'on commence à étudier les fractales par des mathématiciens jusqu'au 19^{ème} siècle, le mathématicien B. Mandelbrot a inventé l'adjectif **fractal**, Il fait des définitions sur l'objet fractal, son concept et les types fractales. Ce qu'il a donné une rénovation pour cette connaissance mathématique.

Dans ce premier chapitre, la théorie permettant de bien saisir le sujet de recherche sera exposée. Tout d'abord, le concept théorique de fractal sera discuté. En donnera quelques notions et définitions sur la théorie fractale et on introduira en particulier l'histoire et la définition de fractal ou objet fractal et ces caractéristiques, même la classification fractales et la dimension fractale qui est le complément manquait à la dimension euclidienne et à la symétrie cristalline.

. . . « objet fractal » et « fractale », termes que je viens de former, pour les besoins de ce livre, à partir de l'adjectif latin fractus, qui signifie « irrégulier ou brisé ».

Fractale. n. f. Configuration fractale. Ensemble ou objet fractal.

Benoît Mandelbrot, Les objets fractals, 1975

I.2 Définition de fractal et son histoire :

Avec ces termes, Le fondateur Mandelbrot invente l'adjectif « *fractal* » (du latin «fractus», du verbe «*frangere*» qui signifie brisé, irrégulier, fragmenté) pour décrire les figures géométriques d'une structure complexe. Mais, si l'on y réfléchit, il est en fait assez difficile de donner une définition exacte de ce mot car il regroupe plusieurs concepts différents : l'autosimilarité à toutes les échelles, la non dérivabilité, la dimension non entière, le hasard ou le chaos ; un objet fractal peut présenter une ou plusieurs de ses caractéristiques.

Depuis très longtemps, l'homme a été fasciné par des formes géométriques particulières qu'il observa dans la nature et qu'il créa pour décorer ses habitations, ses

vêtements, ou encore ses lieux de culte même ou ces lieux d'habitation (Figure. I.1). Par la suite, ces formes ont été étudiées par des mathématiciens. Au milieu de 19^{ème} siècle, pour un mathématicien, une courbe est continue et possède une tangente en chacun de ces points sauf sur certains points dits singuliers et elle est de dimension **1**. Tout tracé qui n'entre pas dans ce modèle est pathologique. Vers la fin du 19^{ème} siècle, quelques mathématiciens s'intéressent à des courbes continues sans tangente, vite qualifiées de "monstres" par les contemporains. Et pourtant ceux-ci ne font qu'anticiper ce que l'on va nommer la géométrie fractale, développée et popularisée par Benoît Mandelbrot.

Déjà, en 1890 **Giuseppe Peano** (1858-1932, italien) exhibe une courbe connue sous le nom de courbe de Peano, qui remplit véritablement tout un carré (PEANO.G, 1890). **Helga Von Koch**, en 1904, dessina le flacon de neige le plus célèbre de l'histoire des mathématiques qui est un exemple de courbe sans tangente en aucun point (Von Koch. 1904). D'autres exemples d'objets tels que la poussière de **Cantor** (CANTOR. 1884), les triangles et éponges de Sierpinsky, qui sont des créations de l'esprit humain et très éloignées de la nature, faisaient dire à Poincaré, pourtant traducteur de Cantor, que l'on ne devrait pas exhiber ces exemples qui mettent en défaut le raisonnement de nos pères et n'utilisent aucune théorie. Or des mathématiciens, comme Jordan qui essaie de trouver une définition du mot "courbe" mieux adaptée à la diversité des modèles mathématiques ou Cantor qui établit la bijection entre les points d'un segment et ceux d'un carré, montrent la nécessité d'élargir la notion de dimension d'un objet. Dès 1935 une dimension fractionnaire (D) d'environ 1,26 a été attribuée au flacon de Von Koch. Ainsi, la dimension fractale constitue une généralisation de la notion de dimension entière, propre à la géométrie euclidienne. Par ailleurs, ces objets géométriques douteux n'acquièrent un statut à part entière que dans les années soixante-dix, grâce au mathématicien français Benoit MANDELBROT qui en fait l'objet d'une nouvelle discipline mathématique : la géométrie fractale.

En effet, la nature n'est pas analytique, lisse, dérivable, mais elle est plutôt fractale. Ces objets que CANTOR, PEANO, VON KOCH, SIERPINSKY etc. ont inventés, décrivent mieux la nature que les fonctions analytiques des physiciens du XIX^e siècle. La géométrie fractale prend donc le relais et permet d'étudier avec succès, ces objets appelés objets fractals ou encore fractals.

Après MANDELBROT, bien d'autres mathématiciens et informaticiens ont utilisé les possibilités immenses, en termes de calculs et d'imageries, offertes par l'informatique pour développer cette théorie. Les fractales sont toutes définies de façon

constructives et itérative. Cela implique que l'on ne peut en présenter que des approximations obtenues grâce à des calculs numériques.

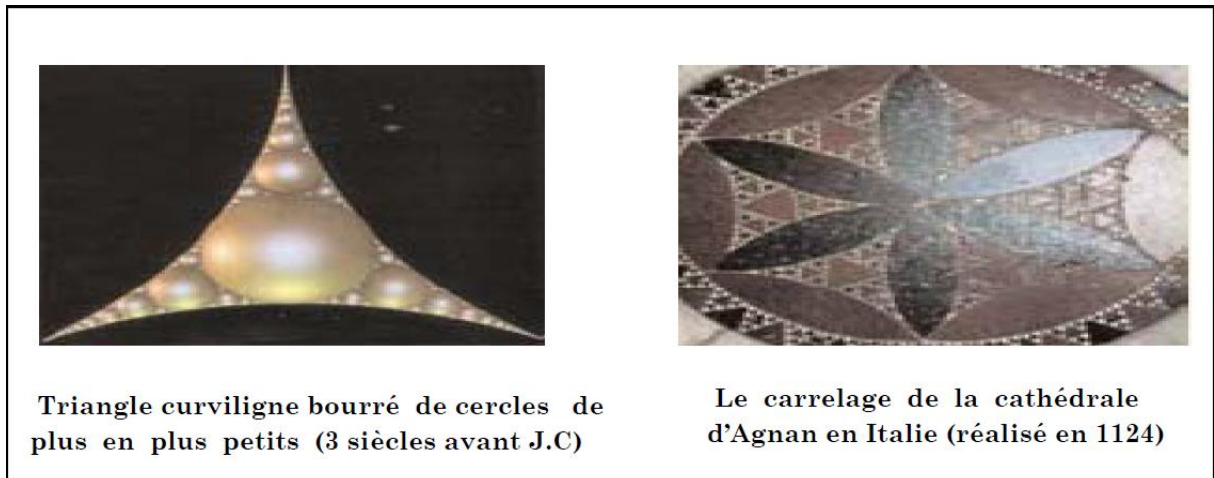


Figure I.1 : exemples anciens sur la géométrie fractale (LEHAMEL.M ,2011).

I.3 Objet fractal :

I.3.1 Définition :

Plus généralement, un fractal désigne un type d'objets dont l'irrégularité à toutes ses échelles d'observation, ne peut pas être caractérisée par une dimension entière, contrairement aux figures géométriques euclidiennes qui possèdent quant à elles des dimensions entières tels que : 0 pour un point, 1 pour une courbe, 2 pour une surface et 3 pour un volume. Les fractalistes considèrent que la question de définition ne devra se poser que lorsque la théorie fractale devienne plus enracinée.

I.3.2 Caractéristique d'un objet fractale :

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

a)- ses parties ont la même forme ou structure que le tout, à ceci près qu'elles sont à une échelle différente et peuvent être légèrement déformées [propriété d'autosimilarité].

b)- sa forme est, soit extrêmement irrégulière, soit extrêmement interrompue ou fragmentée, quelle que soit l'échelle d'examen.

c)- il contient des 'éléments distinctifs' dont les échelles sont très variées et couvrent une très large gamme. Ainsi, une fractale serait un objet mathématique se caractérisant par son irrégularité et son autosimilarité.

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

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

I.3.2.1 Autosimilarité :

Le concept d'autosimilarité existe depuis longtemps. On dit qu'une figure qui préserve une certaine symétrie interne en dépit des variations d'échelles est autosimilarité. La majorité des fractales respectent cette propriété. Or, c'est le philosophe et mathématicien Leibniz qui a introduit cette notion vers 1700. Il définira la droite comme une courbe dont chaque partie est similaire au tout et décrira plus tard les propriétés d'autosimilarité du plan.

Suite à ces observations, les mathématiciens seront amenés à créer d'autres objets qui se répètent à l'infini.

I.3.2.2 Classification des objets fractals :

Les fractals sont défini de façon récursive ou itérative, selon la manière avec laquelle elles sont construites. Nous pouvons distinguer deux grandes catégories : les fractals déterministes et les fractals non déterministes (FALCONER. K, 1990 et HASTIN.H et SUGIHARA.G, 1994).

I.3.2.2.1 Fractales non déterministes :

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

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

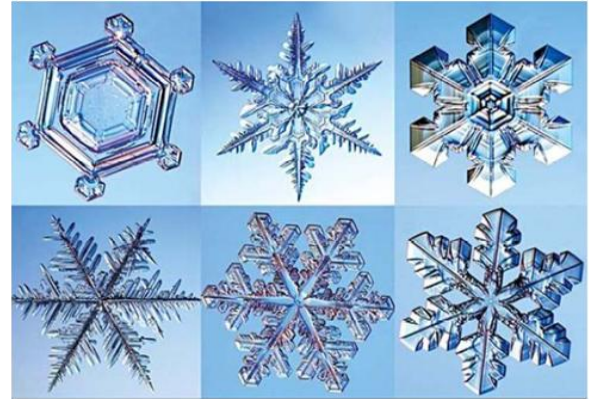
Il existe des fractales liées au hasard ou à des phénomènes aléatoires (le mode de réplique fait intervenir une composante aléatoire). Elles se présentent sous deux formes :

a. Objets fractals naturels :

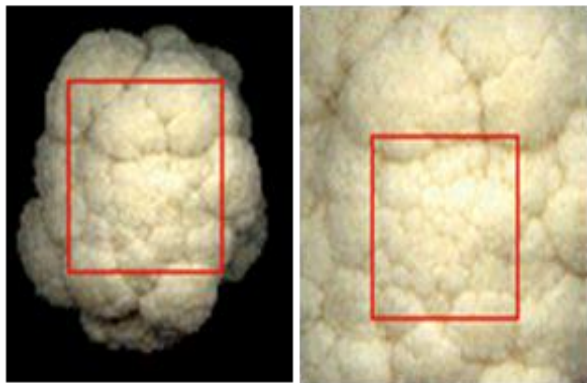
Objets aléatoires ou non déterministes, car le processus dynamique qui permet leur création varie lui même avec le temps de façon aléatoire. Citons les vaisseaux sanguins, les paysages fractals (les nuages, les montagnes, les flacons de neige, le chou-fleur, Les nervures des feuilles les grains de sol...), etc.



Les Montagnes



Les flacons de neige



Le chou-fleur



Ramifications



Fougère

Figure I.2 : les photos montrent quelques objets fractals dans la nature (OUTAYEB.S, 2016).

b. Ensembles fractals aléatoires :

Des fractales irrégulières peuvent être construites par simulation en introduisant des composantes aléatoires dans une procédure de construction élaborée au départ pour générer une fractale (FALCONER. K, 1990). La figure (I.3) montre le mouvement aléatoire d'une minuscule particule en suspension appelée mouvement Brownien.



Figure I.3: Exemple de fractals aléatoires (BOUZEBOUDJA.A ,2016).

I.3.2.2.2 Fractales déterministes :

Les fractales les plus intéressantes à étudier sont certainement les fractales déterministes. Elles se construisent sur la base d'un algorithme mathématique :

- à chaque point de l'image on associe une coordonnée faites de deux nombres réels. En fait, il s'agit d'un nombre imaginaire.
- puis on élève ce nombre au carré et on lui ajoute une constante (aussi un nombre imaginaire). C'est cette constante qui "fait" la fractale.
- Ensuite, on répète un nombre infini de fois le point précédent en reprenant toujours pour nombre la norme du nombre trouvé par l'itération précédente. En fait, dans la réalité on ne le répète qu'un nombre limité de fois.
- A la fin, on regarde si le nombre que l'on obtient est resté petit ou s'il a grandi vers l'infini (si on ne répète la boucle qu'un nombre limité de fois, dans ce cas on fixe une limite maximale à la place de l'infini). Dans le premier cas ce point fait partie de la fractale (on leur associe la couleur noire le plus généralement) dans le second cas, on associe au point une couleur selon la vitesse à laquelle a grandi le nombre qui lui était associé au fil des opérations.
- La figure finale donne la fractale.

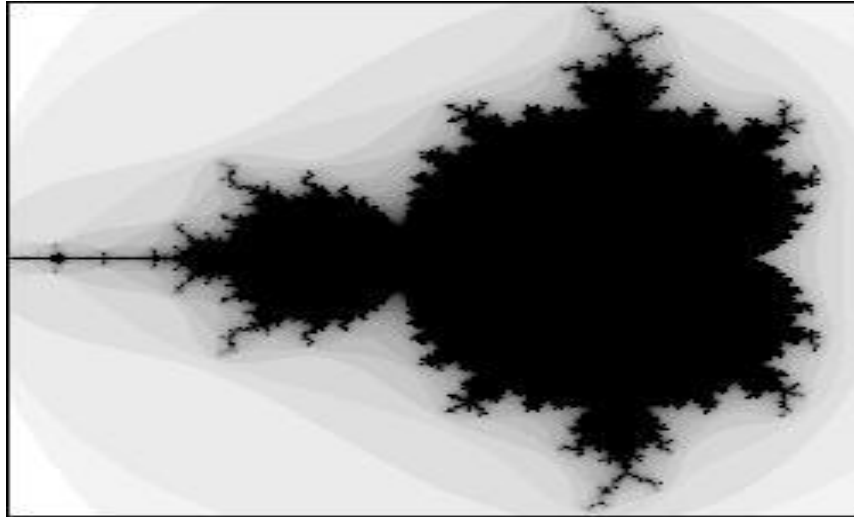


Figure I.4 : fractale dite ensemble de MANDELBROT (JOSIANE. L, 2006).

I.4 Méthodes fractales :

La géométrie fractale n'est pas qu'une théorie abstraite. En effet, les fractales se sont révélées adaptées à la représentation des objets naturels complexes : montagnes, sols, nuages, amas galactiques, réseaux hydrographiques, poumons, etc. L'évolution de certains phénomènes dynamiques peut être caractérisée par une figure fractale. Par ailleurs, la beauté des fractales en a fait un élément clé de l'infographie. Les scientifiques ont utilisé cette propriété pour modéliser certains aspects de la nature et de la matière. La géométrie fractale prend donc le relais et permet d'étudier avec succès ces objets appelés objets fractals ou encore fractals. Au près de ces utilités, nous pouvons alors, diviser les méthodes fractales en imagerie en deux classes :

Les méthodes basées sur le Système de Fonctions Itérées (IFS). Les IFS interviennent dans la génération d'objets fractals à forte caractéristique auto similaire. Ils ont servi à développer des méthodes de compression des images.

Les méthodes basées sur le calcul de la dimension fractale. La dimension fractale (notée D) d'une image peut être calculée en utilisant plusieurs méthodes inventées et les niveaux de gris qui lui correspondent. C'est une bonne mesure de la structure géométrique d'une image, et elle a été utilisée comme modèle approprié pour la caractérisation de sa texture.

I.5 Notion de dimension fractale :

Benoit Mandelbrot a commencé son traité sur la géométrie fractale dans son livre « *les objets fractals* » et « *how long Is the coast of Britain ?* » (MANDELBROT, B, 1967), où il a proposé plusieurs définitions de la dimension fractale. La notion de longueur « exacte » des cotés n'existe pas car ces dernières sont trop irrégulières (MANDELBROT, B.B, 1975). Ce qui a poussé Benoit Mandelbrot à introduire une nouvelle dimension qu'il a nommée « dimension fractale » qui permettra de mesurer cette irrégularité. Afin de comprendre le raisonnement. Il a considéré la question suivante : quelle est la longueur d'une ligne fractale? Résolvons plutôt un problème très concret : quelle est la longueur des cotes de Grande-Bretagne? Dans la figure suivante (Figure I.5), nous mesurons une partie de la cote à deux reprises, la règle sur la droite est la moitié de celle utilisée sur la gauche.

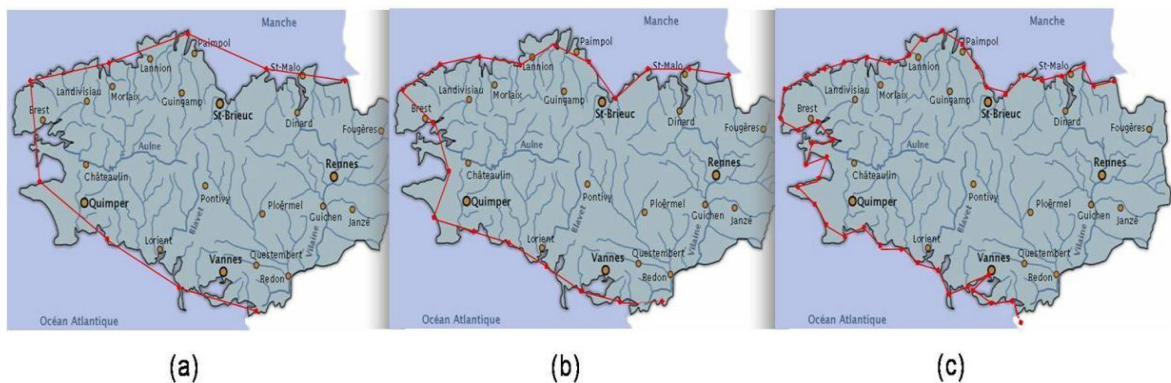


Figure I.5 : Approximation de la longueur de la cote de Grande-Bretagne à l'aide d'une ligne polygone (JOSIANE. L, 2006).

I.5.1 Dimension fractale :

La dimension fractale est un nombre qui mesure le degré d'irrégularité ou de la fragmentation d'un objet, ou la mesure de la rugosité d'une surface, et cette notion de dimension fractale s'applique 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.

I.5.1.1 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 m^2 et un objet de dimension trois en m^3 et ce n'est pas forcément le cas pour une courbe fractale.

Approche didactique :

Si nous prenons un objet qui réside dans la dimension euclidienne D et nous réduisons sa taille linéaire de $1/r$ dans chaque direction spatiale, sa mesure (longueur, surface, ou en volume) augmenterait à $N = r^D$ fois l'original. Ceci est illustré dans la figure. I.6.

Nous considérons $N = r^D \Rightarrow \log(N) = D \log(r)$.

Si l'on résout pour D , on trouve que :

$$D = \log(N) / \log(r)$$

D doit être un entier, car c'est le cas de la géométrie euclidienne. Ce traitement généralisé de dimension est nommé d'après le mathématicien allemand Félix Hausdorff. Il s'est avéré utile pour décrire les objets naturels et d'évaluation des trajectoires des systèmes dynamiques.

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

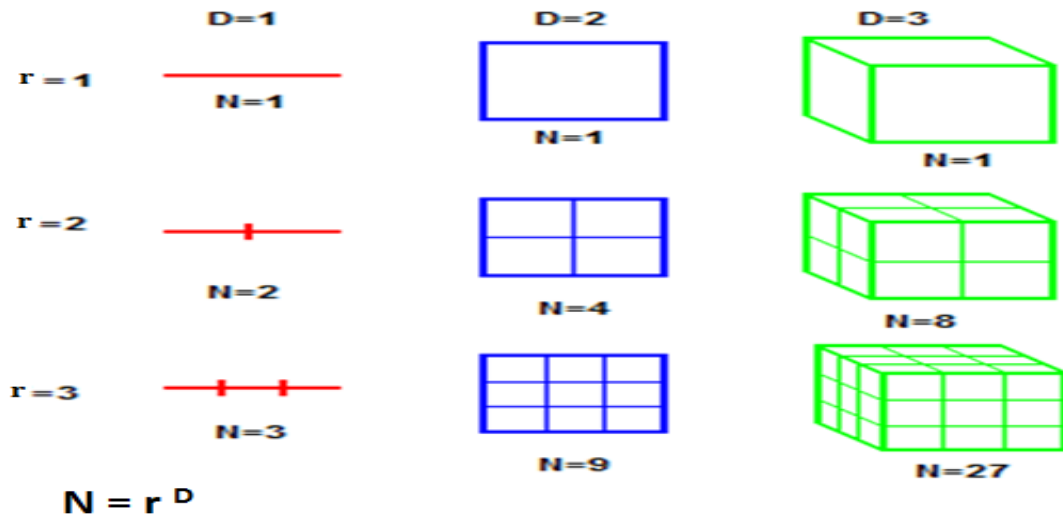


Figure I.6: Les trois dimensions entières (FALCONER. K, 1990).

I.6.1.2 La dimension de Hausdorff ou dimension fractale :

Contrairement aux objets géométriques classiques, les objets fractals sont caractérisés par leur dimension euclidienne et leur dimension de Hausdorff.

Contrairement à la dimension euclidienne, la dimension de Hausdorff d'un objet fractal n'est pas forcément entière. Ainsi, cela peut se traduire par le fait que certaines courbes fractales, de dimension euclidienne 1 tendent, au bout d'un nombre infini d'itérations, à remplir une surface de dimension 2 (courbe de Peano, . . .). D'autres encore délimitent une surface finie tout en possédant un périmètre infini (flocon de Von Koch, . . .). Dans le cas d'un objet non fractal, sa dimension de Hausdorff est égale à sa dimension euclidienne.

La dimension de Hausdorff d'un fractal est définie comme le quotient logarithmique entre le nombre d'homothéties internes d'un objet sur l'inverse de sa raison :

$$D = ((\ln n) / (\ln 1/r)) \quad \text{I.1}$$

Exemple :

La courbe de Koch est formée de 4 homothéties internes de raison $1/3$ (i.e. 4 répliques d'elle-même réduite d'un facteur 3). Sa dimension fractale est :

$$D = ((\ln 4) / (\ln 3)) = 1,2618595$$

La dimension de Hausdorff des fractales mathématiques est souvent très simple à déterminer. Pour les fractales probabilistes en revanche, des méthodes de calcul de la dimension fractale ont dû être mises au point.

I.6 Application à la dimension fractale :

I.6.1 Le flocon de Koch :

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

La courbe de Von Koch (Figure. I.7.b) constitue un exemple de fractal appartenant à la catégorie des systèmes de fonctions itérées.

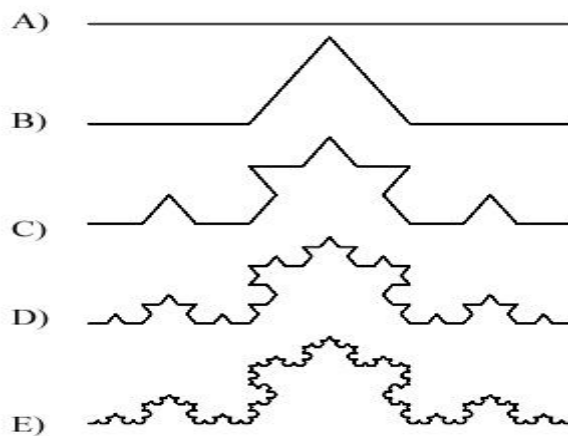


Figure I.7.a: Étapes de construction de la courbe de Von Koch.

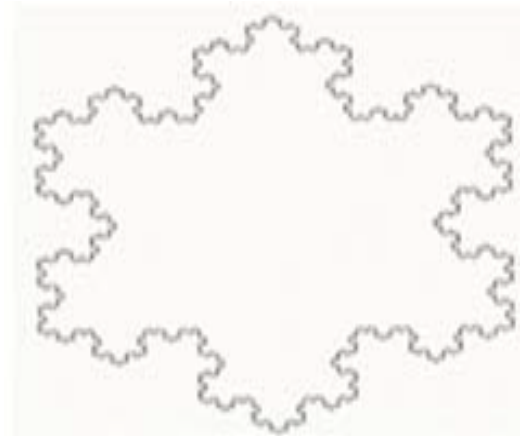


Figure I.7.b : Flocon de Von Koch (LEHAMEL.M, 2011).

Les étapes de sa construction sont illustrées sur la Figure I.7.a. On démarre au début par un triangle équilatéral de côté « A » chaque côté peut être découpé en trois parties de longueur chacune $(l/3)$. Ensuite la partie centrale de chaque côté du triangle est remplacée par deux segments ayant la même longueur $(l/3)$. En répétant suffisamment longtemps, cette procédure pour chaque segment de nouveau objet ainsi obtenue on arrive à la forme de la **Figure I.7.b**. Notons qu'à la première itération, la longueur l de chaque cote du triangle est remplacée par deux segments ayant la même longueur $(l/3)$. Notons qu'à la première itération elle devient $(16/4)l = (4/3).(4/3)l$. A chaque itération la longueur est multipliée par $(4/3)$. Au bout de la $k^{\text{ème}}$ itération, la courbe de Von koch a une longueur de $3. (4/3)^k$. cela signifie que, la longueur de courbe de Von koch tend vers

l'infini pour un nombre dit »ration infini. En pratique, la courbe affichée sur un écran ne varie plus quand le segment élémentaire tombe en dessous de la distance entre deux pixels, on peut ainsi arrêter le processus. Mais dans l'idéal mathématique, on continue indéfiniment. On arrive ainsi à qui a longtemps été considéré comme une monstruosité mathématique, une courbe de longueur infinie inscrite dans un domaine borné. On dit encore que les fractales introduisent un nouveau paradoxe : « le fini peut contenir l'infini ».

I.6.2 Triangle de Sierpinsky (BERTRAND.R et CONVERSE.T.M, 2006) :

Le triangle de Sierpinsky (appelé aussi «tamis de Sierpinsky») est une fractale réalisée grâce à un système d'itération. Son initiateur est un triangle plein.

Voici son principe de construction :

- Le triangle de Sierpinsky se construit à partir d'un triangle équilatéral ayant une base parallèle à l'axe des abscisses.
- On trace trois segments entre les trois milieux des cotes du triangle, ce qui délimite 4 nouveaux triangles, et on enlève le petit triangle central. On obtient trois petits triangles qui se touchent deux à deux par un sommet dont les longueurs des cotes sont la moitié de celles du triangle de départ, et dont la surface est divisée par 4.
- On répète l'étape précédente avec chacun des petites triangles obtenues.

La véritable fractale correspond à ce que l'on obtiendrait après un nombre infini d'itération.



Figure I-8: triangle de Sierpinsky (LEHAMEL.M, 2011).

I.6.3 Tapis de Sierpinsky :

Le tapis de Sierpinsky est aussi une fractale d'itération. C'est une fractale dont l'itérateur est un carré de 3 unités de chaque côté et à chaque itération on supprime le carré

central. On sépare chaque nouveau carré en trois parties égales afin de supprimer à nouveau le centre.

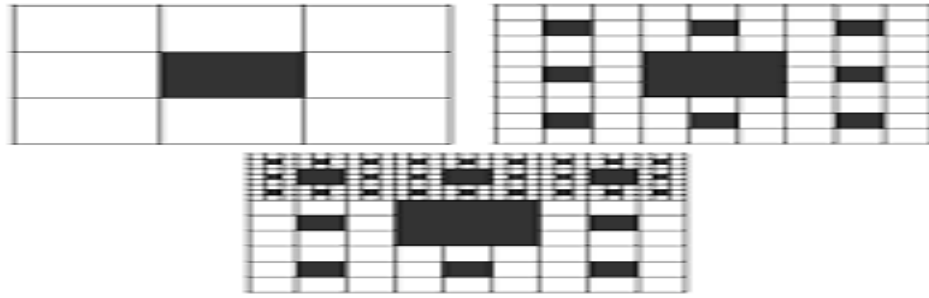


Figure I.9 : tapis de Sierpinsky (BOUDET. A, 2008).

I.6.4 Ensembles de Julia :

Autour des années 1920, Gaston Julia, un mathématicien français s'est concentré sur l'étude des polynômes complexes. Il a découvert les **ensembles de Julia**, sous-ensembles du plan complexe $\mathbb{C}$.

Étant donnés deux nombres complexes, c et z_0 , définissons la suite (Z_n) par la relation récurrente : $Z_{n+1} = Z_n^2 + c$

Pour une valeur donnée de c , l'ensemble de Julia correspondant est formé de toutes les valeurs initiales z_0 pour lesquelles, la suite est bornée.

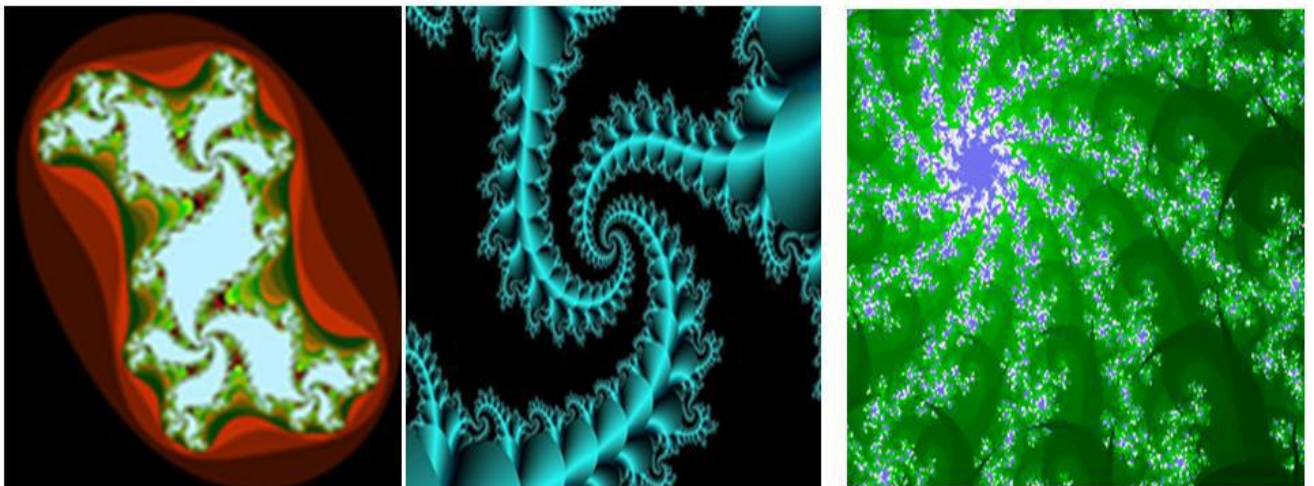


Figure I.10 : Ensemble de Julia, création en spirale (BOUDET. A, 2008).

I.6.5 Ensemble de Mandelbrot :

La fractale de Mandelbrot est la visualisation d'un objet mathématique. Il s'agit en réalité d'une matrice de nombres, où la valeur de chaque nombre est représentée par une

couleur. Chaque point de l'image est un nombre calculé par l'ordinateur selon une équation très simple :

$$Z_{n+1} = Z_n^2 + C \quad (\text{I.2})$$

Le plus étonnant est que, comme la nature, cette équation produit des formes complexes d'une grande beauté, en voici deux représentations (Figure I.11,a), une en plan large et un zoom sur un détail et la texture lumineuse de modèle de sorbet de la version quadratique du Mandelbulb, créée par Paul Nylandere et enfin des autres modèles de Mandelbrot (Figure.I.11,b).

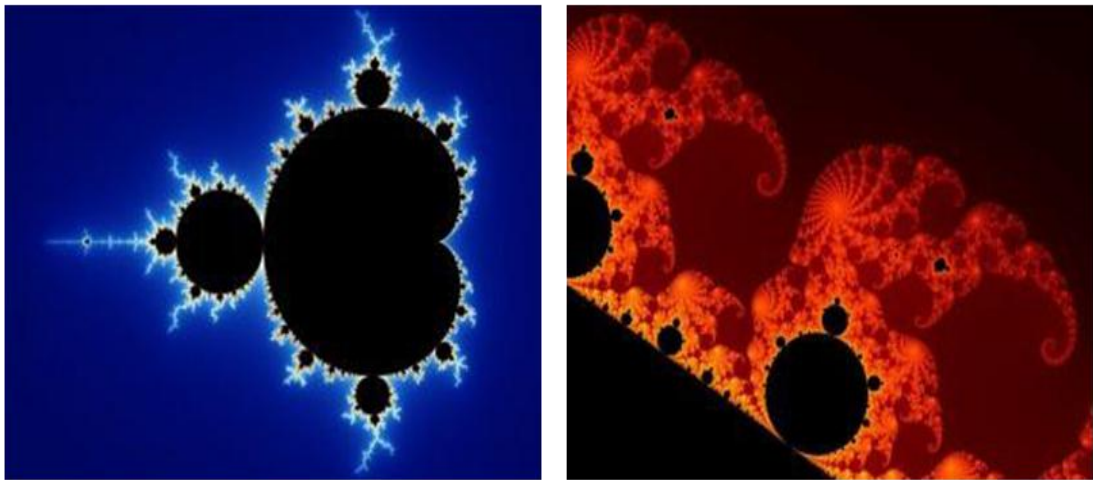


Figure I.11, a : Deux représentations, une en plan large et un zoom sur un détail (BELCASTRO. P, 2009).

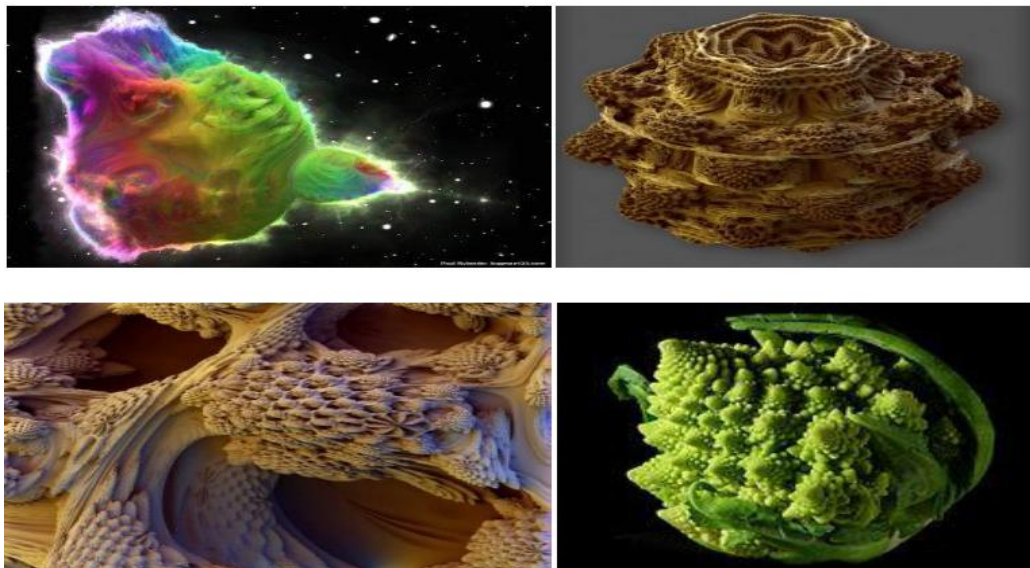


Figure I.11, b : la texture lumineuse de modèle de sorbet de la version quadratique du Mandelbrot, (BELCASTRO.P, 2009).

I.6.6 Eponge de Menger :

Citant également l'éponge de Menger (Figure. I.12) qui sert de référence à plusieurs modèles de structures de sols. Elle est construite de la façon suivante : un cube de longueur 1 est divisé en 27 petits cubes de même taille qui seront enlevés du centre de chaque face ainsi que du centre du cube de référence; une décomposition identique est appliquée aux 20 cubes restant, enlevant 20x7 petits cube de taille $1/9$ et laissant 20x20 cubes de taille $1/9$ sur lesquels le procédé est réitéré ; et ainsi de suite à l'infini pour obtenir une éponge infiniment « trouée ». L'ensemble de ces trous représente chez de nombreux auteurs l'espace poral d'un sol fractal. On remarque que le tapis de Sierpinsky n'est qu'une face de l'éponge de Menger, d'ailleurs considéré comme un modèle simple le plus utilisé en science du sol.

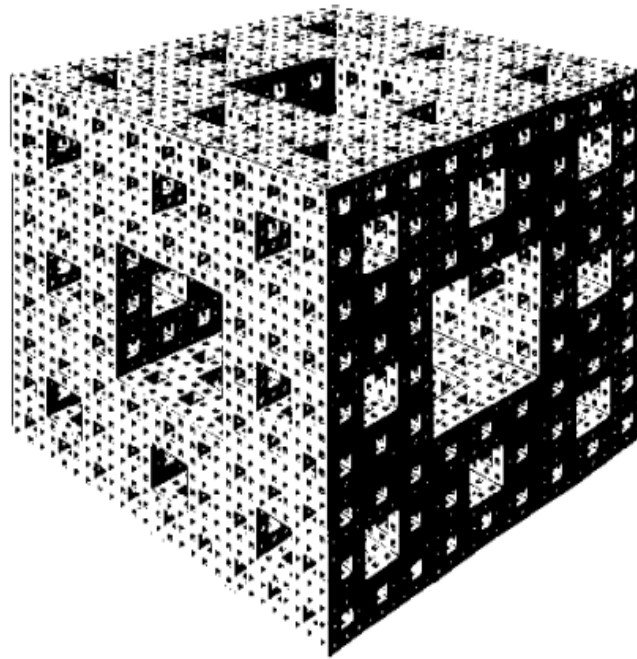


Figure I.12: Eponge de Menger (YEZLI.S, 2011).

I.7 Conclusion :

Nous avons décrit dans ce chapitre les différentes définitions sur les fractales et la dimension fractale. Il ressort de cette étude que la notion fractale est riche et au même temps intéressante qui peut être utile dans beaucoup de domaines.

Les fractales sont des images de synthèse obtenues par un procédé de construction graphique très simple répété sur une large gamme d'échelle. Une harmonie étrange et fascinante émerge de ce mariage de l'ordre et du désordre des formes fractales.

Une dimension fractale est une fraction ($1 < D < 3$) contrairement à la dimension euclidienne, qui est une valeur entière (1, 2 et 3 : qui désignent respectivement une ligne, un plan et un volume).

La dimension fractale est donc un nombre réel positif caractérisant la manière dont la masse ou la forme de l'objet est répartie dans l'espace, et plus l'objet est irrégulier, plus sa dimension fractale est élevée.

Chapitre II

***CALCUL DE LA DIMENSION FRACTALE ET
SON APPLICATION***

II.1 Introduction :

Le calcul de la dimension fractale est l'une des caractéristiques principales de la géométrie des fractales, elle a été utilisée entre autres dans le domaine de génie civil. Elle décrit bien l'irrégularité d'un grain du matériau granulaire ou de sol.

Pour calculer la dimension fractale, des techniques d'analyse d'image sont importantes après avoir photographié les grains (SEZER. A et al, 2008).

La technique d'analyse est très facile, elle consiste à réaliser un seuillage de l'image grise jusqu'à un niveau raisonnable afin d'extraire la surface du grain à partir du fond de l'image. Après en appliquant un certain nombre d'opérations comprenant l'ouverture, fermeture, et remplissage en blanc, l'image binaire est obtenue comme une couche au-dessus de l'image grise (Figure II.1). Cette image binaire est utilisée pour calculer la dimension fractale du grain.

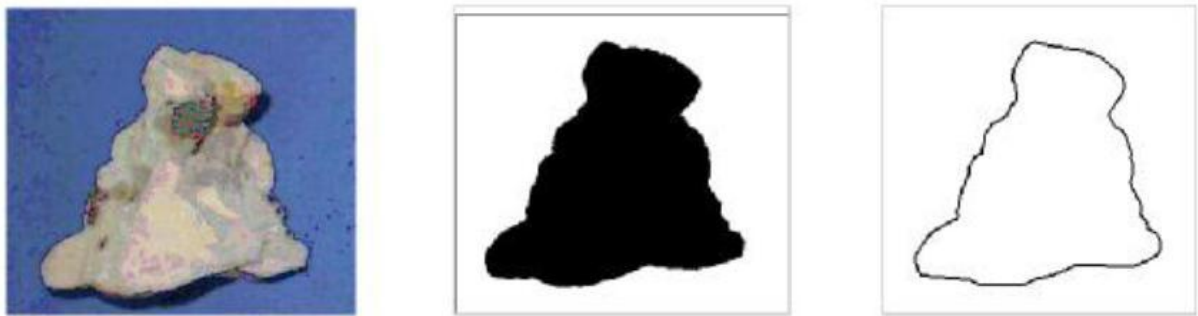


Figure II.1 : Exemple d'une image binaire obtenue après l'analyse d'image d'un grain de sable (ACHIR. M, 2011).

II.2 Surface-Périmètre (Area-Périmètre)

La méthode Surface-Périmètre est l'une des méthodes bidimensionnelles ; de calcul de la dimension fractale de rugosité, les plus faciles à appliquer à la géométrie fractale des grains du sol.

Après l'obtention de leurs images, des techniques de traitement d'images sont utilisées pour l'obtention du périmètre et de la surface des grains à l'aide de plusieurs logiciels, comme l'Auto-CAD 2009 (Figure II.2).

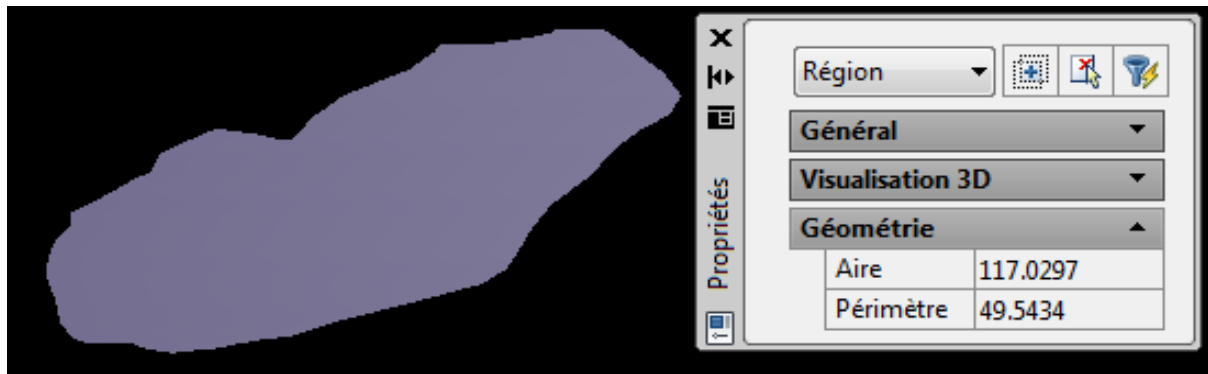


Figure II.2 : Calcul du périmètre et de la surface d'un grain ($\Phi = 6.3 \text{ mm}$) à l'aide de logiciel Auto-CAD 2009(BOUZEBODJA.A, 2016).

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

$$c = \frac{P^{1/DF_R}}{A^{0,5}} \quad (\text{II. 1})$$

Dans cette équation:

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

P: le périmètre du grain.

A: la surface du grain.

DF_R : la dimension fractale de la rugosité moyenne des grains. Prenant le logarithme des deux côtés dans l'équation(1) on obtient expression suivante :

$$\frac{1}{DF_R} \log P = \log (c\sqrt{A}) \quad (\text{II. 2})$$

• Faire certains transformation nécessaires :

$$\log P = \frac{DF_R}{2} (\log c^2 + \log A) \quad (\text{II. 3})$$

• Finalement, on obtient l'équation suivante :

$$\log P = K + \frac{DF_R}{2} (\log A) \quad (\text{II. 4})$$

• D'où l'approche surface/périmètre utilise la relation:

$$P = C.A^m \quad (\text{II. 5})$$

De l'équation (5) les valeurs des surfaces et périmètres pour un groupe de grains sont portées sur un papier d'échelle logarithmique et (m) représente l'exposant de l'équation de la droite de régression la mieux adaptée aux nuages de points (Figure II.3), la dimension fractale (DF_R) est ensuite calculée par le rapport :

$$DF_R = 2/m \quad (II.6)$$

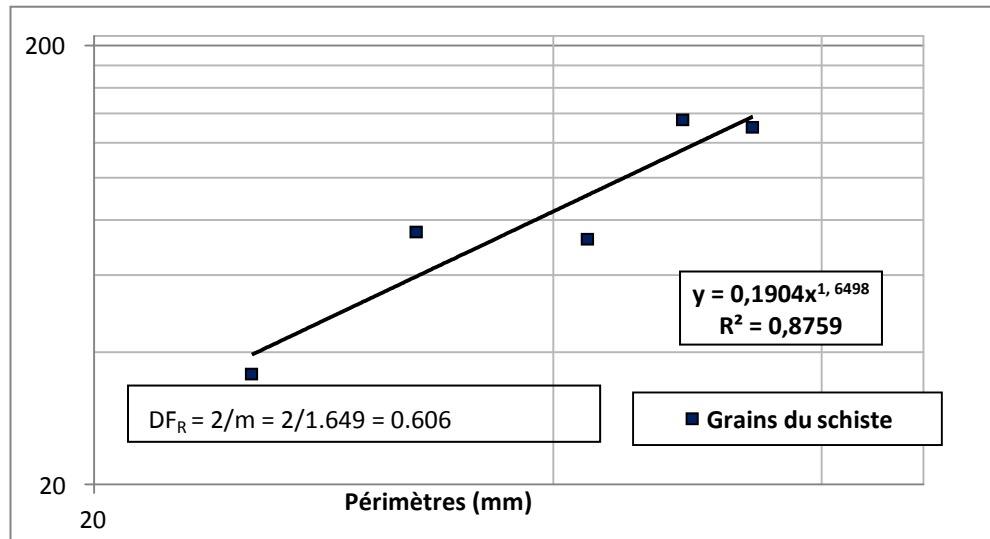


Figure II.3 : Application de la méthode Surface-Périmètre sur les grains du schiste (8 mm de diamètre) (BOUZEBODJA.A, 2016).

II.3 Line Divider (méthode du diviseur)

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

$$P(l) = nl^{1-D_R} \quad (II.7)$$

Dans cette équation, $P(l)$ est le périmètre polygone, D_R est la dimension fractale du grain. On trace à l'aide du logiciel Excel le périmètre polygone obtenu en fonction de l'unité de mesure (l), la dimension fractale est alors liée à la pente m , de la meilleure ligne obtenue en utilisant les données de l'équation (7) et sera calculée comme suit :

$$D_R = 1 - m \quad (II.8)$$

À partir de cette méthode, trois types de dimension fractale peuvent d'être déduit. La courbe $P(l)$ possède habituellement deux lignes de l'ajustement normal : Tandis que les polygones de plus petites tailles de mesure représentent la dimension « de texture » de fractale (D_1), la ligne à la droite du point d'arrêt représente la

dimension « structurale » de fractale (D_2). La dimension totale de fractale (D_{tot}) représente la ligne de l'ajustement normal aux points de repères entiers, qui ne concernent pas le point d'arrêt des tendances structurales et de textures.

Voilà un exemple d'application de cette méthode, prenant un grain simple donné dans la (Fig. II-4 a), des polygones de mesures de différentes tailles sont tracés à l'intérieur du grain (Fig. II-4 b, c, d). Tout le périmètre du grain obtenu est tracé en fonction de l'unité de mesure, afin de calculer les dimensions fractales.

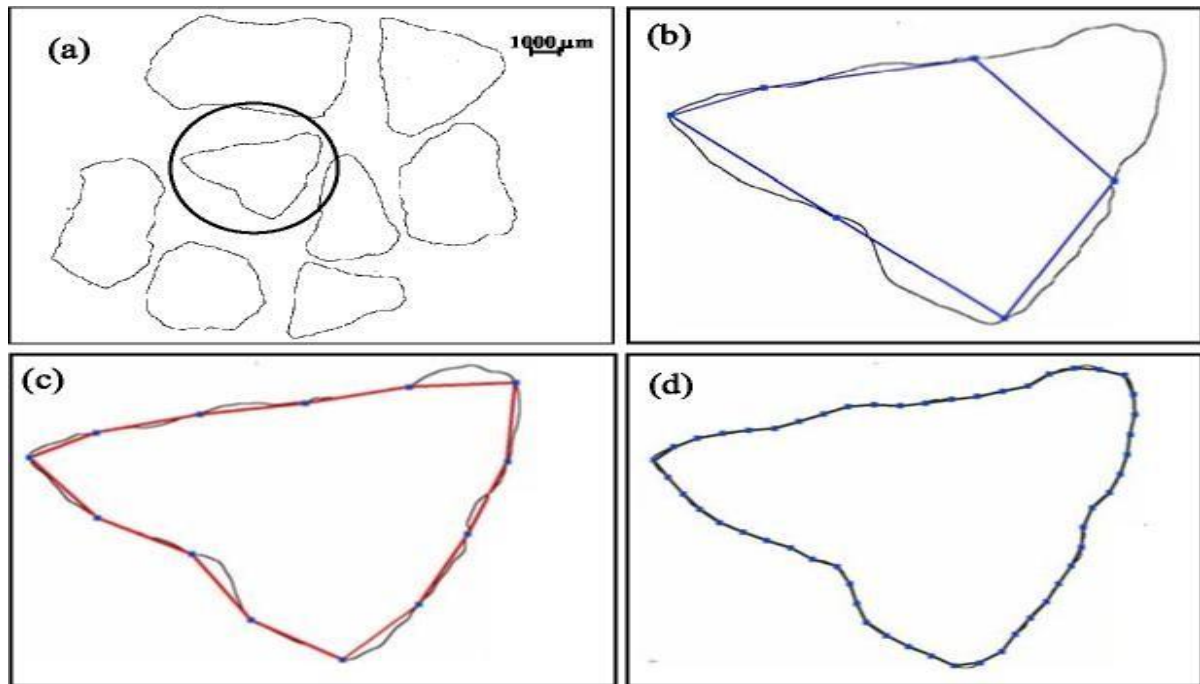


Figure II-4 (a) : le grain de sable après l'analyse de l'image. Le reste des figures contient les polygones tracés sur grains avec une taille de mesure (b) : 2 mm. (c) 1 mm et (d) 0.25mm (BOUZBOUDJA.A, 2016).

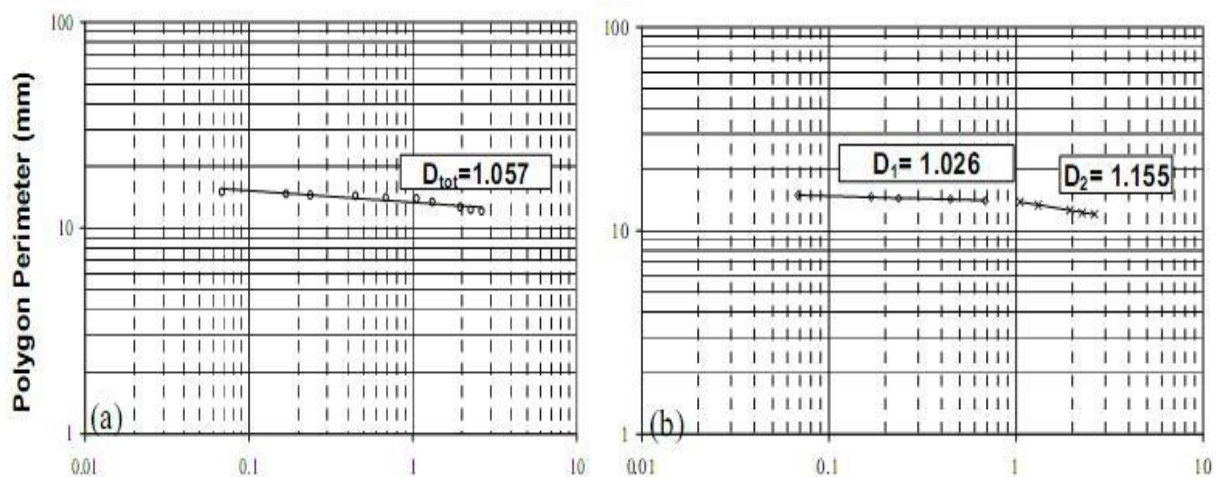


Figure II-5 : calcul de la dimension fractale (a) Totale (b) Texturale (D_1) et structurale (D_2). (BOUZBOUDJA.A, 2016).

II.4 Méthode des lignes parallèles :

La mesure de la dimension fractale par la méthode des lignes parallèles ressemble à la méthode précédente qui consiste à superposer l'image du grain sur un ensemble de lignes parallèles à espacement constant λ (Figure II.6), et joindre à l'aide d'un segment de droite les points d'intersections du contour du grain avec ces lignes (HAMMER. K.P, 2005). On fait la mesure du périmètre ainsi obtenu $P(\lambda)$. En diminuant de plus en plus le pas entre les lignes, on se rapproche au fur à mesure du contour réel du grain. En employant une unité de mesure en fonction de toute la longueur du périmètre des grains pour tracer des courbes à l'aide du logiciel Excel (Figure II.7), comme décrit par Vallejo et Hyslip (HYSLIP. J, VALLEJO.L, 1997).

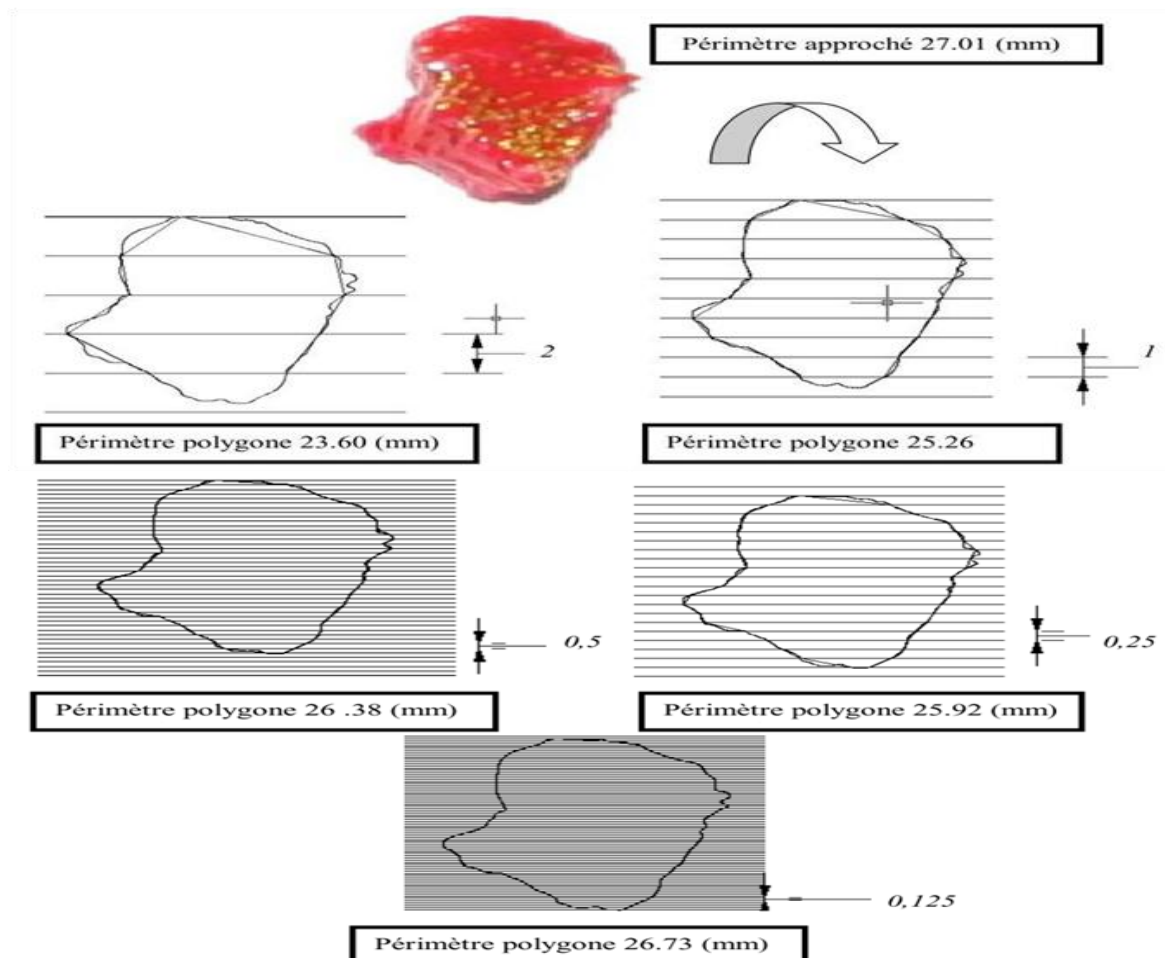


Figure II.6 : Présentation des exemples sur l'application de la méthode des lignes parallèles sur un grain de 5 mm (YEZLI. S, 2011).

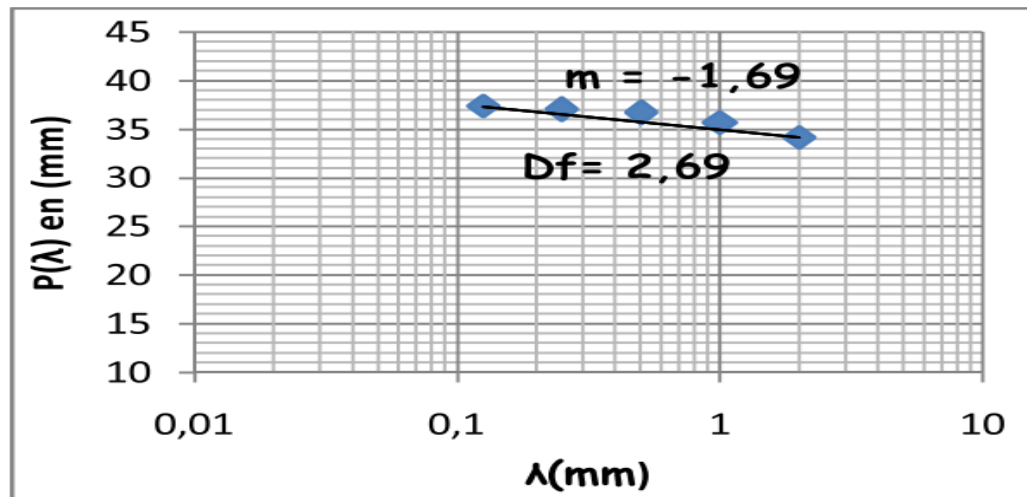


Figure II.7: Détermination de la dimension fractale par la méthode des lignes parallèles (YEZLI. S, 2011).

II.5 Méthode des masses

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

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

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

$$\frac{M(R < r)}{M_T} = \left(\frac{r}{r_L}\right)^{3-DF_{FR}} \quad (II.9)$$

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

M_t : masse totale des particules.

r : taille de l'ouverture des passoires.

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

DF_{FR} : dimension fractale de fragmentation.

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

$$DF_{FR} = 3 - m$$

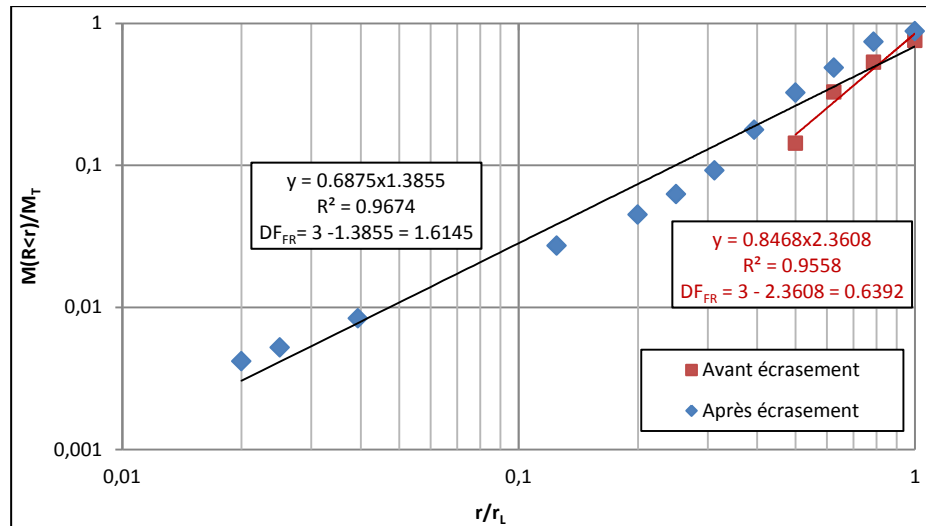


Figure II-8: détermination de la dimension fractale DF_{FR} par la méthode des masses (BOUZEBODJA.A, 2016).

II.6 Méthode de comptage des boîtes (Box Counting) :

Cette méthode est la plus fréquemment utilisée et la plus populaire en pratique, dans le cas de la "fragmentation". La dimension fractale calculée par cette méthode nous donne une idée sur la distribution dimensionnelle des grains dans le sol et sur le procédé de fragmentation. Cette méthode consiste à diviser l'image d'un grain en petits carrés et de dimensions identiques (faire un maillage), ainsi le contour du grain qui passe par ces boîtes est 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 :

$$N(X > x) = Kx^{-DF} \quad (II.10)$$

x : dimension des boîtes ;

K : constante ;

$N(X > x)$: nombre des boîtes ;

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 :

$$DF = -m \quad (II.11)$$

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

Remarque : Dans ce paragraphe on parle souvent de boîtes, mais en réalité ce sont des carrés, car le calcul de la dimension fractale se fera en 2 dimensions (boîtes correspondant à un volume, et carré correspondant à une surface). D'après l'étude faite par (HYSLIP. J et

VALLEJO. L, 1997) une équation semblable à l'équation (II.11) peut être obtenue. Dans ce cas la dimension fractale est égale à $(-2m)$.

II.6.1 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 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.

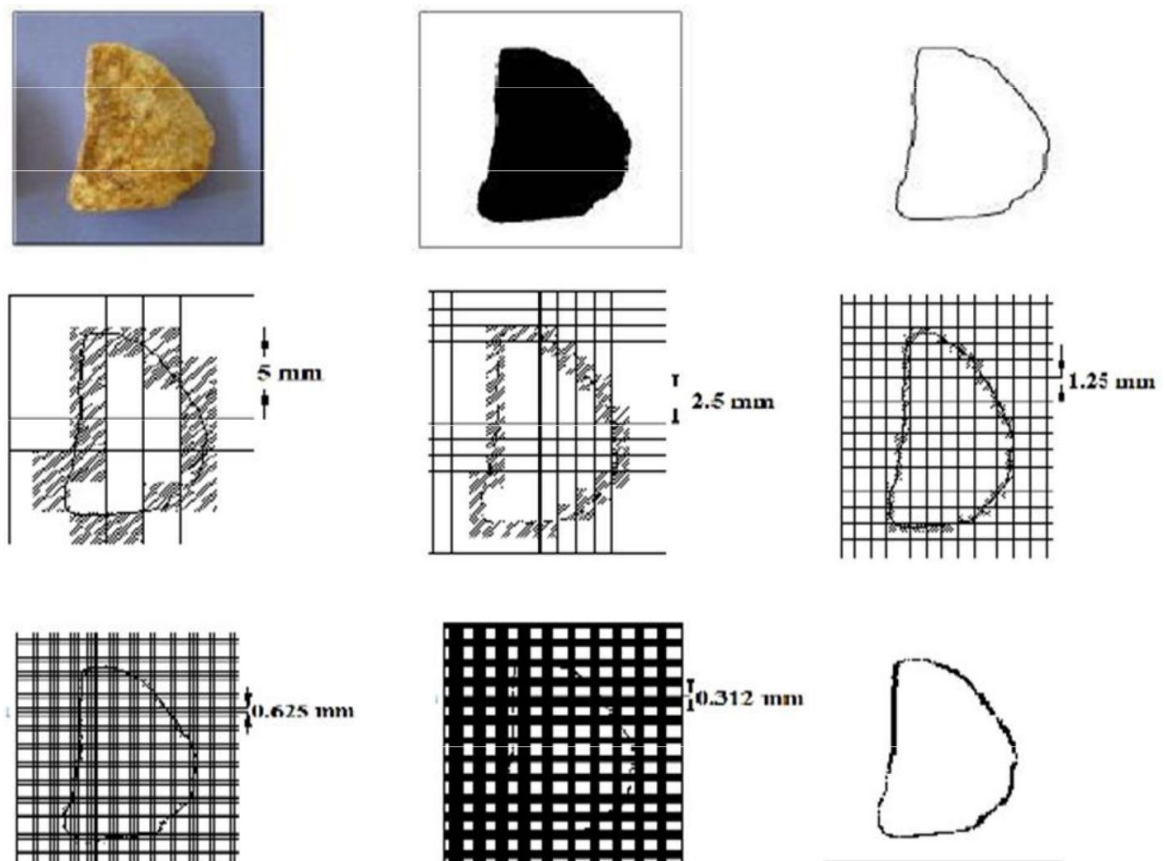


Figure II-9 : Différentes étapes de maillage de l'image du grain et illustration de la méthode de Box Counting (OUTAYEB.S, 2016.)

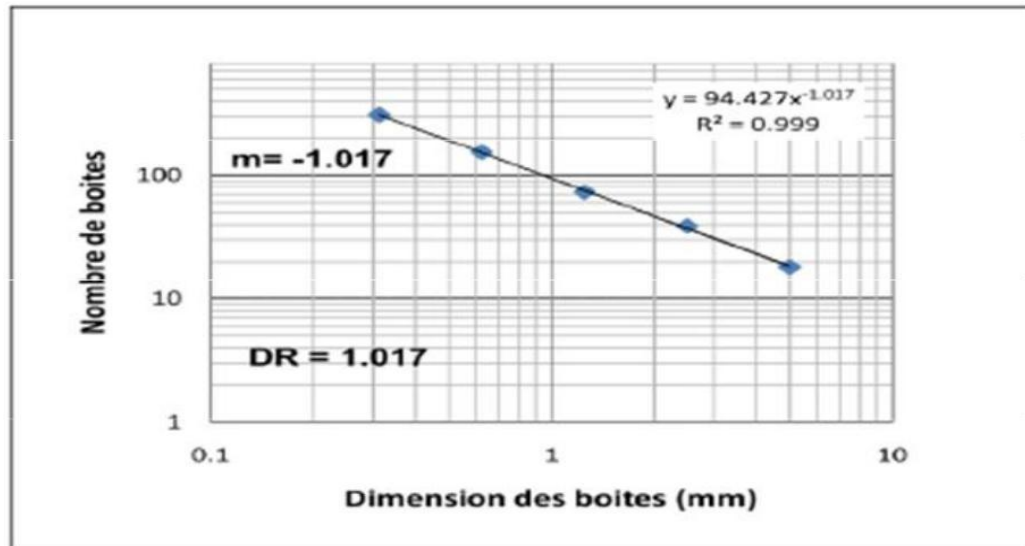


Figure II-10 : Calcul de la dimension fractale de la rugosité du grain (ACHIR, M.2001).

II.6.2 Calcul de la dimension fractale de la surface intérieure du grain :

Soit le même grain donné dans la figure II.9, on refait les mêmes opérations (maillage de l'image) que l'exemple N°1, mais cette fois-ci avec prise en compte du nombre de boîtes se trouvant à l'intérieur de la surface du grain ; voir la figure II.11 a.

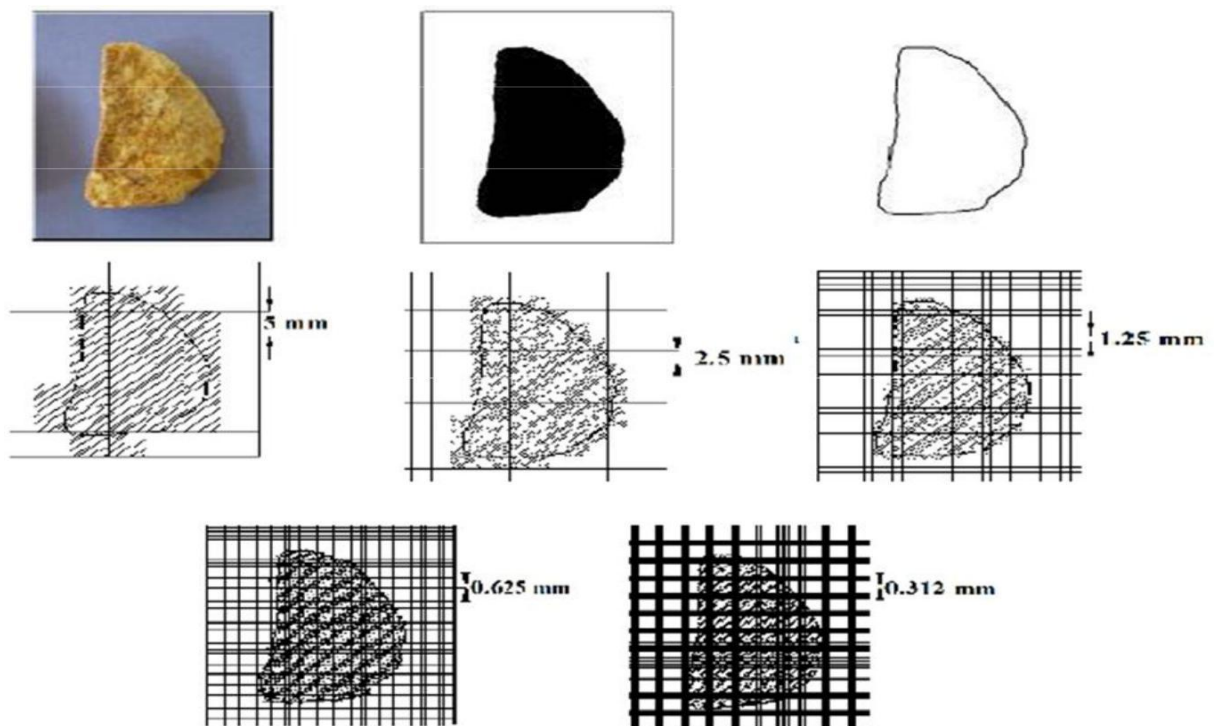


Figure II.11 a: Différentes étapes de maillage de l'image du grain avec prise en compte de la surface intérieure du grain. (OUTAYEB.S, 2016).

La figure II.11 b 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 ($DF_{FR} = -m = 0.9799$).

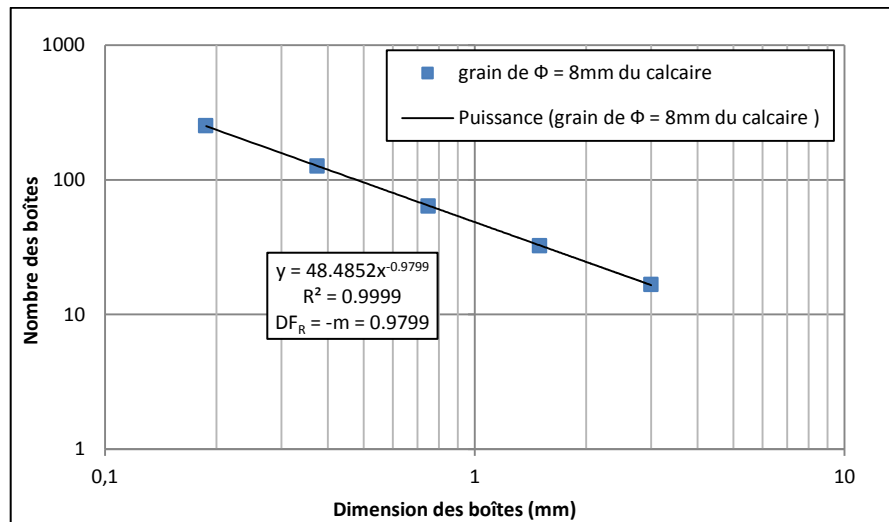


Figure II.11 b : Calcul de la dimension fractale de fragmentation de la surface intérieure du grain (ACHIR, M.2001).

II.7 Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de constater qu'il existe plusieurs méthodes pour la détermination de l'irrégularité des grains de sol et les approches basées sur le calcul de la dimension fractale sont faciles à développer.

La méthode utilisée dans notre travail est la méthode de comptage des boîtes (Box Counting), avec la quelle on peut mesurer la dimension de la texture et de la forme globale du grain ou de l'échantillon étudié.

Chapitre III

*INFLUENCE CLIMATIQUE SUR LE
SOL ETUDIE*

III.1 Introduction :

Le nombre de cas pathologiques liés au gonflement des sols argileux est en augmentation à cause du réchauffement climatique, que la terre ait connu ces dernières années.

La prévision et la caractérisation des argiles gonflantes peuvent se faire en rassemblant le maximum de données à partir des études géologiques, minéralogiques et géotechniques et en étudiant les facteurs environnementaux à l'exemple du climat.

III.2 Présentation de matériau étudié :

Le type de sol qu'on va étudier est de l'argile, prélevée de la Wilaya de Tizi-Ouzou, c'est un type connu pour ces phénomènes de retrait-gonflement ainsi que les brisures qu'on peut constater surtout pendant l'été.

III.2.1 Origine et définition des argiles :

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

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

III.2.2 Structure des argiles :

Les particules d'argile sont formées d'un empilement de feuillets, qui sont constitués par l'association de deux unités structurales de base (Figure III.1), ces feuillets sont formés par

la juxtaposition des couches structurales tétraédriques (silice) (Figure III.1.a) et octaédriques (alumine) (Figure III.1.b).

Les couches structurales sont à leur tour formées d'unités structurales de base par empilement d'ions ou d'hydroxyles en disposition hexagonale ou compacte.

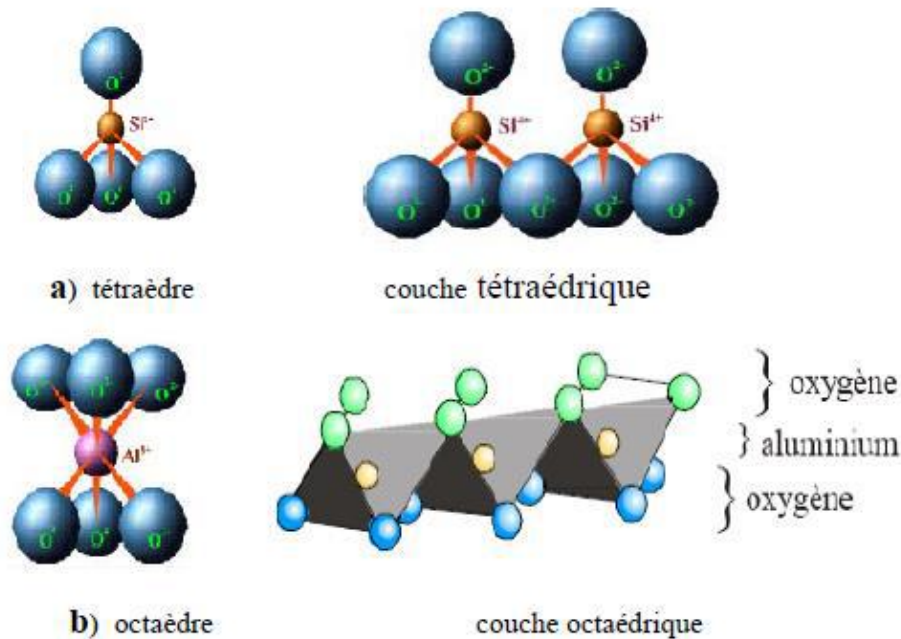


Figure III.1: Couches tétraédriques, octaédriques (MADJNOUN.A, 2014).

III.2.3 Les principaux types de minéraux argileux:

Les trois familles les plus connues des minéraux argileux sont la Kaolinite, la montmorillonite et l'illite (voir tableau III.1).

III.2.3.1 La kaolinite [$\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$]:

Ce nom vient du mot *Kauling*, qui désigne le haut sommet d'une colline située près de *Jaucha Fu* en chine où cette argile blanchâtre a été découverte il y a quelques siècles. La Kaolinite est formée de couches élémentaires comprenant chacune un feuillet tétraédrique (silice) et un feuillet octaédrique (aluminium).

Les couches sont maintenues ensemble par des liens d'hydrogène et les forces de *Van der Waals*. Ces liens d'hydrogène étant très forts, l'eau qui est toujours présente dans les dépôts d'argile s'infiltre difficilement entre les couches, qui peuvent alors s'empiler pour former des minéraux argileux très stables et relativement épais. C'est pourquoi la kaolinite a une surface spécifique inférieure à celle de la plus part des minéraux argileux.

Les argiles de la famille de la Kaolinite sont les constituants essentiels de la plupart des argiles utilisées en céramique.

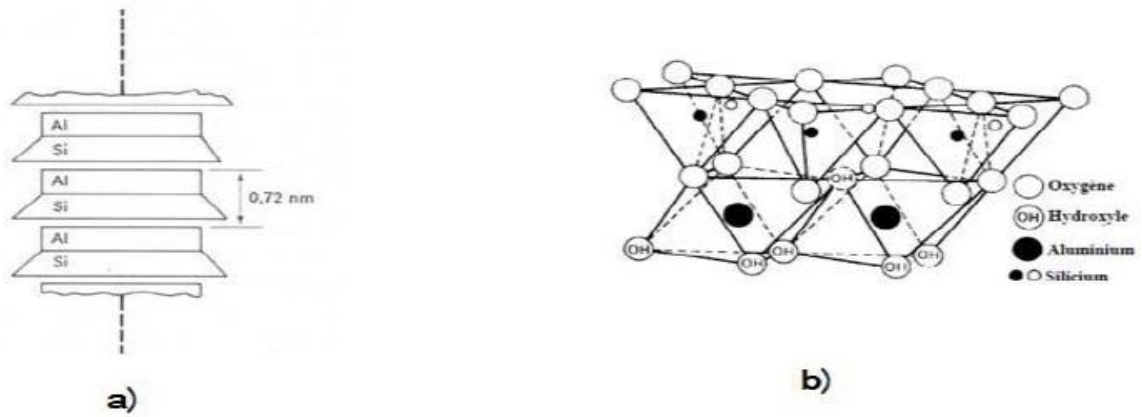


Figure III.2: a) Schéma de la structure de la kaolinite (LAMBE.A, 1953); b) Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite (MADJNOUN.A, 2014).

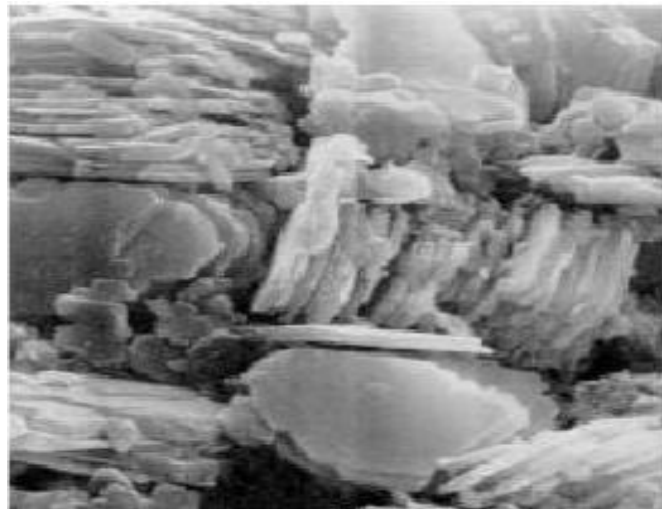


Figure III.3: photographie d'une kaolinite prise au microscope électronique à balayage (DJONKAMLA.Y, 2010)

III.2.3.2 La montmorillonite $[\text{Si}_4 \text{Al} (2-x) \text{Mg}_x \text{O}_{10}(\text{OH})_2, n\text{H}_2\text{O}]$

La montmorillonite a été découverte à Montmorillon en France. Elle est formée de couches élémentaires constituées de deux feuillets tétraédriques placés de part et d'autre d'un feuillet octaédrique contenant des atomes d'aluminium (gibbsite). Elle porte parfois le nom de Smectites.

Les sols de la famille de la montmorillonite peuvent absorber de l'eau dans des proportions considérables, ceci est dû au fait que les liaisons d'un feuillet à l'autre sont faibles à cause de la structure floconneuse, et les molécules d'eau peuvent s'infiltrer très facilement entre les couches et les séparer.

La bentonite est un minéral argileux dont les propriétés sont similaires à celles de la montmorillonite, la vermiculite aussi est un minéral argileux qui appartient au même groupe que la montmorillonite.

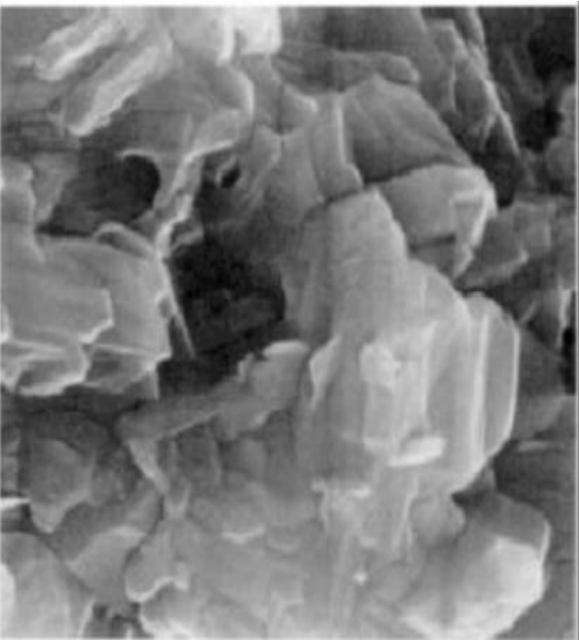


Figure III.4 : Photographie d’une montmorillonite prise au microscope Électronique à balayage (LAMBE.A, 1953).

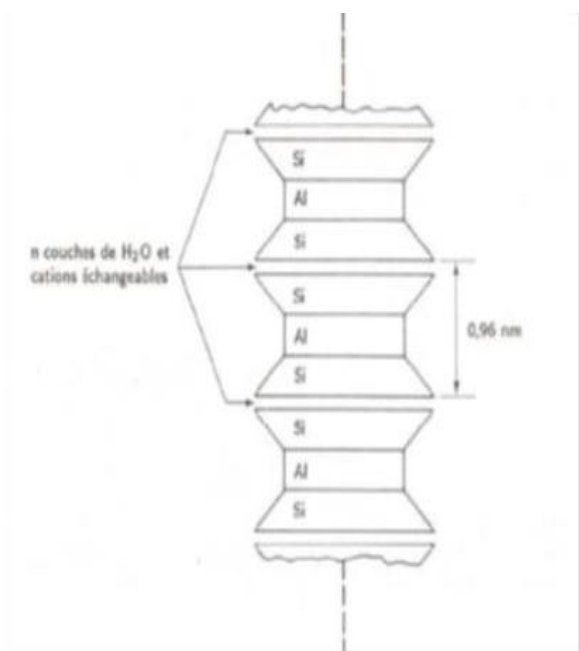


Figure III.5 : Schéma de la structure de la montmorillonite (LAMBE.A, 1953)

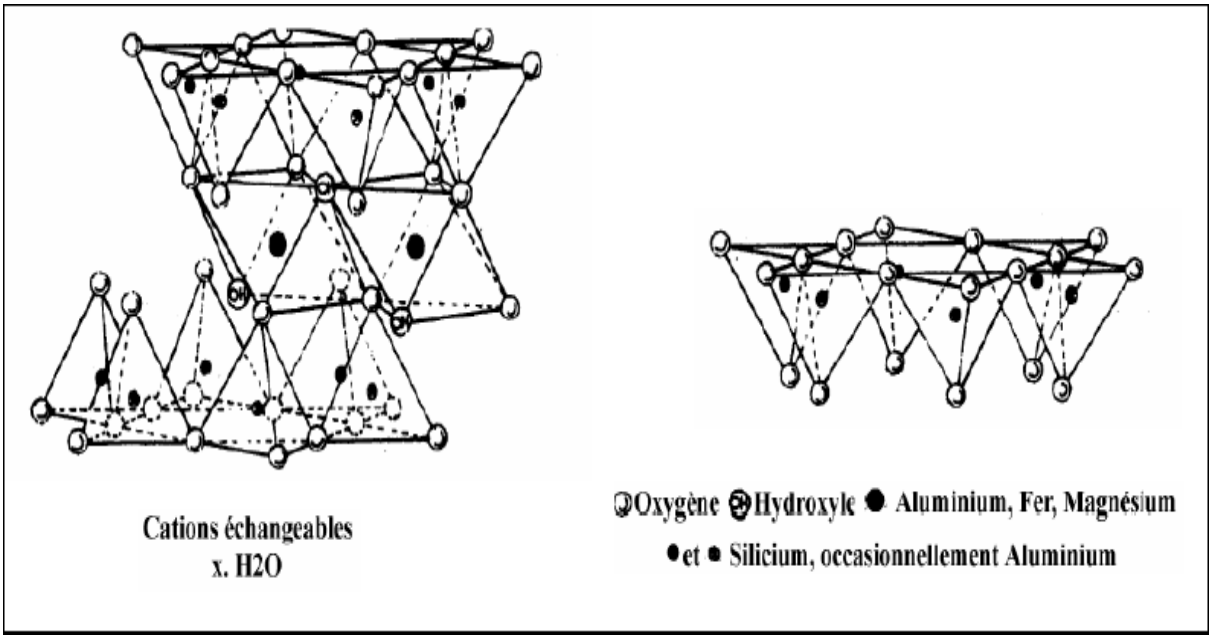


Figure III.6: Vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite (MAJNOUN.A, 2014).

III.2.3.3 Les illites $[Si(4-x)Al_xAl_2O_{10}(OH)_2 \cdot xK]$:

L’illite a été découverte pour la première fois à l’université de l’Illinois (USA) par le professeur Grim. R.E. Les argiles de la famille de l’illite sont parmi les minéraux les plus répandus à la surface de la terre. La structure de l’illite est analogue à celle des micas, mais la matière est beaucoup plus finement divisée. Elle est formée d’un feuillet octaédrique emprisonné entre deux feuillets tétraédriques, feuillet 2:1. Les liens qui unissent les couches élémentaires, Ils sont assurés par des atomes de potassium (K). Bien qu’étant plutôt forts comparativement à ceux de la montmorillonite, ils demeurent inférieurs aux liens d’hydrogène de la kaolinite.

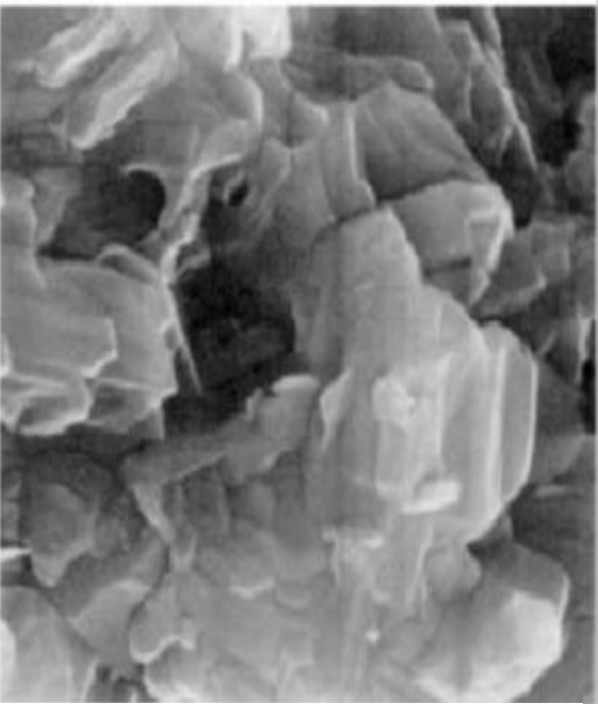


Figure III.7 : Schéma de la structure de l’illite (LAMBE.A, 1953)

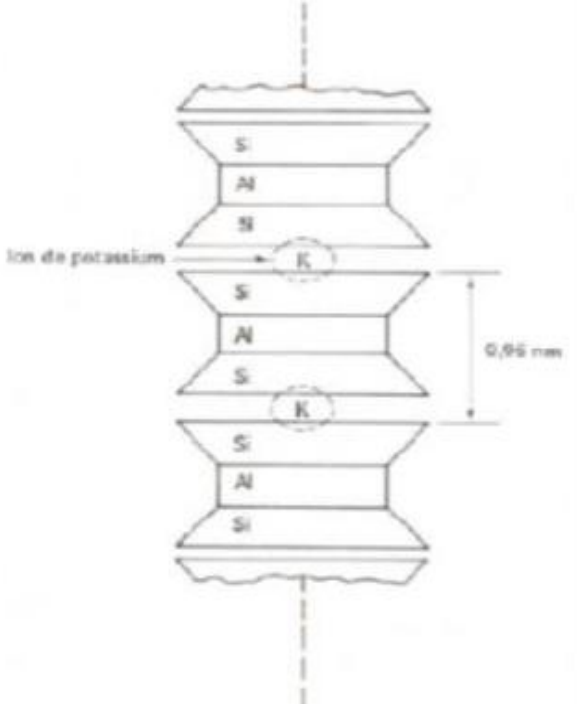


Figure III.8 : Photographie d’une illite prise au microscope électronique à balayage (LAMBE.A, 1953)

Tableau III.1: Minéraux argileux

Nom	Type	Nombre de feuillets par particule	Diamètre d'une particule (µm)	Epaisseur d'une particule (µm)	Surface spécifique en m²/g
Kaolinite	1:1	100 - 200	0,1 - 4	1 - 10	10 - 20
Illite	2:1	1 - 10	0,1 - 1	0,003 – 0,01	65 - 100
Montmorillonite (smectite)	2:1	1	0,1	0,001	700 - 840

III.2.4 Les minéraux argileux et le système « argile – eau » :

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

III.2.5 Caractéristique physique des argiles :

L'argile en particulier a fait l'objet de nombreux travaux de recherche sur sa nature minéralogique (KAMEL.L, 1981; RICO.P, 1984 ; TARDY.I et TOURET.M, 1987 ; TOURET.R, 1988).

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

Tableau III-2 : Caractéristiques physiques générales des argiles.

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

III.2.5.1 Paramètres d'état :

L'eau joue un rôle très important sur les propriétés physique des sols fins, deux variables sont nécessaires pour décrire l'état d'un sol :

- La teneur en eau, w exprimée en % (NF P94-050) ;
- Le poids volumique sec et/ou humide γ exprimé en KN/m³. (NF P94-053).

Certains paramètres d'état, nécessaires à la caractérisation du matériau naturel, font appel aux

limites d'Atterberg. Les études de (BAVER.L 1930 ; COMDEAU.K.M et QUANTIN.O, 1963) ont montré que les limites d'Atterberg dépendent étroitement de la granulométrie de l'échantillon. Les valeurs des limites de liquidité et de plasticité ainsi que celle de l'indice de plasticité augmentent régulièrement avec le taux des éléments fins dans le sol.

III.2.5.2 Paramètres de nature :

Ces paramètres se composent de la granulométrie, de l'argilosité et de la minéralogie.

- La granulométrie de l'argile est effectuée suivant les normes NF P94-056 et NF P 94-051. La répartition des tailles des grains de sol est prise en compte jusqu'à $80\mu\text{m}$. C'est-à-dire que la fraction granulaire d'argile reste inférieure à $80\mu\text{m}$. il définit également la notion de (teneur en argile) qui est le pourcentage d'éléments inférieure à $2\mu\text{m}$.
- L'argilosité est déterminée par l'indice de plasticité IP suivant la norme NF P94-051. L'indice de plasticité dépend de la nature du sol et la quantité des minéraux argileux qu'il contient
- La minéralogie consiste à la détermination de la composition chimique.

III.2.6 Caractéristiques mécanique des argiles :

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

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

III.2.7 Caractéristique hydraulique des argiles :

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

L'argile est un milieu poreux dit « imperméable ». Son coefficient de perméabilité k varie de 10^{-10} à 10^{-13} m/s. et peut-être plus faible parfois. Soit Q le débit d'eau s'écoulant à travers une éprouvette d'argile de section S . en divisant ce débit par S . sera obtenue la vitesse fictive de l'eau à la sortie du massif, comme si toute la section de l'échantillon était soumise à l'écoulement. Cette vitesse V , est appelée vitesse de filtration. (BOUCLY-NOROTTE.V, 1991).

III.2.8 Texture des argiles:

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

GENS.A ET ALONSO.E.E (1992) ont établi une classification pour les sols gonflants, à partir des travaux de COLLINS.K Et MCGOWN.A (COLLINS.K et MCGOWN.A ,1974). Cette classification se base sur l'organisation des particules élémentaires argileuses : Texture « matricielle » (Figure. III.9 a) : une texture dont la base est une pâte homogène avec les particules élémentaires disséminées dans cette pâte. Cette texture est la caractéristique des sols naturels ou des sols compactés du côté humide de l'optimum Proctor.

Texture « agrégée » ou « compactée » (Figure. III.9 b) : une texture compactée avec les particules élémentaires assemblées sous forme de mottes ou d'agrégats (WAKIM. J, 2005).

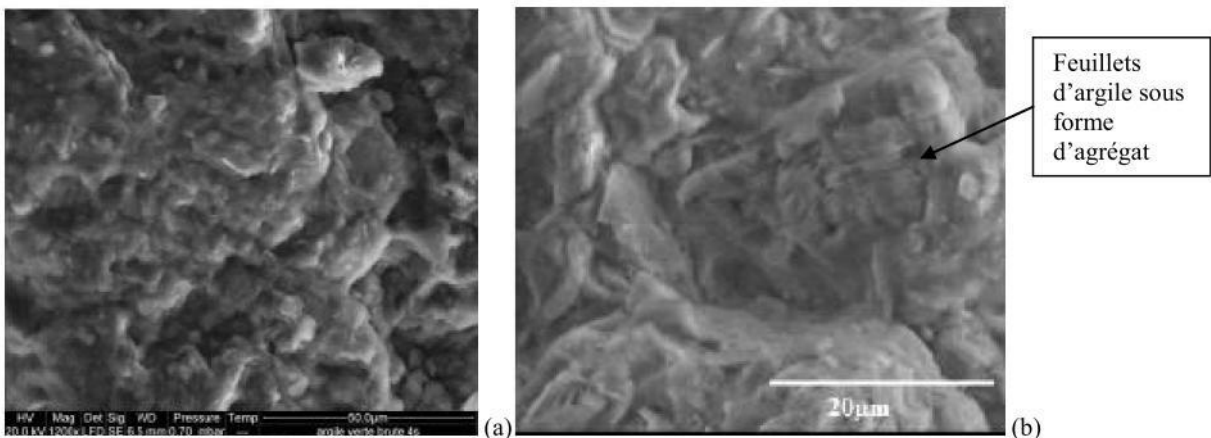


Figure III.9: Photographie au MEB de la texture matricielle (a : Argile Verte de Romainville) et la texture agrégée (b : Argile de Bavent) (VINCENT.L et Al. 2009).

Il est rare de rencontrer des sols argileux composés uniquement d'argile, et au sein même de la fraction argileuse, plusieurs types d'argiles peuvent coexister. La texture des sols argileux peut varier fortement en fonction du type de minéraux argileux, du mode de sédimentation et de l'état de consolidation (WINDAL.T, 2001). Une roche argileuse qui présente une organisation serrée et orientée des particules d'argiles n'a pas le même gonflement qu'un sol argileux dont la sédimentation a été rapide et récente et pour lequel la

distance entre les plaquettes est maximale. Cette organisation des minéraux argileux est la principale cause du gonflement anisotrope.

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

III.3 Le climat et ses effets sur le matériau étudié :

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

Et pour notre cas en va étudier une zone très important par rapport à son emplacement géologique (Tizi-Ouzou) avec un sol de catégorie des sols fins (argile).

III.3.1 Situation géographique :

La Wilaya de Tizi-Ouzou présente un relief montagneux fortement accidenté qui s'étale sur une superficie de 2 994 km². Elle comprend une chaîne côtière composée des Dairas de Tigzirt, Azzeffoun, un massif central situé entre l'Oued Sebaou et la dépression de Drâa-El-Mizan Ouadhias.

La wilaya de Tizi Ouzou (Figure III .10) est limitée par:

La mer méditerranée au Nord ;

La Wilaya de Bouira au Sud ;

La Wilaya de Boumerdes à l'Ouest ;

La Wilaya de Bejaia à l'Est.



Figure III .10: Wilaya de Tizi-Ouzou.

III.3.2 Climat De Tizi-Ouzou :

Tizi-Ouzou se situe dans la zone du climat méditerranéen. En raison des massifs montagneux qui entourent la ville, il neige chaque année en hiver entre décembre pour les hautes altitudes (600 m et plus), et en février pour les basses altitudes. En été, la chaleur peut être suffocante car l'air marin se heurte au relief montagneux qui l'empêche d'atteindre la ville. À partir de novembre les températures sont de 5 °C au minimum. L'hiver à Tizi-Ouzou dans les années précédentes sont marqués par des records de température, en 2012, par exemple, les températures ont dépassé les 17 °C (*Tableau. III.3*). La température la plus élevée jamais enregistrée à Tizi-Ouzou date de juillet 1901 avec 50 °C, et la température la plus basse date de février 1982 avec -11 °C.

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

Tableau III.3 : Climatologique de Tizi-Ouzou (période 2001-2015).

Mois	Jan.	Fév.	mars	avril	mai	juin	Jui.	août	sep.	oct.	Nov.	Déc.	Moyen annuelle
Température minimale moyenne (°C)	7,2	7,5	9	11,2	14,2	18,2	21,6	21,9	19	16,2	11,4	8,1	13,9
Température moyenne (°C)	11,4	11,4	14,1	16,7	20,2	25,1	28,7	28,9	25,2	22,1	15,8	12,2	19,2
Température maximale moyenne (°C)	15,4	15,9	19,2	22,2	26,1	32	35,8	35,9	31,4	27,9	20,3	16,4	24,8
Record de froid (°C)	-3	0	0,6	4	6,6	8	16	16	12,4	7,5	3,5	0,7	-3
Record de chaleur (°C)	23,4	30	31,9	37,8	39	43	45,7	45,2	43	40,5	31,7	27	45,7
Précipitations (mm)	98,2	95,3	90	80,8	52,8	18,4	4,6	7,8	36,8	55,3	106,4	116,3	705

III.3.3 Précipitations :

La pluviosité est un facteur très important qui est déterminé par sa durée de chute et son intensité. Elle est caractérisée par une répartition inégale d'un point à un autre et d'une saison à une autre.

Les données pluviométriques enregistrées dans les localités environnantes de la région d'étude (Tizi-Ouzou, Freha) sont portée dans un tableau, Ils ont été pris par l'Agence Nationale des Ressources Hydraulique (A.N.R.H) de Tizi-Ouzou (HAOUCHINE.A, 2011).

Tableau III.4 : Précipitations moyennes mensuelles et totaux pluviométriques (en mm) à certaines localités de la région d'étude (période 1989-2008).

Tizi-Ouzou	220	32,4	66,1	98,3	131	125,2	89,9	59,7	79,4	57,5	7,4	3,6	7,1	757,6
Freha	155	24,4	64,5	120,6	162,1	121,0	70,5	72,0	87,0	41,5	4,7	1,3	2,8	772,4

III.4 Influence climatique sur l'argile:

Le climat est défini par une température, un pourcentage de précipitation, un degré d'humidité et du vent. Dans les zones aride et semi-aride, il est composé de deux saisons extrêmes telles que l'hiver et l'été ; l'hiver est caractérisé par de fortes précipitations, un pourcentage d'humidité élevé et de faibles températures, et l'été est caractérisé par un faible pourcentage d'humidité, une température élevée et l'absence presque permanente des précipitations.

Les cycles climatiques hiver et été avec toutes leurs caractéristiques provoque plusieurs influences sur le comportement des sols argileux, parmi ces influences le phénomène de retrait-gonflement, les fissurations et les transformations des minéraux.

III.4.1 Le retrait-gonflement :

Le matériau argileux présente la particularité d'avoir sa consistance se modifier en fonction de sa teneur en eau, dur et cassant lorsqu'il est asséché, un certain degré d'humidité le fait transformer en un matériau plastique et malléable. Ces modifications de consistance peuvent s'accompagner, en fonction de la structure particulière de certains minéraux argileux, de variations de volume plus ou moins conséquentes : fortes augmentations de volume (phénomène de gonflement) lorsque la teneur en eau augmente, et inversement, rétractation (phénomène de retrait) en période de déficit pluviométrique marqué.

Les déformations de gonflement et de retrait des sols argileux sont deux faces opposées d'un même processus, qui se produit dans le massif de sols au cours du temps en fonction du degré d'humidification ou précipitations ou températures appliquée au sol.

En fonction de la quantité des précipitations, des conditions d'écoulement de l'eau en surface et du degré de séchage, la quantité d'eau dans le sol peut être sensiblement différente. Dans les régions où le bilan hydrique est positif, les sols peuvent se trouver dans un état saturé. Au contraire, dans les régions où le bilan hydrique est déficitaire, la teneur en eau des sols peut diminuer progressivement vers un état semi-sec.

Le gonflement d'une argile est le résultat d'une introduction de molécules d'eau entre les feuillets. Si la distance interfoliaire est supérieure à $3A^\circ$ (dimension de la molécule d'eau), l'accès de l'eau est possible, les forces d'attraction entre les feuillets sont alors affaiblies du fait de la présence d'eau. C'est cet affaiblissement qui donne aux feuillets d'argile une tendance de s'éloigner les uns des autres en augmentant l'espace interfoliaire, ce qui provoque par conséquent le phénomène de gonflement.

S'il est saturé, le sol va d'abord diminuer de volume, de façon à-peu-près proportionnelle à la variation de teneur en eau, tout en restant quasi saturé. Cette diminution de volume s'effectue à la fois verticalement, se traduisant par un tassement, mais aussi horizontalement avec l'apparition de fissures de dessiccation (classiquement observées dans les fonds de mares qui s'assèchent). En deçà d'une certaine teneur en eau (dite limite de retrait), le sol ne diminue plus de volume, et les espaces intergranulaires perdent leur eau au bénéfice de l'air. Des pressions de succion se développent de façon significative. Lorsque le sol argileux non saturé s'humidifie, il se sature sans changement de volume. Il en résulte une annulation progressive des pressions de succion jusqu'à ce que l'argile retrouve son volume initial, voire le dépasse. Divers paramètres, dont la nature minéralogique de l'argile, conditionnent l'ampleur de ce gonflement. Les déformations verticales (de retrait ou de gonflement) peuvent atteindre 10 % de l'épaisseur de sol considérée.

III.4.2 Les fissures :

Les périodes de gel durant l'hiver, ou d'alternance de périodes de sécheresse en été, créent des cycles d'humectation et de dessiccation des sols. Sur un sol contenant au moins 20% d'argiles (type smectites), ces cycles humectation dessiccation permettent de créer de la fissuration, donc une porosité d'origine climatique, aussi appelée fissurale.

Cette fissuration, très souvent visible en surface des sols lors de périodes sèches, conduit également à former des agrégats de type anguleux.

Le mécanisme responsable de cette fissuration est celui du gonflement-retrait des argiles. En effet, dans certaines familles d'argiles (de type smectites), les feuillets d'argiles ont la capacité à se gonfler sous l'action de l'eau puis de se rétracter lors de période sèche. L'alternance de ce phénomène conduit à une fissuration avec des points d'entrée d'air.

La propriété du sol qui détermine le comportement des sols face à ce phénomène est nommé activité structurale ou aptitude à la fissuration.

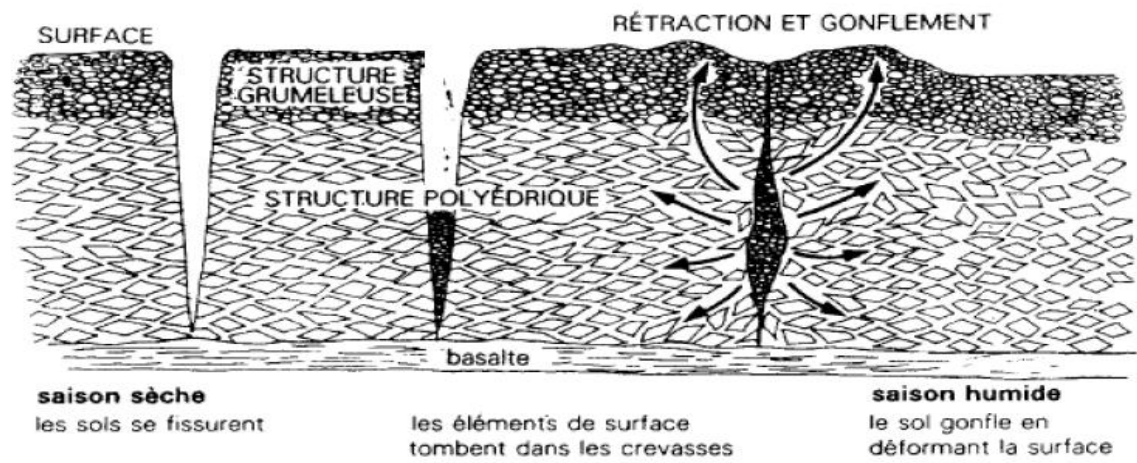


Figure III.11 : Conséquence du gonflement des argiles dans la déstructuration d'un sol (FAGEL.N, 2005).

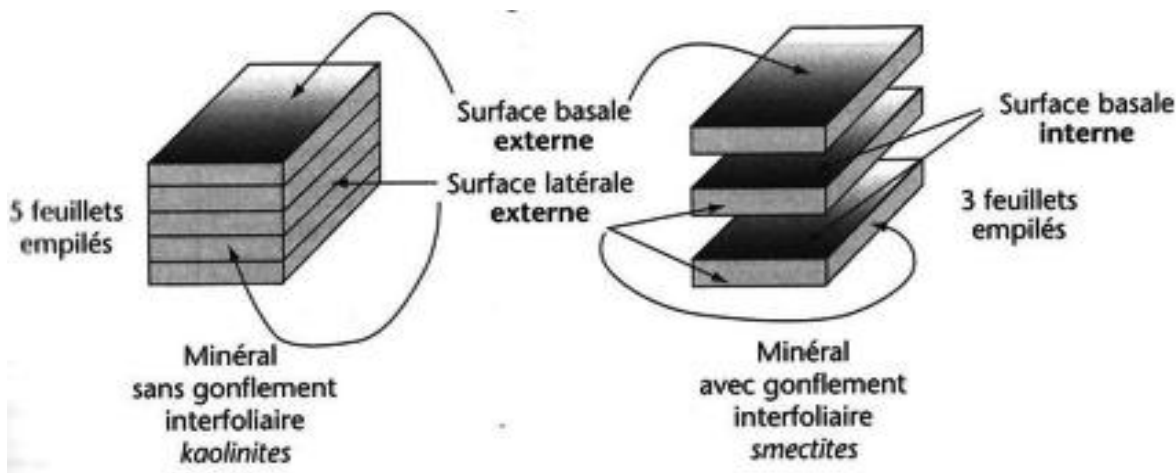


Figure III.12 : Schéma de mécanisme de gonflement - retrait des argiles (CALVET. R, 2009)

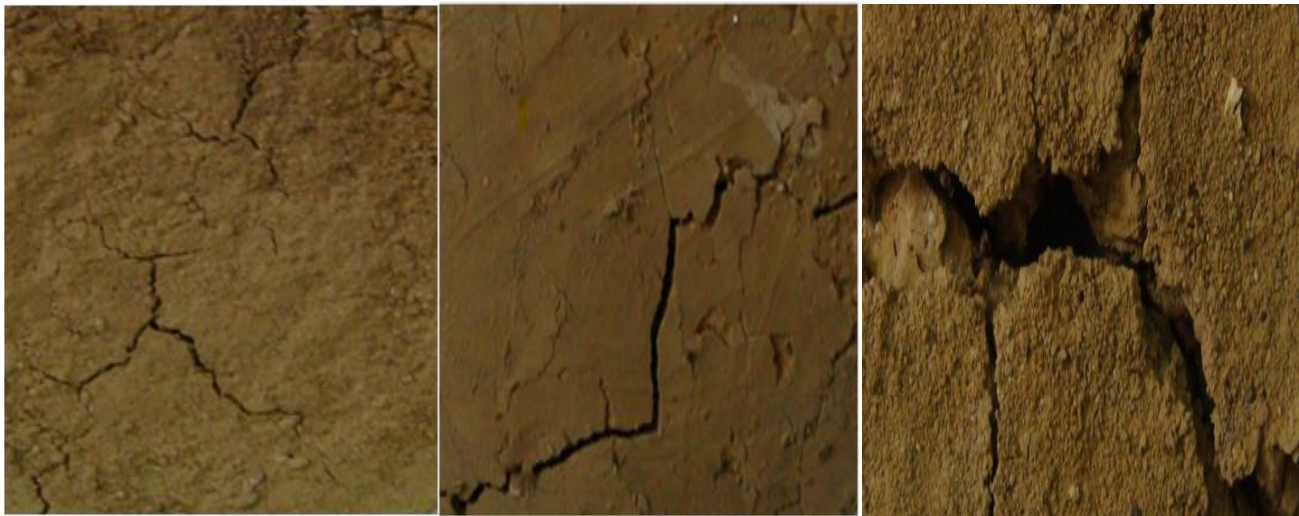


Figure III.13 : les fissures avec ses différents degrés.

III.4.3 Transformations des minéraux:

Les minéraux argileux résultant de la destruction des roches, peuvent soit rester sur place (argiles résiduelles, ex: argiles à silex, argiles de décalcification) soit être transportées sur de longues distances.

En fonction des roches mères et du climat, les minéraux argileux résultant sont différents. En climat froid l'altération est faible, les minéraux argileux sont identiques ou peu différents des minéraux de la roche (illite et chlorite), ils sont hérités de la roche d'origine. En climat chaud et humide, l'hydrolyse est poussée, la kaolinite se forme en milieu drainé, les smectites en milieu confiné. En climat tempéré, humide, l'altération est modérée, il apparaît des interstratifiés, des illites et chlorites dégradées, de la vermiculite.

Les minéraux néoformés ou hérités peuvent évoluer pour prendre un nouveau statut en équilibre avec le nouveau milieu. On distingue les transformations par dégradation (soustraction d'ions) et par aggradation (par fixation d'ions supplémentaires). Ces transformations ont lieu aussi bien au cours de l'altération que de la diagénèse.

Exemple: Kaolinite ----->Chlorite.

Smectites -----> Illite.

III.5 Conclusion :

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

Les déformations, gonflement et retrait, des sols argileux sont deux faces opposées d'un même processus, qui se produit dans le massif de sols au cours du temps en fonction du degré d'humidification, de précipitations et de températures appliqué au sol. Les cycles d'humectation-dessiccation permettent de créer de la fissuration, donc une porosité d'origine climatique, aussi appelée fissurale. Le mécanisme responsable de cette fissuration est celui du gonflement-retrait des argiles.

Les minéraux argileux ont un rôle principal dans la déformation du sol (retrait-gonflement), en fonction du climat les minéraux néoformés ou hérités peuvent évoluer pour prendre un nouveau statut en équilibre avec le nouveau milieu.

Dans les chapitres prochaines en va définir la nature du sol étudié, avec la réalisation des essais climatiques pour confirmer les effets étudiés dans ce chapitre sur notre sol.

Chapitre IV

IDENTIFICATION DES SOLS ETUDIES

IV.1 Introduction :

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

Dans le domaine de la géotechnique, l'identification du matériau qu'on voudrait utiliser est la première étape à suivre. Cette opération se fait à l'aide des essais de laboratoire et in-situ. Ces essais permettent la détermination des caractéristiques mécaniques et physiques du sol concerné. Ces dernières sont d'un grand intérêt, car elles servent non seulement à classer les sols mais 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:

- Teneur en eau,
- Densité sèche,
- Analyse granulométrique par la sédimentométrie,
- Limites d'Atterberg,
- Valeur de bleu méthylène,

Ainsi qu'une analyse minéralogique.

IV.2 Origine des matériaux utilisés :

Les matériaux étudiés dans ce travail sont des matériaux locaux souvent rencontrés dans la région de la Grande Kabylie.

- L'échantillon N°01 est prélevé d'un site à «Freha» (date de prélèvement : 02/2017, LCTP Tizi-Ouzou); pour une réalisation de bâtî, la profondeur de sondage est entre 4.40 m et 4.90 m (Figure IV-1).
- L'échantillon N°02 prélevé d'un site au «centre ville de Tizi-Ouzou» (date de prélèvement : 03/2017, LNHC Tizi-Ouzou) ; pour une réalisation d'un mur de soutènement à l'arrière de l'hôpital, Avenue Abane Ramdane, la profondeur de sondage est entre 5.10 m et 5.60 m (Figure IV-1).



Figure IV-1 : Image satellite qui montre les sites d'échantillonnage.

IV.3 Caractéristiques physiques et minéralogiques :

IV.3.1 Caractéristiques physiques :

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

IV.3.1.1 Teneur en eau naturelle W % (NF P 94 – 050) – Méthode par étuvage :

C'est le rapport du poids d'eau que le sol contient au poids de ses éléments secs, après dessiccation à l'étuve à 105 °C (60°C dans le cas des sols contenant des éléments organiques).

$$W = (w_w / w_s) \times 100 \quad (IV.1)$$

La connaissance de la teneur en eau d'un sol est très importante car elle permet, avec d'autres caractéristiques, d'apprécier l'état dans lequel se trouve le sol.

Dans le cas des matériaux étudiés, les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau IV .1: Détermination de la teneur en eau naturelle.

Sites de prélèvement des échantillons	W (%)
Freha	18,806
Centre ville	12,491

- **Interprétation des résultats :**

L'argile de **Freha** et l'argile de **centre ville** ont des teneurs en eaux moyennes ; Ceci peut être expliqué par le fait que l'argile de **Freha et l'argile de Centre Ville** ont un volume des vides important et une perméabilité élevée, d'où la facilité d'infiltration d'eau, sachant que les échantillons sont prélevés en période hivernale.

IV.3.1.2 Masse volumique des sols :

a) Masse volumique des grains solides des sols selon (NF P 94 – 054) – Méthode au pycnomètre :

La masse des particules solides est obtenue par pesage et exprimée en gramme. Les quantités de sol utilisées pour l'essai sont 50 g et 100 g prélevées sur le tamisât de l'échantillon de sol au tamis de 2 mm.

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

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

m_1 : masse du pycnomètre vide (g) ;

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

m_3 : masse du pycnomètre avec le matériau (g) ;

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

ρ_w : masse volumique de l'eau égale à 1 (g/cm³).

$$\rho_s = m_s / v_s$$

Tableau IV.2: Masse volumique des grains solides.

Sites	ρ_s (g /cm ³)
Freha	2,31
Centre ville	2,22



Figure IV.3 : Matériel d'essai au pycnomètre.

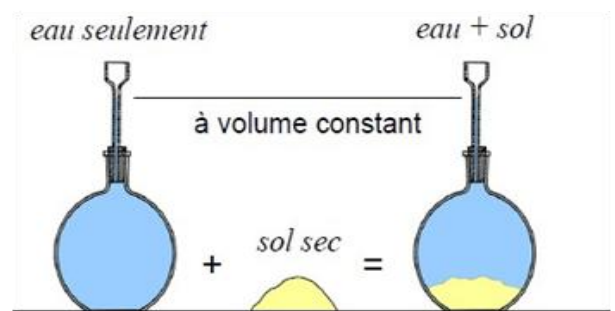


Figure IV.2 : Les étapes de l'essai au pycnomètre.

b) 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.



Figure IV.5 : Matériel d'essai du poids volumique du sol sec.



Figure IV.4 : Matériel d'essai de l'immersion dans l'eau.

Tableau II.3: Masse volumique humide.

Site	ρ_h (g/cm ³)
Freha	2
Centre ville	1,85

c) Masse volumique du sol sec (NF P 94 – 064) :

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

$\rho_d = m_s / V_t$ avec la relation existante entre ρ_d et ρ_h qui est :

$$\rho_d = \rho_h / (1 + w) \quad (\text{IV.3})$$

Tableau IV.4: Classification des masses volumiques sec.

ρ_d (g /cm ³)	Appréciation
< 1,6	Faible
1,6 – 1,8	Moyenne
> 1,8	Dense

Tableau IV.5: Masse volumique du sol sec.

Site	ρ_d (g/cm ³)	Appréciation
Freha	1,717	Faible
Centre ville	1,449	Faible

IV.3.1.3 Indice des vides et degré de saturation :

- a) **Indice des vides (e) :** C'est le rapport du volume des vides au volume des grains solides. $e = V_v / V_s$ avec : $e = (\rho_s / \rho_d) - 1$ (IV.4)

Tableau IV.6: Indice des vides pour les deux sites.

Sites	e
Freha	0,345
Centre ville	0,532

- Interprétation des résultats :**

Dans le cas des sols étudiés, les résultats des indices des vides pour les deux sites (voir tableau IV.6) varient de 0.532 à 0.345, ce qui nous permet de connaître la proportion des vides, et de conclure que l'argile étudiée de centre ville est moins compactes par rapport à celle de Freha qui est plus compactée, ce qui confirme les résultats obtenus précédemment dans la mesure de la teneur en eau naturelle.

- b) **Degré de saturation S_r (%) :** C'est le rapport du volume de l'eau au volume des vides d'un sol. $S_r = V_w / V_v$ avec : $S_r = (\rho_s / \rho_w) \times (W / e)$ (IV.5)

Tableau IV.8: Degré de saturation pour les deux sites.

Sites	S_r (%)	Appréciation
Freha	93,494	Détrempé
Centre ville	34,016	Humide

Tableau IV.7: L'état de saturation du matériau.

S_r (%)	Appréciation
100	Saturé
76 – 99	Détrempé
51 – 75	Mouillé
26 – 50	Humide
1 – 25	Légèrement humide
0	Sec
D'après TERZAGHI	

- **Interprétation des résultats:**

Le degré de saturation de l'argile de Centre ville est inférieur à 40 %, ce qui permet de dire qu'on est en présence de sols non saturés, par contre l'argile de Freha est un sol partialement saturé.

IV.3.1.4 L'analyse granulométrique par la sédimentation [NF P 94- 056] :

L'analyse granulométrique par sédimentation est un essai qui complète l'analyse granulométrique par tamisage pour déterminer la répartition selon le diamètre des grains de fraction fine de sol inférieure à 80 μm .

a) Principe de l'essai :

L'essai de sédimentation est un essai basé sur la loi de Stokes, qui donne la vitesse limite V_{lim} d'une particule de poids spécifique des grains solides γ_s tombant sous l'action de la pesanteur dans un liquide visqueux de poids spécifique γ_w et de viscosité η . En réalité cet essai se fait en dispersant les particules de sol dans l'eau par agitation. On laisse décanter et on mesure la densité de la solution à différents niveaux en fonction du temps. En établissant le diamètre des particules d'une part et le pourcentage de particules d'autre part, on peut ainsi tracer la courbe sédimentométrique qui complète la courbe granulométrique.

b) La procédure de l'essai

En premier lieu, on prépare un mélange d'eau distillée additionnée d'un défloculant. Ce dernier a pour but de décoller les grains les uns des autres et ainsi permettre leurs libres mouvements dans l'eau. Cette solution est constituée à partir de 440 cm^3 d'eau distillée et de 60 cm^3 d'une solution à 5% d'hexamétaphosphate de sodium. Ensuite, on prend 40 g du tamisât de 0,08 mm qu'on imbibe dans 500 cm^3 de la solution préparée pendant au moins 15 heures, à température ambiante.

Au moyen de l'agitateur mécanique (Figure IV-6), la prise d'essai est dispersée dans la solution pendant 3 minutes au minimum, à 10 000 tr/min. La suspension est immédiatement versée dans une éprouvette d'essai, en complétant par de l'eau distillée à la température ambiante jusqu'à 1000 cm^3 . À côté, une éprouvette-témoin est également remplie d'eau distillée où on plonge un thermomètre parfaitement propre. On agite vigoureusement, à l'aide de l'agitateur manuel, afin d'assurer une concertation uniforme sur toute la hauteur de

l'éprouvette. L'essai débute au moment où on retire l'agitateur et on plonge le densimètre (figure V-4) avec précaution après déclenchement du chronomètre. La densité est lue au sommet du ménisque à 0,0001 près pour les temps suivants en minutes : 0,5 ; 1 ; 2 ; 5 ; 10 ; 20 ; 40 ; 80 ; 240 ; 1440.



Figure IV.6: Matériel d'essai d'Analyse granulométrique par sédimentométrie

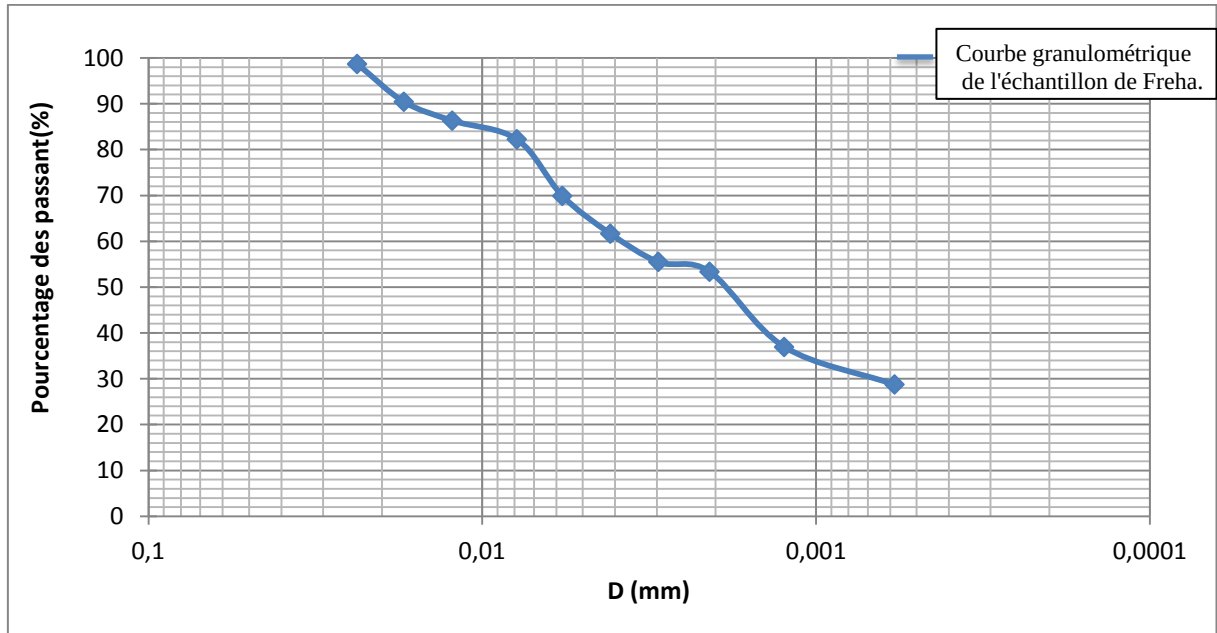
c) Les résultats des analyses granulométriques par sédimentométrie :

Tableau IV.9: Résultats des analyses granulométriques par sédimentométrie pour le site de Freha.

Temps (min)	T°	T° (témoin)	R	R'	ρ_w (g/cm ³)	ρ_t (g/cm ³)	D (μm)	pourcentage des passants sur tamis 80 μm
0,5	24	22,5	1,019	0,98	0,998	1,016962	24,06282	75,5323424
1	23,5	22,5	1,0185	0,985	0,998	1,016463	17,11192	73,5446492
2	23,5	22,5	1,0175	0,9875	0,998	1,015465	12,23589	69,5692628
5	23,5	22,5	1,016	0,986	0,998	1,013968	7,86585	63,6061831
10	23,5	23	1,0155	0,9855	0,998	1,013469	5,55927	61,6184899
20	23,5	23,5	1,0147	0,9827	0,998	1,0126706	3,94132	58,4381807
40	24	23,5	1,013	0,983	0,998	1,010974	2,8358	51,6800238
80	24	24	1,013	0,983	0,998	1,010974	1,99375	51,6800238
240	25	25	1,011	0,981	0,997	1,007967	1,16039	43,6594771
1140	25	25	1,011	0,981	0,997	1,007967	0,53242	43,6594771

Tableau IV.10: Résultats des analyses granulométriques par sédimentométrie pour le site de centre ville.

Temps (min)	T°	T'° (témoin)	R	R'	ρ_w (g/cm ³)	ρ_t (g/cm ³)	D (μm)	pourcentage des passants sur tamis 80 μm
0,5	22,5	23,5	1,024	0,994	0,998	1,021952	23,652046	98,6350195
1	22,5	23,5	1,022	0,992	0,998	1,019956	17,1506142	90,4154345
2	22,5	23,5	1,021	0,991	0,998	1,018958	12,2751891	86,305642
5	22,5	23,5	1,02	0,99	0,998	1,01796	7,8559213	82,1958495
10	22,5	23,5	1,017	0,987	0,998	1,014966	5,74655017	69,8664721
20	23	24	1,015	0,985	0,998	1,01297	4,12723145	61,6468872
40	23	24	1,0135	0,9835	0,998	1,011473	2,9638707	55,4821984
80	24	24,5	1,013	0,983	0,997	1,009961	2,08161146	53,3391769
240	24,5	24,5	1,009	0,979	0,997	1,005973	1,24209578	36,9271225
1140	24,5	24,5	1,011	0,981	0,997	1,007967	0,58041741	27,7833036

**Figure IV.7 :** Analyse granulométrique par sédimentation de l'échantillon de Freha.

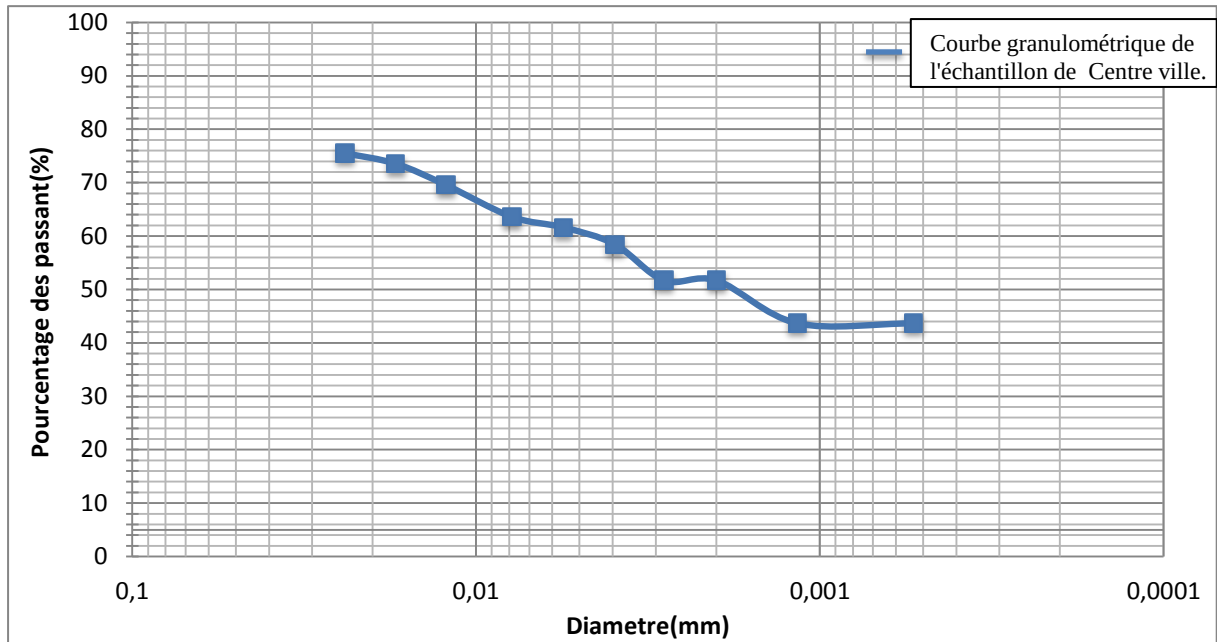


Figure IV.8: Analyse granulométrique par sédimentation site (centre ville).

d) Interprétation des résultats :

Les résultats de la sédimentométrie sont exprimés par des courbes semi-logarithmiques donnant le pourcentage des tamisât cumulés en fonction du diamètre des grains. La granulométrie de ces sols est de plus 65% qu'est inférieure à 80 μm , ce qui permet de classer les deux sols dans la catégorie des sols fins.

IV.3.1.5 Les limites d'ATTERBERG [NF P 94-051] :

Les limites d'Atterberg sont des paramètres géotechniques destinés à identifier et à caractériser l'état d'un sol. Autrement dit, ce sont des teneurs en eau pondérales correspondant à des états particuliers d'un sol. L'essai est applicable à des éléments de sol passant à travers un tamis d'une dimension nominale de 400 μm (0.40 mm). Ces limites sont :

La limite de liquidité est une teneur en eau qui sépare l'état liquide de l'état plastique (Figure IV.9). 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 (Figure IV.9). Cette limite est fixée convenciellement comme la valeur de la teneur en eau, exprimée en pourcentage, pour laquelle un rouleau de sol confectionné manuellement, à dimensions fixées, se fissure.

IV.3.1.5.1 La procédure de l'essai :

L'essai s'effectue en deux phases :

La recherche de la limite de liquidité à la coupelle de Casagrande ;

La recherche de la limite de plasticité au rouleau.

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

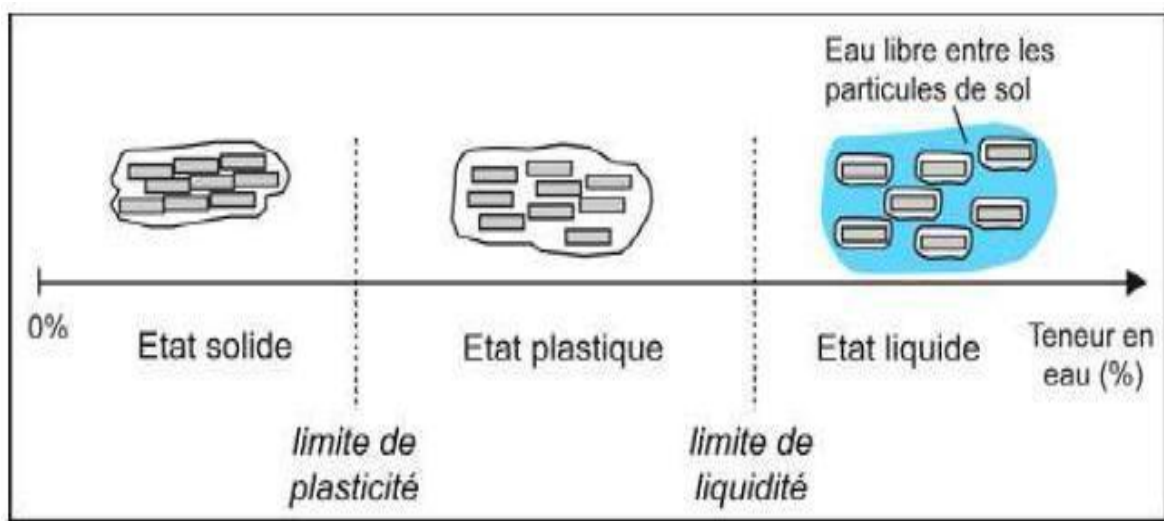


Figure IV.9: Limite limites d'Atterberg (Santamarina, 2001).

a) 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 (Figure IV.11).

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 (Figure IV.12).

Ensuite, on trace une rainure à l'aide de l'outil à rainurer en forme de V, comme

indiqué dans la figure(IV.13).



Figure IV.10 : Les matériels utilisés.



Figure IV.11 : Le mortier malaxé.



Figure IV.12 : Le remplissage de la coupelle de Casagrande

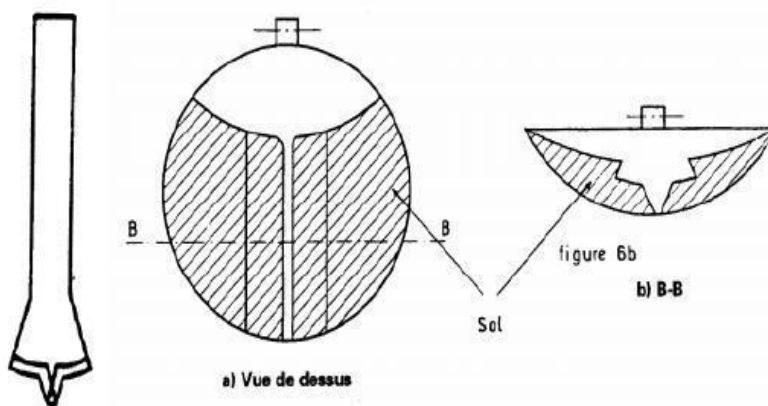


Figure IV.13 : La fermeture de la rainure (CHEHEB.F ,2016).

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.

Enfin, on prélève une quantité de mortier 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.

b) La détermination de la limite de plasticité :

Pour déterminer la limite de plasticité, on forme une boulette à partir de la pâte préparée. À l'aide de la paume de la main, on roule la boulette sur une plaque lisse de façon à lui donner la forme d'un rouleau, sans creux, qui s'amincit progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne $3 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ de diamètre et une longueur de 10 cm (Figure IV.14).

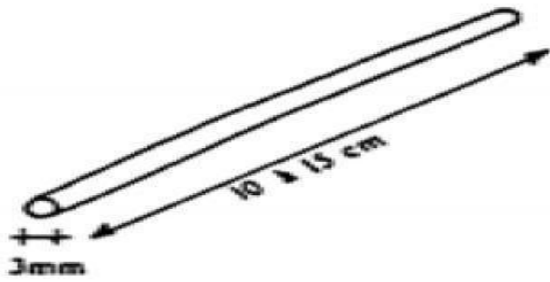


Figure IV.14: La confection du rouleau (CHEHEB.F ,2016).

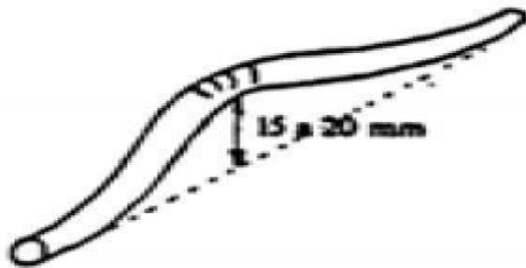


Figure IV-15 : La fissuration et brisure du rouleau (CHEHEB.F ,2016).

On estime arbitrairement que le sol a atteint la limite de plasticité lorsque le cylindre se brise en deux segments en le soulevant du milieu sur une hauteur variant de 15 à 20 mm (figure IV.15). On pèse alors ces derniers sans tarder et on mesure la teneur en eau. On refait l'opération quatre fois pour chacun des échantillons. La limite de plasticité W_p , exprimée en pourcentage, correspond à la moyenne arithmétique des quatre teneurs en eau obtenues.

c) L'indice de plasticité :

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

$$I_p = w_L - w_p \quad \text{IV.6}$$

d) Résultats des limites d'Atterberg :

d.1 La limite de plasticité :

Après avoir réalisé les essais pour chaque échantillon, on calcule la teneur en eau comme indiqué précédemment, on fait la moyenne des quatre résultats et les résultats sont donnés dans le tableau IV-11.

Tableau. IV-11 : Résultats des limites de plasticité.

N° :	Argile centre ville			Argile Freha			W(%)	
	M_{Humide}	$M_{Sèche}$	M_w	M_{Humide}	$M_{Sèche}$	M_w	Argile C.V	Argile F
1	1,997	1,596	0,401	1,757	1,398	0,359	25,125	25,679
2	1,497	1,158	0,339	2,096	1,497	0,599	29,274	40,013
3	1,699	1,299	0,4	2,05	1,597	0,453	30,792	28,366
4	2,196	1,598	0,598	2,097	1,698	0,399	37,422	23,498
W moyennes							30,654	29,389

d.2 La limite de liquidité :

Les valeurs trouvées des limites de liquidité des deux échantillons sont inscrites aux tableaux IV.12 et IV.13.

Tableau IV-12: Limite de liquidité de l'échantillon N°02 (Argile de Freha).

N	M_{Humide}	$M_{Sèche}$	M_w	Nombre de coups	W_L (%)
1	5,192	3,295	1,897	15	57,572
2	5,391	3,395	1,996	23	58,792
3	6,989	4,293	2,696	27	62,8
4	6,389	3,793	2,596	33	68,442

Tableau IV-13: Limite de liquidité de l'échantillon N°01 (Argile de centre ville)

N	M_{Humide}	$M_{Sèche}$	M_w	Nombre de coups	W_L (%)
1	6,742	4,646	2,096	19	45,114
2	5,505	3,875	1,63	22	42,064
3	5,875	4,199	1,676	25	39,914
4	5,791	4,166	1,625	33	39,008

Sur un graphique, on représente les teneurs en eau W obtenues en ordonnée et le logarithme du nombre de coups N en abscisse. La relation entre ces paramètres permet de tracer une droite. La limite de liquidité W_L est déterminée à partir de cette dernière. Elle correspond à une teneur en eau obtenue pour une valeur N égale à 25 coups. Les résultats sont comme suit :

Tableau IV-14: Les teneurs en eau obtenues en ordonnée et le logarithme du nombre de coups égale à 25.

Le Site	Centre ville	FREHA
W_L (à 25 coups)	41,25	63,34

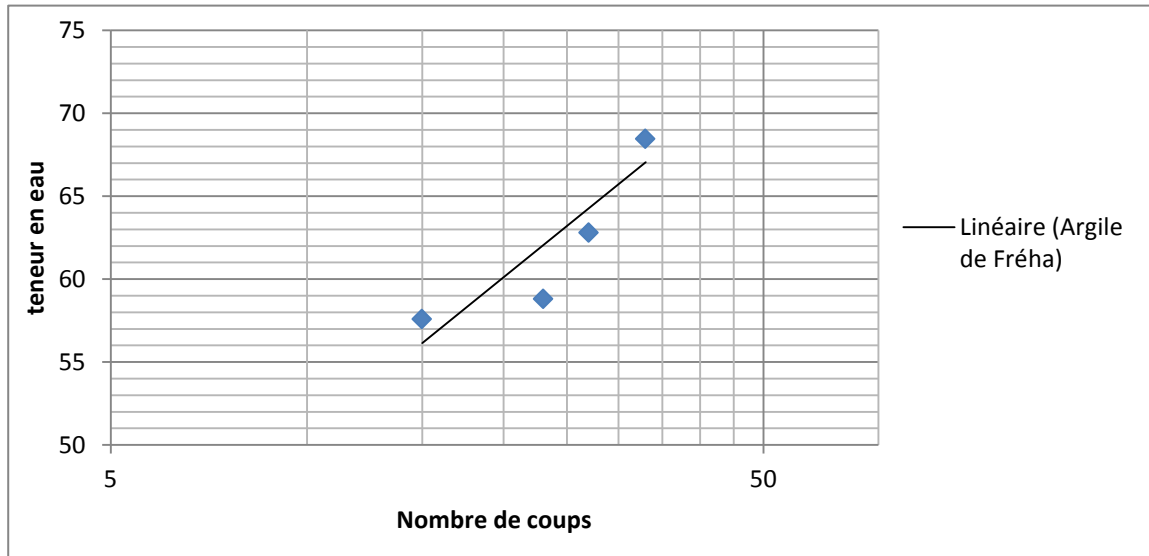


Figure IV.16 : Courbe de limite de liquidité de l'argile de Freha.

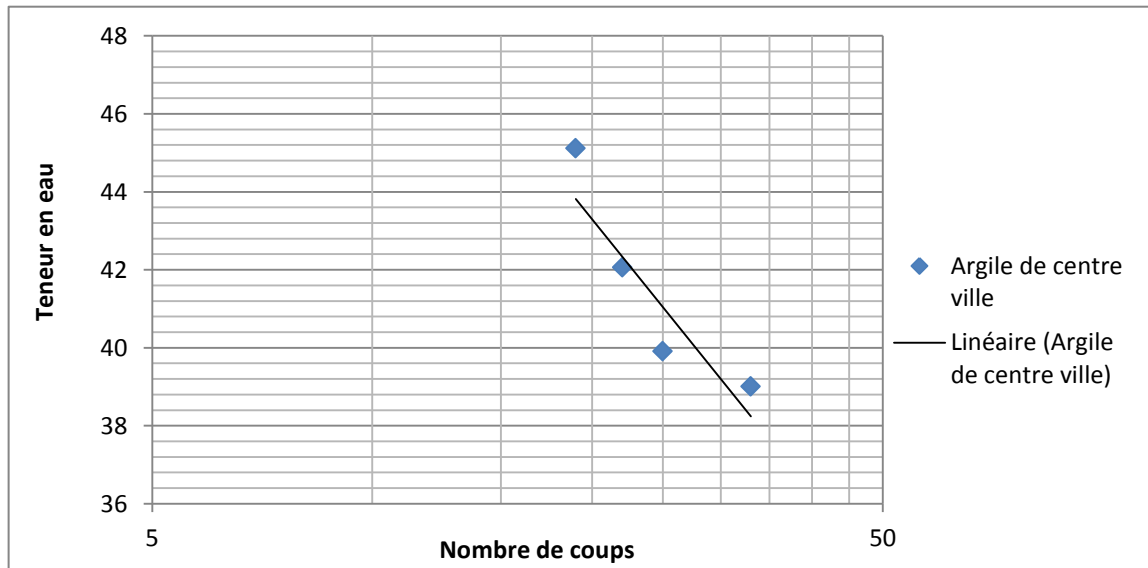


Figure IV.17: Courbe de limite de liquidité de l'argile de centre ville.

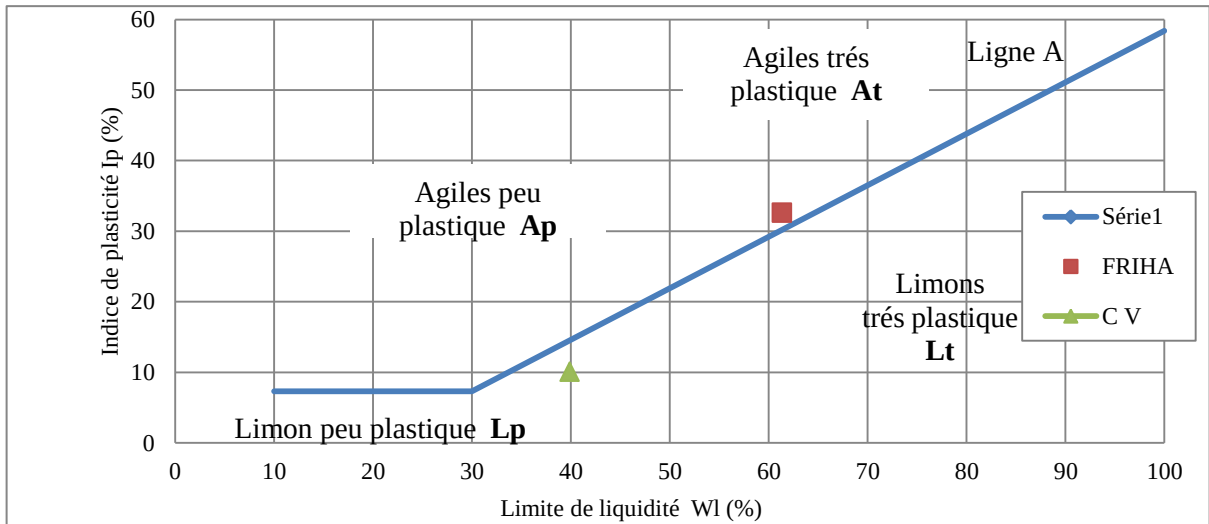


Figure IV.18: Présentation de la plasticité des sols étudiés dans l'abaque de Casagrande.

Tableau IV-15: Les résultats et les appréciations.

Le Site	Centre ville	Freha
W_L (à 25 coups)	41,25	63,34
W_p	30,654	29,389
I_p	10,596	33,96
Résultat	peu plastique	plastique

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 :

$$I_c = (W_L - W) / I_p$$

IV.7

Tableau IV-16: 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

Tableau IV-17: Résultats de l'indice de consistance.

Site	Ic	Appréciation
Freha	0,808	Mi dur
Centre ville	1,714	Dur

e) Interprétation des résultats :

Les résultats des limites de liquidités et de plasticités montrent que l'argile de Freha à un comportement plastique, mais l'argile de centre ville à un comportement peu plastique.

Pour les résultats de l'indice de consistance Ic, on a conclu que l'argile de Freha a une consistance de sol mi dur par contre l'argile de centre ville a une consistance dur.

IV.3.1.6 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 (AC) de SKEMPTON selon la norme NF P94-056 en utilisant l'équation suivante :

$$\text{L'activité de Skempton : } A_c = I_p / F_2.$$

IV.8

Tableau IV.18: Activité (AC) de SKEMPTON pour les deux sols.

Sites	L'activité (AC)	Résultats
Freha	0,632	Moyennement actif
Centre ville	0,1921	Faiblement actif

IV.3.1.7 Mesure du potentiel de gonflement

Les méthodes indirectes basées sur l'évaluation des caractéristiques physiques (teneur en eau, densité sèche, limites d'Atterberg, valeur de bleu, succion...) permettent d'estimer la sensibilité du matériau vis-à-vis du gonflement.

Un nombre considérable d'approches empiriques introduites par différents auteurs, SKEMPTON.A.W, 1953 ; HOLTZ.W.G et GIBBS.H.J, 1956 ; RANGANATHAN.B.V et SATYANARYANA.B, 1965; VIJAYVERJYA.V.N et GHAZZALY.D.I, 1973; MOUROUX.P et al., 1988; basées sur des caractéristiques du sol, qui sont faciles à déterminer au laboratoire, sont utilisées pour l'évaluation du potentiel de gonflement.

Certaines approches sont basées sur un seul paramètre et d'autres sur la combinaison de deux ou trois paramètres ; plus le nombre combiné est grand, plus l'évaluation du potentiel

de gonflement est meilleure.

IV.3.1.7.1 Classifications

a) Classifications selon un seul paramètre

Tableau IV.19 : Evaluation du potentiel de gonflement à partir de l'indice de plasticité (MOUROUX.P et al, 1988).

Potentiel de gonflement	Indice de plasticité (%)
Bas	0-15
Moyen	15-35
Haut	35-55
Très haut	> 55

Tableau IV.20 : Résultats du potentiel de gonflement à partir de l'indice de plasticité (MOUROUX.P et al., 1988)

Site	l'indice de plasticité	potentiel de gonflement
Freha	33,96	Moyen
Centre ville	10,596	Bas

b) Combinaison de deux paramètres

Tableau IV.21 : Degré d'expansion en fonction de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité (SNETHEN.N et al., 1977).

Ip	WL (%)	classification
< 25	< 50	Faible
25-35	50-60	Moyen
> 35	> 60	Très élevé

Tableau IV.22 : Résultats de Degré d'expansion en fonction de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité (SNETHEN.N et al., 1977).

Site	Ip	WL (%)	classification
Freha	33,96	63,34	Moyen
Centre ville	10,596	41,25	Faible

IV.3.1.8 Mesure du potentiel de retrait :

Plus généralement, la limite de retrait est fortement liée à la plasticité du sol et croît avec la limite de liquidité bien qu'il semble que l'on ne puisse pas établir de relation directe entre les deux paramètres. En 1980, le « Building Research Establishment » anglais a proposé une classification des potentiels de retrait des sols argileux en fonction de leur teneur en argile et de leur indice de plasticité (Tableau IV.23). On peut donc dire que la limite de retrait d'un sol argileux sera liée aux mêmes paramètres que ceux qui définissent son potentiel de gonflement, parmi lesquels on peut citer:

Le pourcentage d'argile, la limite de liquidité ou l'indice de plasticité.

Tableau IV.23 : Evaluation du potentiel de retrait à partir de l'indice de plasticité.

Site	Ip	F ₂ < 2 µm (%)	commentaire
Freha	33,96	51,6	Élevé
Centre ville	10,596	52,3	moyen

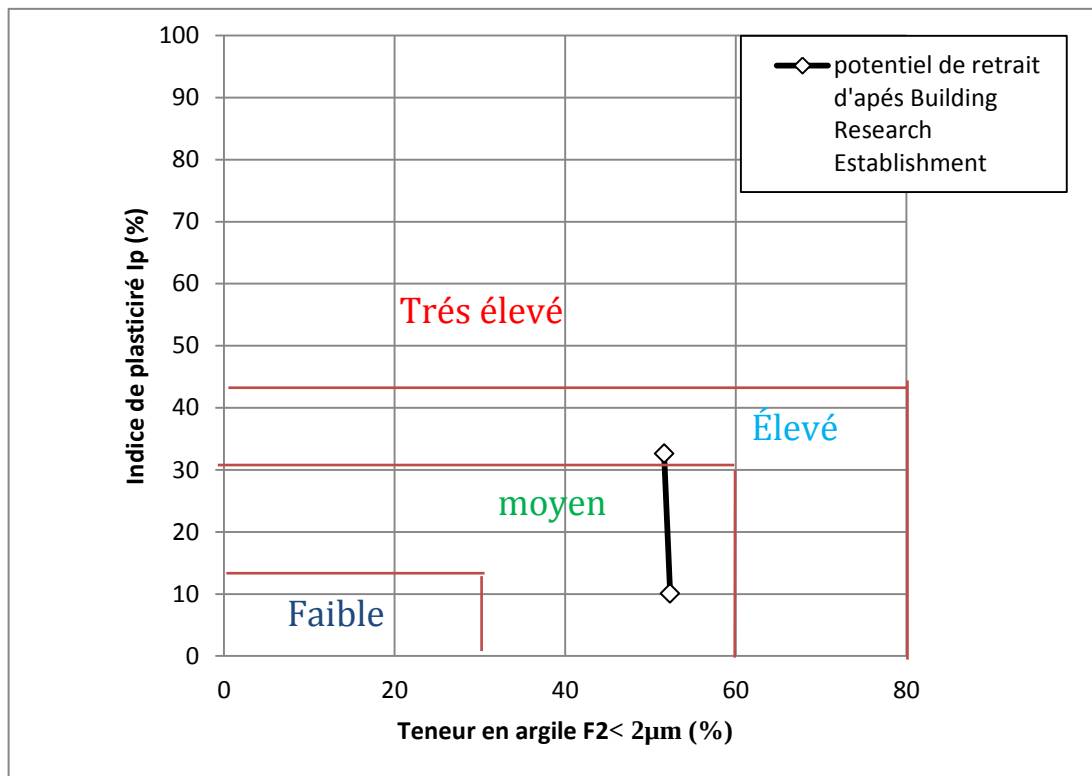


Figure IV.19: Potentiel de retrait (Building Research Establishment, 1980).

IV.3.1.9 Valeur au bleu de méthylène (VBS) (NF P 94 – 068) – Essai à la tâche

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

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

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

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

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

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

$$\text{VBS} = \text{Mb} / \text{Ms} * 100 \text{ avec } \text{Mb} = \text{V} * 100$$



Figure IV.20: Matériel d'essai au bleu de méthylène (résultats de l'essai à la tâche).

Avec :

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.24: Désignation du sol en fonction de son VBS.

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

Tableau IV.25: Résultats des valeurs au bleu de méthylène.

Sites	VBS	Désignation du sol
FREHA	9	Sol très argileux
CENTRE VILLE	3,8	Sol limoneux – argileux

- **Interprétation des résultats**

Les valeurs obtenues au bleu de méthylène montrent que le site de Freha présente un Sol très argileux. Tandis que le site de Centre ville présente un sol limoneux – argileux.

Tableau IV.26 : Résultats finals des expériences.

Site	W %	ρ_s (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_h (g/cm ³)	e	Sr %	Ip %	Ic	F < 2 μ m %	Ac	VBS
Freha	18,806	2,31	1,717	2	0,345	93,494	32,611	0,808	51,6	0,632	9
appréciation	moyenne	/	faible	humide	compacté	détrempe	plastique	Mi dur	/	Moyen actif	très argileux
Centre ville	12,491	2,22	1,449	1,85	0,532	34,016	10,046	1,714	52,3	0,1921	3,8
appréciation	moyenne	/	faible	humide	moins compacte	humide	peu plastique	Dur	/	faible actif	sol limoneux argileux

IV.3.2 Analyse des compositions minéralogiques des échantillons étudiés :

Cette étude consiste à réaliser l'analyse minéralogique par la diffraction aux rayons X et les observations au microscope électronique par balayage (MEB). L'étude minéralogique et pétrographique est effectuée au laboratoire de la Faculté de Chimie de l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, l'USTHB, située à BAB EZZOUAR. Les essais sont réalisés sur des échantillons sous forme de poudres d'argiles d'un diamètre inférieur à 2 μ m. Ces poudres sont obtenues par la méthode de broyage. Les observations aux MEB ont été effectuées, sur des échantillons sous forme de lames minces séchées à l'air sec, au Microscopie Electronique à Balayage de Laboratoire de Chimie de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (l'UMMTO).

IV.3.2.1 Principe de la diffraction aux rayons X :

La diffraction permet de déduire deux types d'informations importantes à savoir la nature du corps étudié et sa structure. L'utilisation des rayons X est une méthode très performante pour déterminer la structure cristalline de composés minéraux. Pratiquement tous les domaines de la physique du solide ont recours à cette méthode.

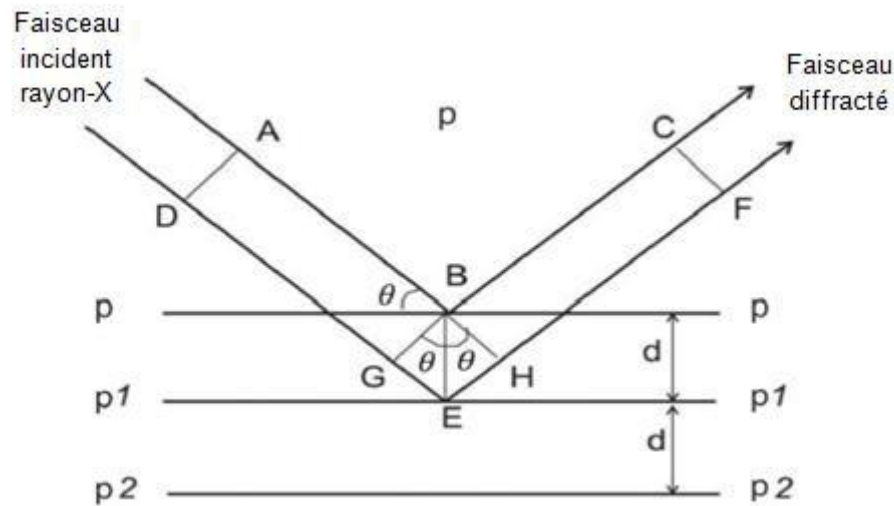


Figure IV.21 : Principe de la diffraction aux rayons X (MADJNOUN.A, 2014).

IV.3.2.2 Principe du MEB:

Le microscope électronique à balayage permet d'obtenir des images de la surface de la plus part des matériaux solides, à des échelles allant de celle de la loupe (x10) à celle du microscope électronique en transmission (500.000 ou plus). Ces images frappent en premier par le rendu très parlant du relief et la grande profondeur de champ.

La particularité du MEB est d'avoir un système de pompage différentiel qui sépare la chambre de la colonne ; ainsi la colonne est soumise à vide élevé (10^{-5} torr)*, alors que dans la chambre règne une pression de quelques Torr (0,1-20 torr) (Figures IV.22 et IV.23). La pression dans le MEB est contrôlée par un flux de gaz au niveau des différents diaphragmes du système (DONALD.S, 2000). Ce gaz est en général inerte, mais on peut introduire un gaz réactif dans la chambre du MEB ; en fait, le choix du gaz est limité par ses propriétés, telles que la toxicité, l'inflammabilité et la réactivité chimique avec les composés de la chambre.

Dans le cadre des travaux présentés ici, le gaz utilisé est la vapeur d'eau qui a, à la fois, le rôle de gaz d'ionisation pour la formation de l'image, et de fluide d'hydratation de l'échantillon.

(*) : 1 Torr = 1,3332.102 Pa

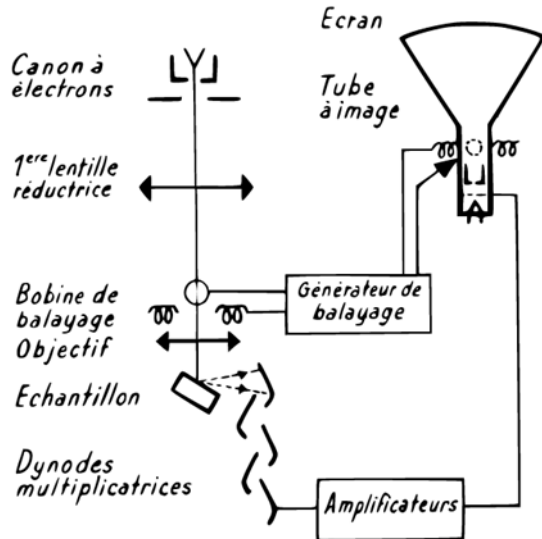


Figure IV.22: Diagramme montrant le principe de la microscopie électronique à Balayage MEB (MADJNOUN.A, 2014).



Figure IV.23: Le MEB utilise pour la réalisation des observations (MADJNOUN.A, 2014).

IV.3.2.3 Minéralogie des sols étudiés :

Tableau IV.27 : La composition minéralogique estimative semi quantitative.

Minéraux	La formule chimique	Composition minéralogique en %	
		Echantillon Fr T.O	Echantillon CV T.O
Quartz	SiO_2	22 (0,05)	23 (0,0)
Calcite	CaCO_3	18 (0,15)	19 (0,21)
Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	06 (0,20)	05 (0,01)
Orthoclase (Feldspaths K)	$\text{K}_2\text{O } 6 \text{ SiO}_2 \text{ Al}_2\text{O}_3$	07 (0,09)	06 (0,23)
Illite	$2 \text{ K}_2\text{O } \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ } 4\text{SiO}_2 \text{ } 2 \text{ H}_2\text{O}$	11 (0,23)	10 (0,4)
Kaolinite	$\text{Al}_2 \text{ SiO}_5(\text{OH})_4$	10 (0,34)	17 (0,1)
Montmorillonite	$\text{Al}_2 (\text{Si}_4\text{Al}) \text{ O}_{10}(\text{OH})_2 \text{ H}_2\text{O}$	22 (0,11)	13 (0,11)
Minéraux ferrugineux+Autre	/	04 (0,30)	05 (0,17)

Les résultats des analyses minéralogiques montrent que les échantillons des deux sites étudiés de la région de Tizi-Ouzou ont une composition minéralogique un peu différente. On constate une présence des minéraux non argileux tels que : le quartz et la calcite et d'autre ; et des minéraux argileux tels que : la montmorillonite, illite et la kaolinite, dans les deux sites.

Dans les échantillons de Freha la présence de la montmorillonite est dominante comparant à celles de la kaolinite et de l'illite, par contre pour les échantillons de centre ville de Tizi-Ouzou la kaolinite est dominante par rapport à l'illite et la montmorillonite. La montmorillonite est connue pour son potentiel de gonflement élevé, contrairement à l'illite (peu gonflante) et la kaolinite (pas gonflante). De ce fait, le pourcentage de la montmorillonite, illites et les kaolinites, doit être pris en considération dans l'étude géotechnique.

IV.3.2.4 Images au Microscope Électronique à Balayage (MEB) :

Afin d'obtenir des informations sur la structure et l'état de surface des sols, des images au MEB (Microscope Électronique à Balayage) ont également été effectuées. L'évaluation a été obtenue pour chaque sol correspondant au diamètre de l'anneau de l'odomètre. Les différentes images obtenues sont représentées dans les figures IV.24 et IV.25.

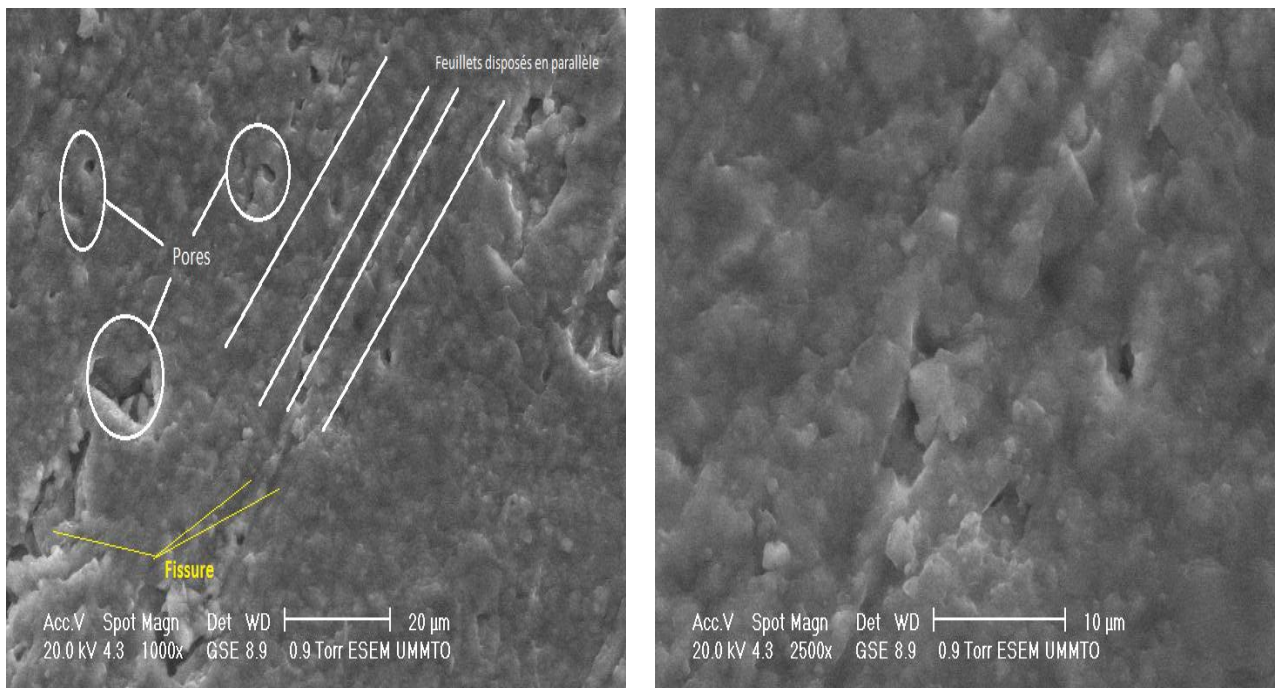


Figure IV.24: Images au MEB réalisées pour un échantillon extrait de la région de Freha.

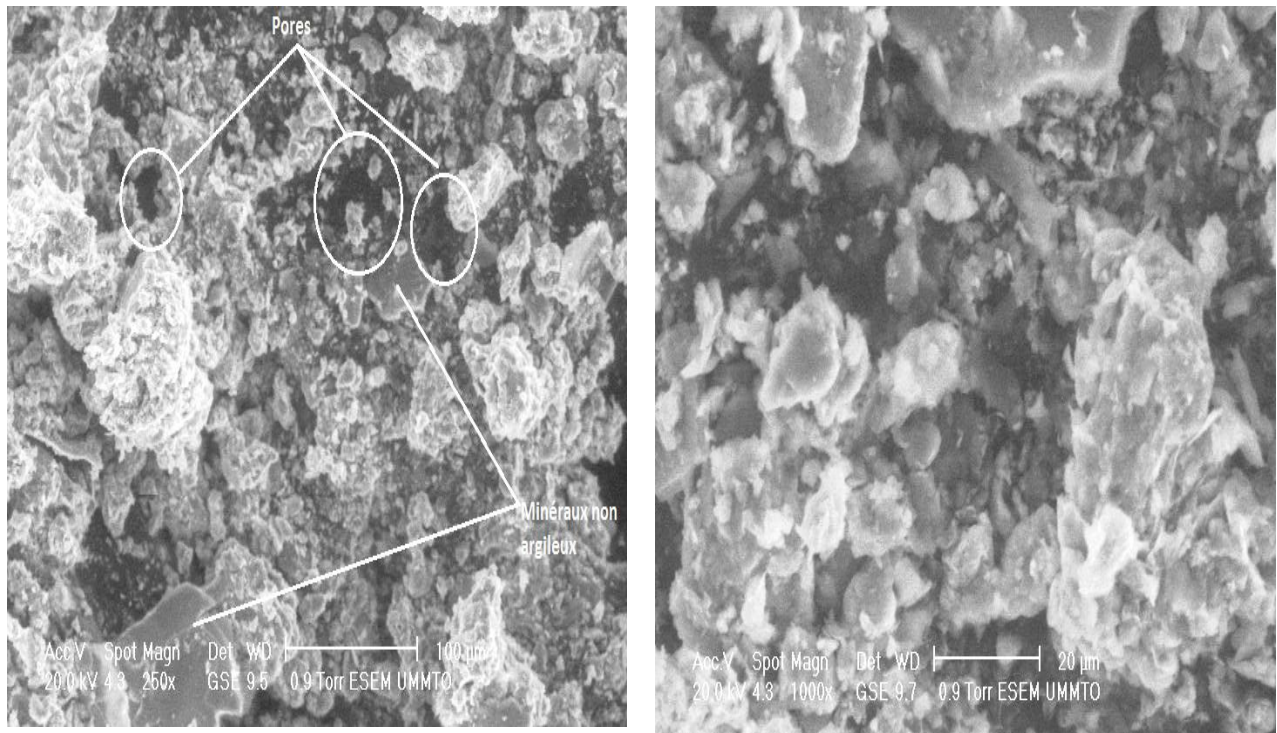


Figure IV.25 : Images au MEB réalisées pour un échantillon extrait de la région de Centre ville de Tizi-Ouzou.

Des échantillons intacts d'argile ont été pris de deux régions différentes de la wilaya de Tizi-Ouzou (Freha et le centre ville de la wilaya). La Figure IV.24, illustre les images faites au MEB pour les échantillons prélevés du site de Freha, montre que la microstructure est représentée par une matrice argileuse relativement homogène et compacte. Le plan de litage montre clairement un arrangement parallèle compact des particules argileuses. Ces observations signifient que les particules argileuses ou les agrégats argileux sont orientés parallèlement au litage de la formation. La nature des minéraux ne sont pas différentes sur la surface horizontale, les pores sont importants présentés dans les deux sols.

La Figure IV.25 des images faites au MEB pour les échantillons prélevés du site de centre ville de la wilaya, montre les différentes microstructures des textures des argiles étudiées selon le plan horizontal. Les textures des figures se ressemblent dans la distribution ainsi que dans la présence des feuillets à différentes largeurs. Cependant, la porosité et la nature des minéraux sont différentes. La texture comporte un mélange de minéraux argileux et non argileux ce qui permet d'avoir un milieu hétérogène moins compact.

IV.4 Conclusion

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

Après les essais physiques réalisée, on constate que l'échantillon de Freha est un sol très argileux, c'est la raison d'avoir un potentiel de gonflement moyen (MOUROUX.P et al., 1988 et SNETHEN.N et al., 1977) et un potentiel de retrait élevé (Building Research Establishment), son comportement plastique mi dur est conditionné que le sol est compacté (l'indice des vides est faible) et partiellement saturé avec une teneur en eau moyenne. Pour l'échantillon de centre ville de Tizi-Ouzou : c'est un sol limoneux-argileux, son potentiel de gonflement est faible et un potentiel de retrait moyenne. Ces résultats sont dus à un comportement peu plastique dur avec une saturation moyenne humide et un pourcentage de teneur en eau moyen et au faite que c'est un sol moins compact.

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

Les images au MEB prises pour les échantillons des deux sites de Tizi-Ouzou, montrent des structures compactes et homogènes et une disposition parallèle des feuillets pour l'échantillon de Freha. Cependant, celles observées sur les échantillons de Centre ville montrent des structures hétérogènes, marquées par la présence des minéraux non argileux.

Chapitre V

LES ESSAIS REALISES SUR LES SOLS ETUDIES

V.1 Introduction

Après avoir cité les effets saisonniers sur les sols fins et avoir identifié le sol choisi pour cette étude ; dans ce chapitre, on passe à une autre étape expérimentale, et on présente les résultats des deux essais choisis pour l'application des effets climatiques sur les échantillons d'argile (l'essai de gel-dégel et l'essai de dégradabilité) suivis par leurs interprétations.

Ces essais ont été réalisés au Laboratoire de recherche Géomatériaux, Environnement et aménagement, **L.G.E.A**, de l'université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou.

V.2 Préparation des échantillons :

Les échantillons sont prélevés de deux sites différents de la wilaya de Tizi Ouzou :

- Site de Freha par le Laboratoire de Construction et Travaux Publics ;
- Site de Centre Ville par le Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction.

V.2.1 Échantillonnage

- On ramène les échantillons et on les coupe à des tronçons de dimensions supérieures à celle de l'anneau de la boîte circulaire de l'essai du cisaillement direct (*Figure V.1*).
- On place l'anneau sur le tronçon et on presse manuellement au avec un presseur hydraulique.
- 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).
- À la fin un presseur hydraulique est utilisé pour faire sortir l'échantillon de l'anneau.



Figure V.1 : Préparation des échantillons.

- **Les notations utilisées :**

F : Argile de Freha (passé par les conditions initiales de chaque essai).

F.N : Argile de Freha à l'état naturel (sans passé aux conditions).

C.V : Argile de centre ville de Tizi-Ouzou (passé par les conditions initiales de chaque essai).

C.V.N : Argile de site de centre ville de Tizi-Ouzou (sans passé aux conditions).

V.3 Les essais réalisés :

Les essais réalisés sont choisies suivant l'influence climatique désirée à étudier sur le sol.

V.3.1 Essai gel dégel :

V.3.1.1 Principe d'essai :

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

Remarque :

Les cycles de températures choisis c'est suivant la nature du climat de la wilaya de Tizi-Ouzou, 45°C de dégel et -2°C au refroidissement (problème dans l'enceinte climatique elle ne peut pas aller à des températures au dessous de -2°C)

V.3.1.2 Appareillage :

Les éléments constituant l'appareillage sont (Figure V.2) :

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



Figure V.2 : Matériel utilisé

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'enceinte climatique (suivant la norme EN 1367_1 de gel dégel) :

- Sécher les échantillons à l'étuve pendant 24h.
- Imbiber les échantillons dans l'eau distillée à une température de 20°C pendant 24h (Pour garder la forme des échantillons on ajoute l'eau par intervalle de temps à l'aide d'une seringue ; 30 ml, 35ml, 45 ml, après chaque 1h : 30 min).

Un cycle gel/dégel prend 24h et il est réalisé comme suit :

On augmente la température de l'enceinte climatique de 0°C à 45°C pendant 18 heures, après on fait diminuer la température de 45°C à -2°C pendant 06 heures, on le répète pendant 5 jours.

Dès le sixième jour on inverse le cycle ; 06 heures à une température de 45°C, suivi de 18 heures à une température de -2°C, répétés pendant 5 jours.

Les échantillons étudiés sont :

- 2 du site de Freha passés par l'étuvage et imbibés (F) ;
- 2 du site de centre ville passé par l'étuvage et imbibés (C.V) ;
- un du site de Freha et un du site de centre ville à l'état naturel (F.N et C.V.N).

On a choisie deux échantillons naturels comme des échantillons témoins.

V.3.1.4 Images des échantillons :

Les images des échantillons, avant et après essai, de centre ville à l'état naturel (C.V.N) et de Freha N°1(F) retenues pour cet essai sont représentées sur les figures V.3 et V.4. Les autres images sont dans l'ANNEXE B, les figures B.5 et B.6 (Fréha N°2, Fréha naturel, Centre ville N°1, Centre ville N°2).

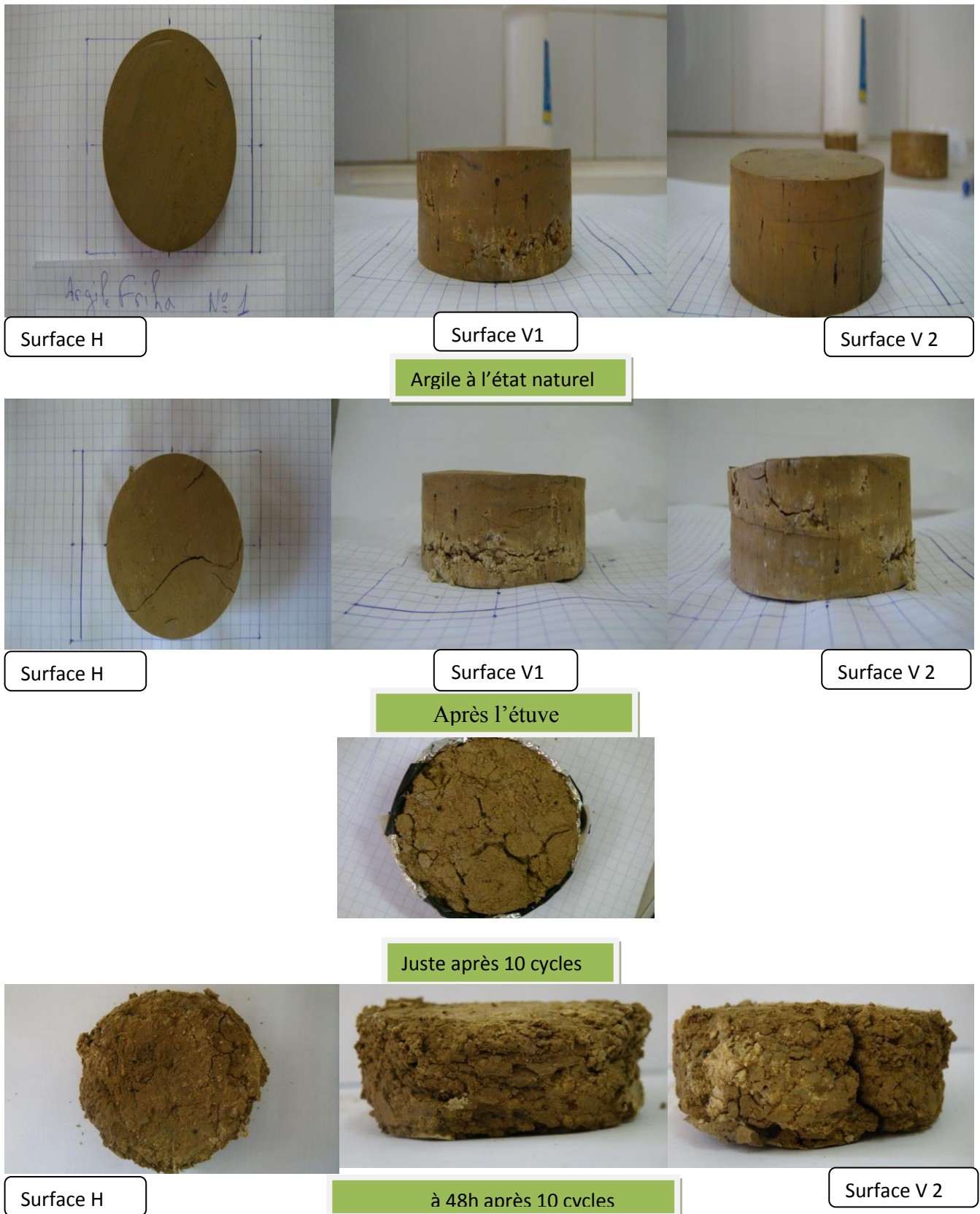


Figure V.3 : Les images de l'échantillon N°1 de Freha à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.

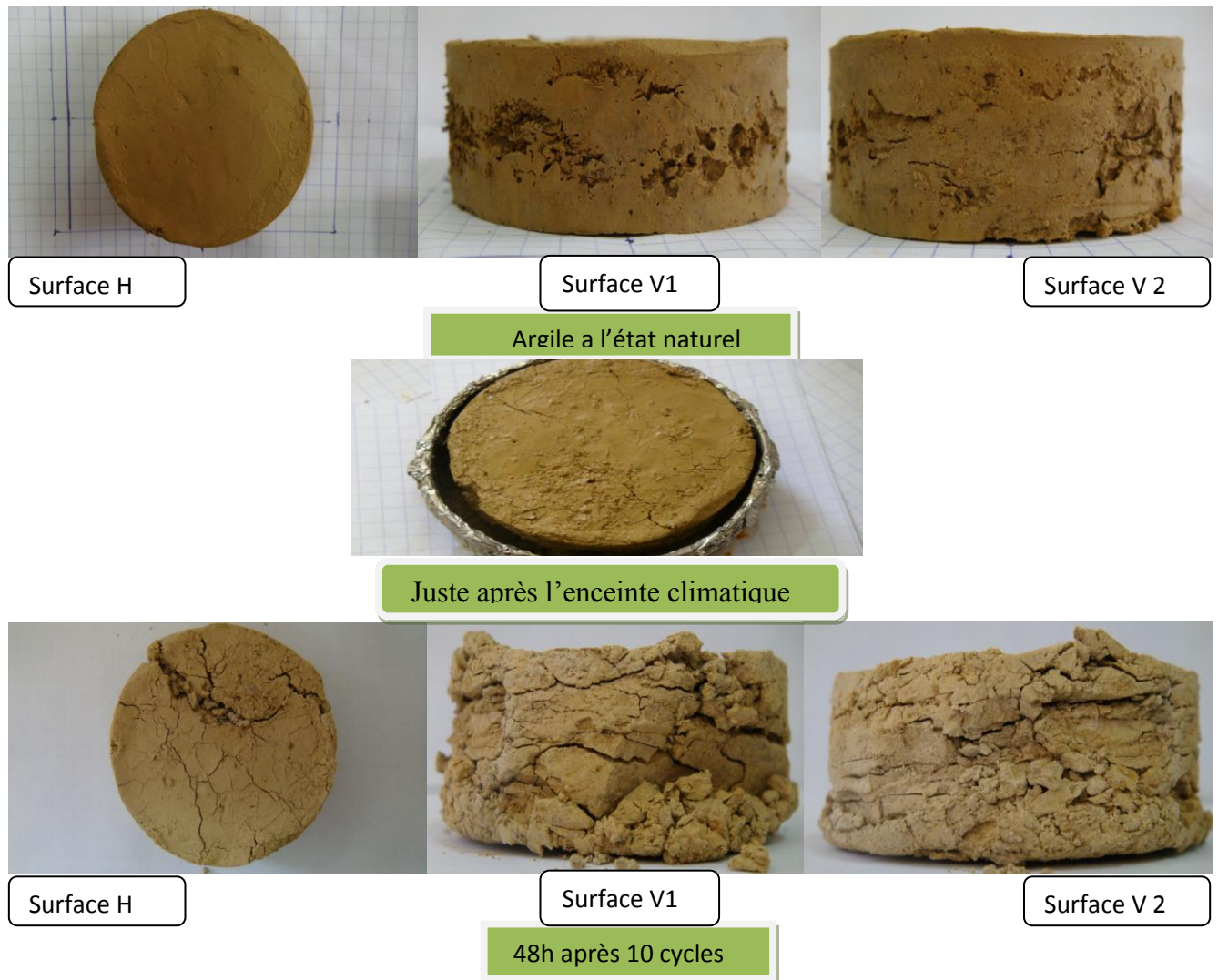


Figure V.4 : les images de l'échantillon de (C.V.N) à état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.

- **Interprétation des résultats des échantillons:**

L'étude est réalisée sur des échantillons d'argile intacte prélevée de deux sites de la même wilaya (Freha et centre ville de Tizi-Ouzou). Ces échantillons sont taillés de façon à avoir un diamètre de 63 mm et une hauteur de 25,4 mm. Le principe d'essai consiste à exposer alternativement les échantillons aux cycles de séchage et humidification. L'enceinte climatique est dotée d'un programme numérique avec lequel les caractéristiques saisonnières de ces deux cycles peuvent être définies.

L'évolution de la structure est suivie au cours des cycles d'essai par une prise de photos au début et à la fin des cycles. Les résultats sont donnés dans les Figures V.3, V.4, B.3, B.4, B.5 et B.6. Les observations ont montré une apparition de petites fissures dans les échantillons F et F.N durant la phase de séchage dans l'étuve (Figure V.3, B.3 et B.4). Les

fissures commencent à s'ouvrir après chaque cycle, ainsi que des modifications de surfaces des échantillons étudiés. Après le dernier cycle des fissures plus larges ont été remarquées avec une diminution de leurs masses par rapport à leurs états initiaux. Ça peut s'expliquer par la présence des Montmorillonites, qui sont très sensibles à l'eau, et le gonflement important de la particule peut se produire par adsorption des molécules d'eau entre les feuillets. Ce gonflement peut atteindre des valeurs dépassant l'épaisseur du feuillet lui-même. On peut dire que l'échantillon de Freha à l'état naturel « F.N » (sans passée aux conditions de l'essai) qui est un échantillon témoin, sa surface horizontale est moins modifiée par rapport à celle de l'échantillon de Freha « F », pour la surface verticale on voit des changements par rapport à son état initial (les changements de volumes et de textures ont été repérés). Sans oublier que les échantillons de Freha ont un potentiel de gonflement moyen et leur sol est très argileux. À la fin on peut dire que le climat affecte d'une manière considérable le sol de Fréha.

Les images des échantillons de Centre ville « CV » et « C.V.N » (Figures V.4, B.5 et B.6) ont montré une apparition des fissures surtout sur la surface verticale, après l'étuve une modification de surface avec des petites fissures à la fin de 10^{em} cycles, le sol se durcit et une différence de masse par rapport à l'état initial. On peut expliquer ces résultats par la présence des kaolinites qui ont une sensibilité moindre à l'eau et un faible potentiel de gonflement, la présence des particules non argileuses engendre le changement de la texture et le durcissement du sol, on peut constater aussi que ces échantillons se sont moins gonflés par rapport aux échantillons de Freha.

V.3.1.5 Les résultats obtenus :

Les résultats relevés avant l'essai (état naturel), après étuvage et à la fin d'essai de l'enceinte climatique (on a laissé les échantillons pendant 48h pour qu'on puisse démolir les tares), sont présentés ci-dessous.

Tableau V.1 : Variation de la masse de l'argile C.V pendant l'essai.

N	L'argile de centre ville T.O	
	N1	N2
Naturel		
M1	161,841	167,732
Après l'étuve		
M2	143,870	150,260
Fin		
M3	158,746	172,923

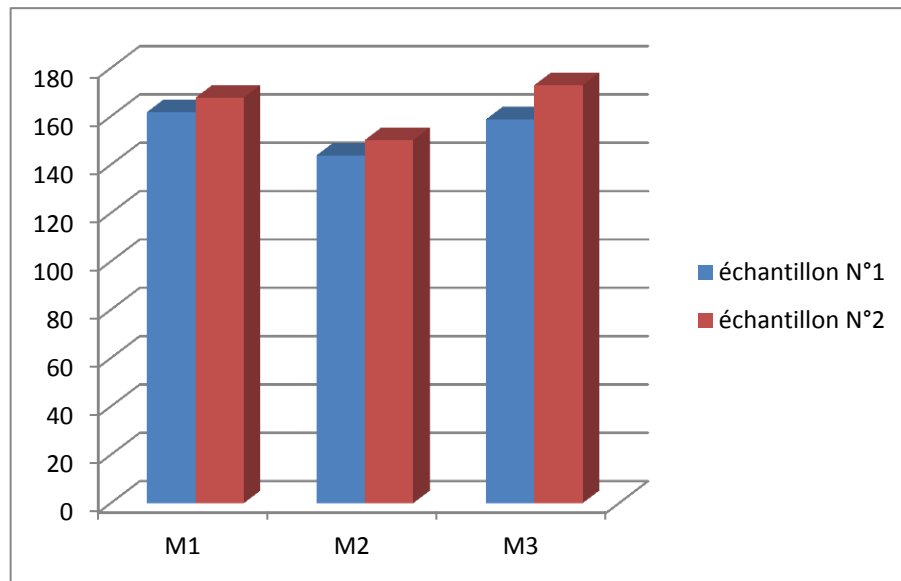


Figure V.5 : Variation de la masse d'argile C.V au cours d'essai.

Tableau V.2 : Variation de la masse de l'argile F pendant l'essai.

N	L'argile de Friha (F)	
	N°1	N°2
Naturel		
M1	158,946	163,339
Après étuve		
M2	133,786	141,558
Fin		
M3	173,722	166,933

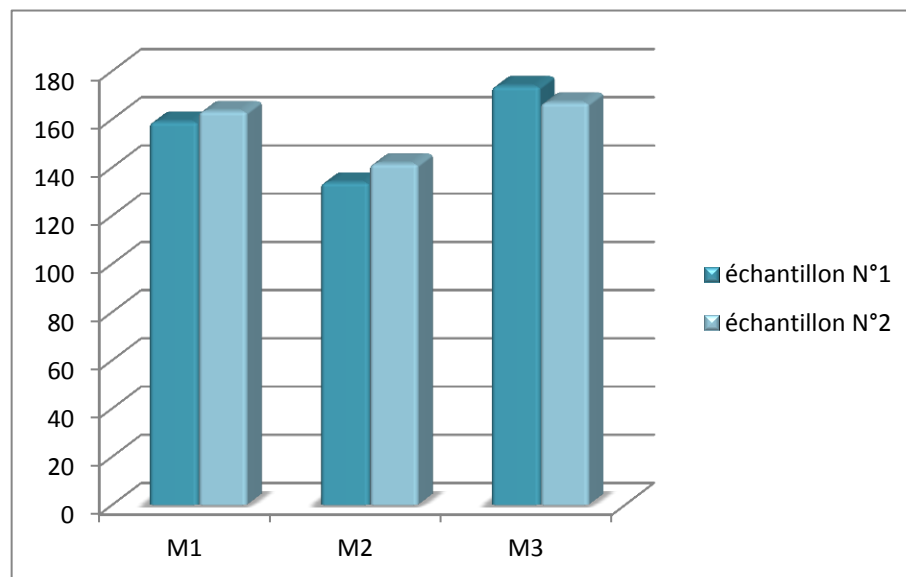
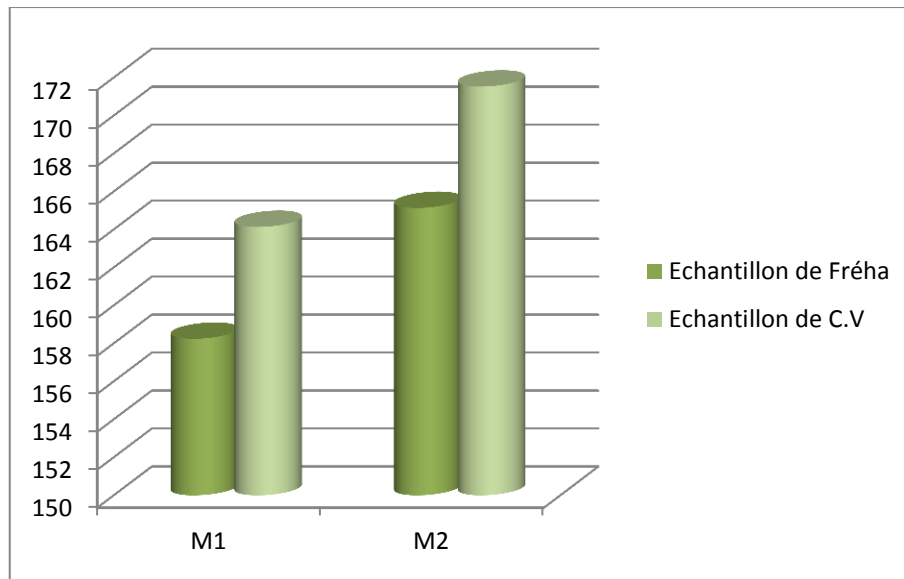


Figure V.6: Variation de la masse d'argile Fréha au cours d'essai.

Tableau V.3 : Variation de la masse de l'argile C.V.N et F.N pendant l'essai d'enceinte climatique.

Argile à l'Etat Naturel		
Site	Friha (F.N)	Centre ville (C.V.N)
Etat naturel		
M1	158,247	164,136
Fin d'essai		
M2	165,136	171,528

**Figure V.7:** Variation de la masse des deux échantillons d'argile à l'état naturel au cours d'essai.

- Interprétation des résultats :**

Les résultats obtenus, pour tous les échantillons, montrent que leurs masses après l'étuvage diminuent et à la fin de l'essai de l'enceinte climatique augmentent, ça revient à l'effet de gel qui a entouré les échantillons, L'échantillon N°1 de centre ville présente un cas exceptionnel, qui a une augmentation faible par rapport aux autres ; l'échantillon n'a pas été bien refroidi à cause de son emplacement dans l'enceinte climatique, à la fin de l'essai la quantité de l'eau absorbée était faible. (la température de l'enceinte climatique ne baisse pas au dessous de (-2°)),

Remarque :

Les échantillons passés directement à l'enceinte climatique, à l'état naturel (C.V.N et F.N), ont eu une augmentation de masse, parce que l'essai est terminé avec un climat très humide, c'est pour ça les échantillons à la fin de l'essai sont très humides.

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 ensuite 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 (105 ± 5) °C ;
- balance de précision à $\pm 0,1$ gr ;
- tares, les bacs ;
- seringue ;
- eau distillée.

V.3.2.3 Le 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 (voir le paragraphe V.2).

Le 1^{er} cycle débute par une mise en immersion et le 4^e 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 30 mn à 45 mn en fonction de l'absorption des échantillons (*Figure V.8*).
- 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.



Figure V.8: Saturation des échantillons à l'aide d'une seringue.

V.3.2.4 Les images retenues des échantillons :

Les images des échantillons de l'argile de centre ville N°1 (C.V) et de l'argile de Freha N°1(F) retenues pour cet essai sont représentées sur les figures V.9 et V.10.

Les autres images sont dans l'ANNEXE B (Figures B.1 et B.2).

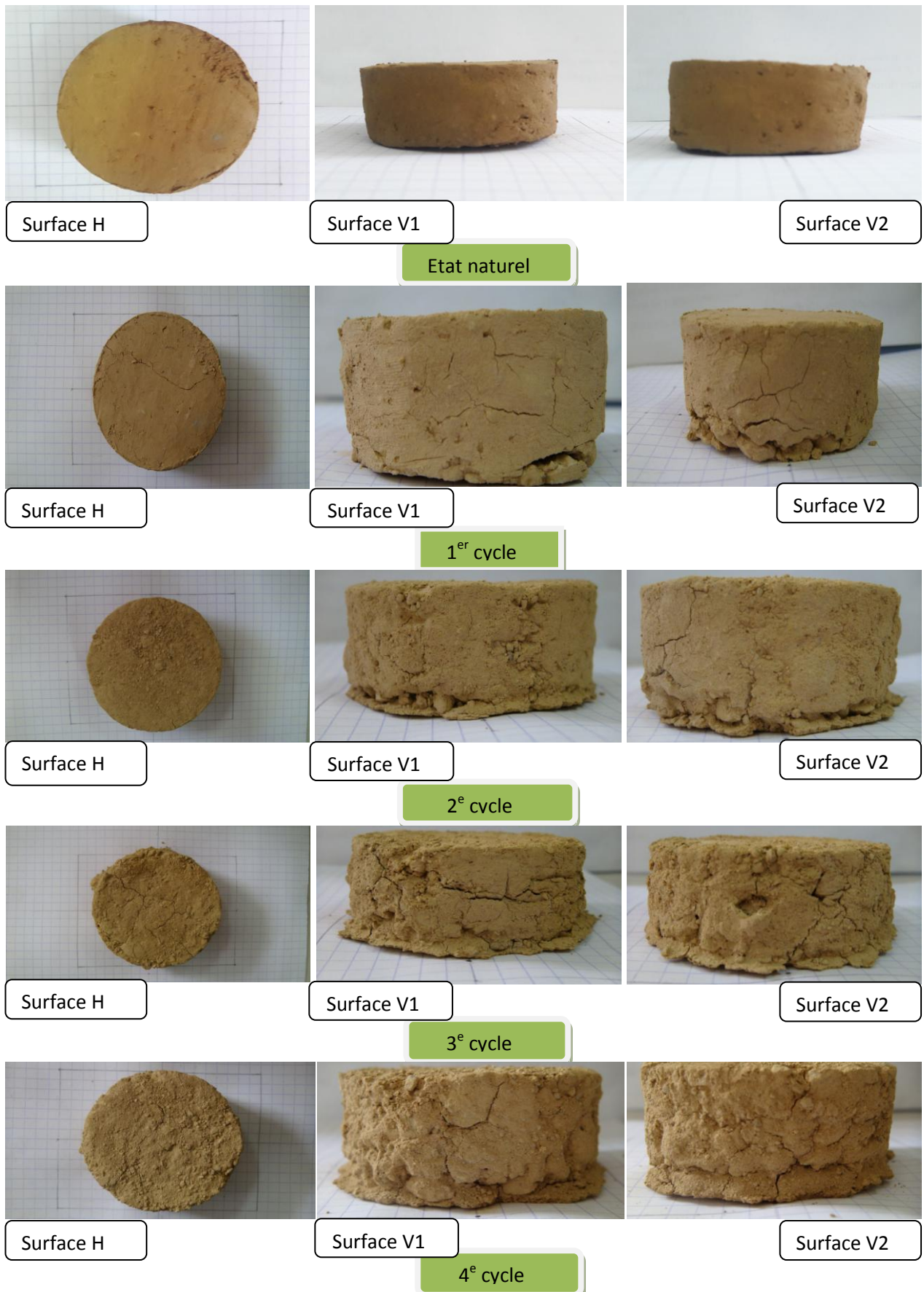


Figure V.9: Images de l'échantillon N°1 d'argile de Centre ville (C.V) pendant l'essai de Dégradabilité, à l'état naturel et après chaque cycle.

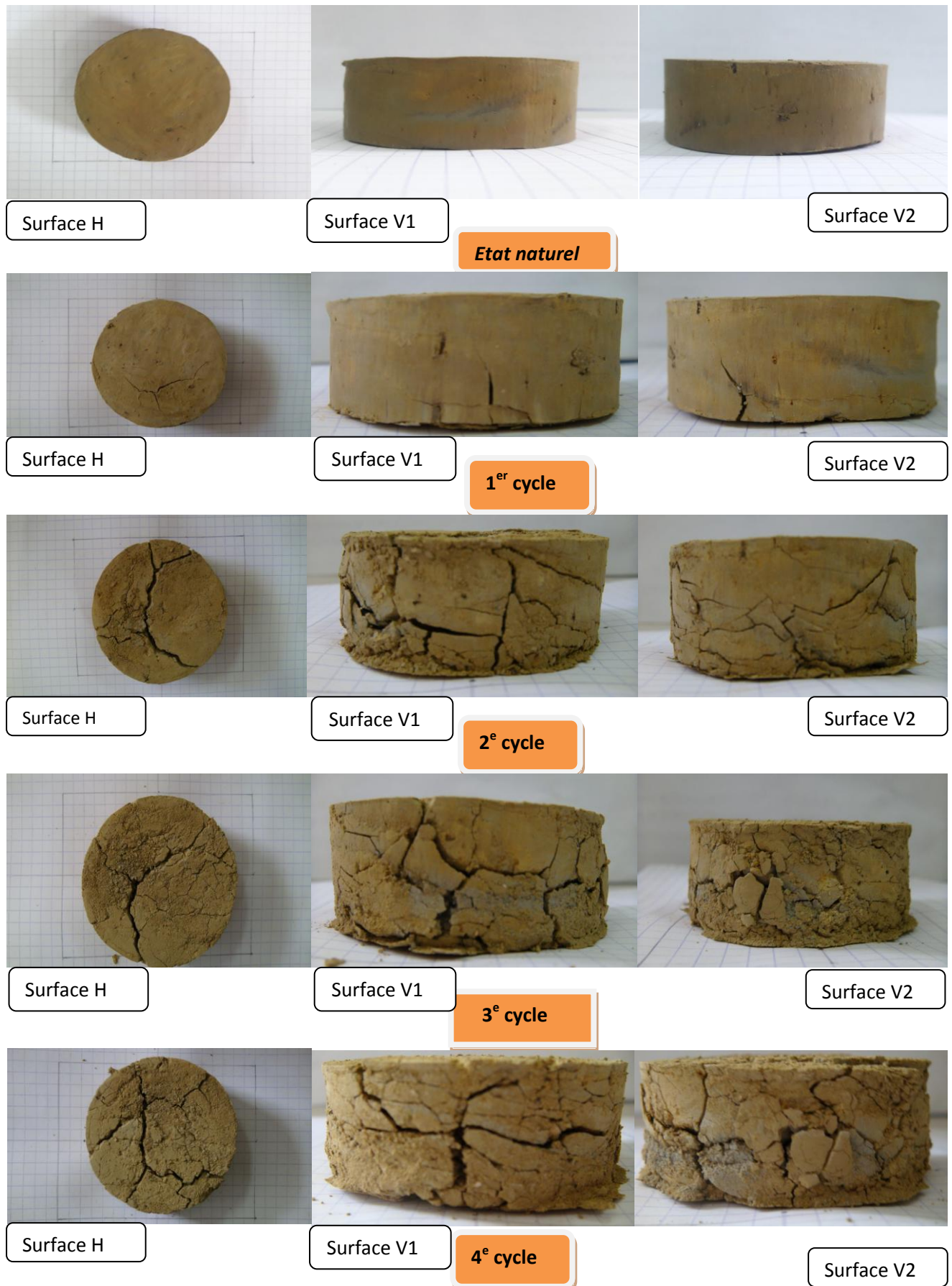


Figure V.10 : Images de l'échantillon N°1 d'argile de Fréha (F) pendant l'essai de Dérivabilité, à l'état naturel et après chaque cycle.

- **Interprétation des résultats :**

L'étude est réalisée sur des échantillons d'argile intacte prélevée de deux sites de la même wilaya (Freha et centre ville de Tizi-Ouzou). Ces échantillons sont taillés de façon à avoir un diamètre de 63 mm et une hauteur de 25,4 mm. Le principe d'essai consiste à exposer alternativement les échantillons aux cycles de séchages-émersions.

L'évolution de leur état est suivi au cours des cycles de séchage-émersion, par une prise de photos à la fin de chaque cycle. Les résultats sont donnés dans les Figures V.9, V.10, B.5 et B.6.

Les observations ont montré un gonflement volumique irréversible des échantillons N°1 et N°2 de (C.V) durant le premier et le deuxième cycle (Figures V.9 et B.5), ainsi qu'un changement de leur structure. Les fissures commencent à s'ouvrir, à partir du premier cycle, elles réapparaissent à chaque phase de séchage. Les échantillons ont subi un retrait cumulé au cours des cycles de séchage-émersions et l'élargissement des fissures est favorisé dans les plans de faiblesse préexistants et à l'intérieur des échantillons.

L'échantillon N°1 et N°2 de (F) (Fig. V.10) ont subi un retrait volumique dans le premier cycle. Dans la phase de saturation, des modifications dans la structure des échantillons sont observées dans leur partie superficielle. La phase d'humidification du deuxième cycle est caractérisée par l'ouverture des fissures, ces fissures se représentent sur les deux plans horizontal et vertical de rupture. à partir du 3ème cycle d'essai les fissures des échantillons ont subi un élargissement, et on remarque que l'échantillon N°2 s'éclate à partir de la phase d'humidification du 4^{ème} cycle, en peut dire que ce phénomène a été engendré lorsque les minéraux se transforment et déclenche le phénomène de retrait-gonflement (généralement montmorillonites et les illites qu'ont des potentiels élevés pour le gonflement).

On peut ajouter aussi que les échantillons de Freha ont un potentiel de gonflement actif et ses particules sont très argileuses provoquant des changements de leur structure et leur texture et même des grandes fissures, en plus la présence des Montmorillonites et des illites est dominante par rapport à celle des kaolinites. Pour les échantillons de Centre Ville de Tizi-Ouzou leur potentiel de gonflement est faible et en raison de présence des particules non argileuses et le type du sol qu'est un sol limoneux argileux, la présence des Kaolinites dominante par rapport aux Montmorillonites et aux illites a engendré la dureté de l'échantillon de C.V à la fin de l'essai.

V.3.2.5 Les résultats obtenus :

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

Tableau V.4 : Variation de la masse d'argile au cours de l'essai.

Site de Freha		Site de Centre ville	
Avant (état naturel)			
N°1	169,529	N°1	181,510
N°2	166,933	N°2	171,825
1 ^{er} cycle			
N°1	138,179	N°1	147,664
N°2	132,588	N°2	145,268
2 ^e cycle			
N°1	137,580	N°1	147,163
N°2	131,789	N°2	145,367
3 ^e cycle			
N°1	137,377	N°1	146,562
N°2	131,387	N°2	144,867
4 ^e cycle			
N°1	136,280	N°1	145,764
N°2	130,789	N°2	144,268

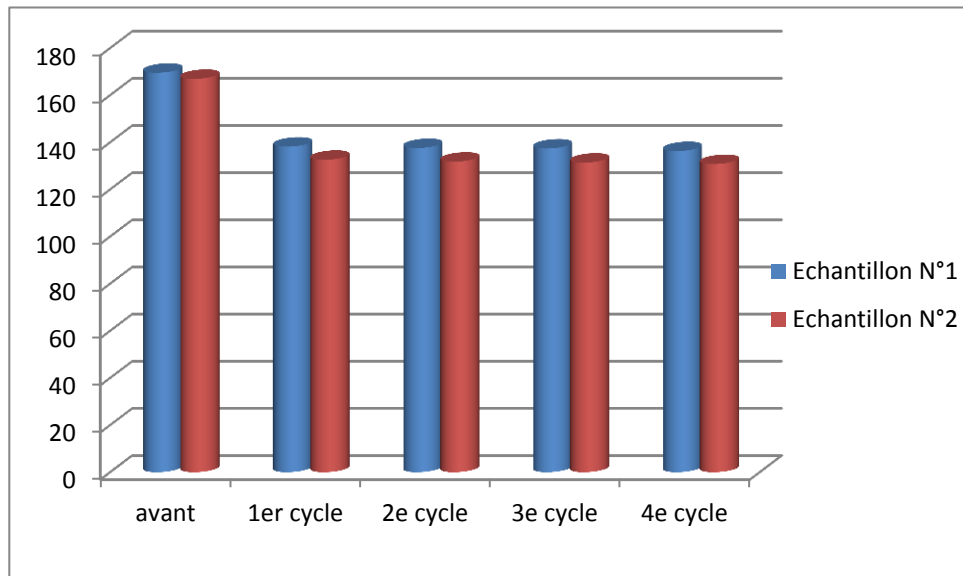


Figure V.11: Variation de la masse d'argile de Freha au cours de l'essai de Dégradabilité.

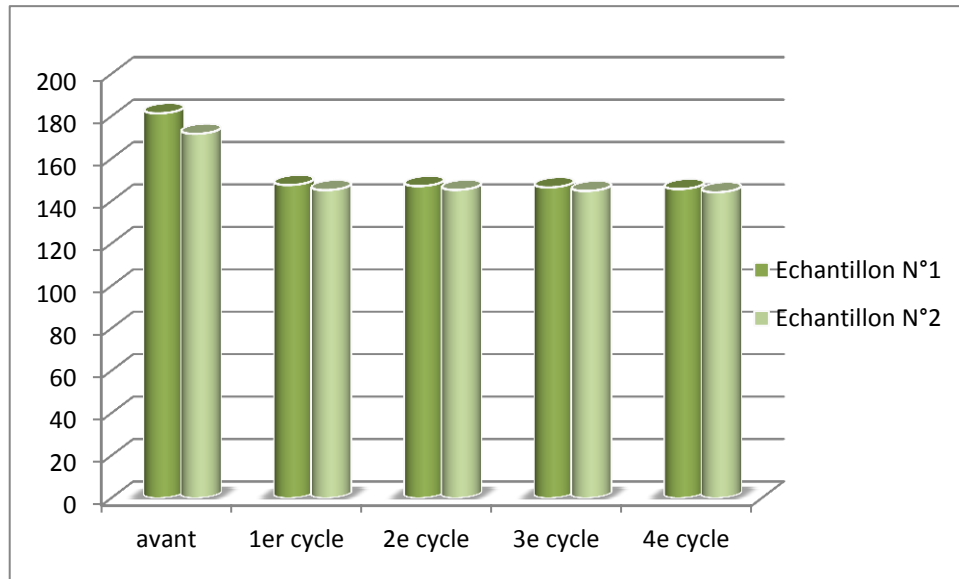


Figure V.12: Variation de la masse d'argile de Centre ville au cours d'essai de Dégradabilité.

- **Interprétation des résultats :**

Les résultats obtenus (Tableau V.4) ont montré 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 saisonnières cycliques sur les échantillons étudiés ; les effets de retrait-gonflement, les fissures et même le changement de la texture, qui ont progressé pendant le déroulement des essais. La présence des minéraux a joué un rôle très important dans le changement de comportement des échantillons.

Dans le chapitre suivant, on va confirmer les résultats obtenus dans ce chapitre avec l'étude de la variation de leurs dimensions fractales avec le logiciel MATLAB par un programme implémenté.

Chapitre VI

**CALCUL DE LA DIMENSION FRACTALE PAR LA
METHODE BOX COUNTING**

VI.1 Introduction :

La complexité de la géométrie des grains de sol (forme, sphéricité, angularité, rugosité, pores, fissures, distribution en taille et diamètre...) et leur modification durant le changement climatique jouent un rôle très important dans le comportement mécanique des matériaux, Il devient essentiel de les étudier pour les comprendre davantage. Mandelbrot a introduit une nouvelle géométrie dite « fractale ». Les objets fractals sont des figures géométriques, qui sont caractérisés essentiellement par leur irrégularité. Le sol qui est à la fois un milieu fragmentaire et poreux à structure assez complexe où une représentation fractale pourrait lui être particulièrement appropriée. Il est nécessaire alors de caractériser la texture et la forme des grains et des échantillons de sol à l'aide de la dimension fractale.

Des techniques de mesure de la dimension fractale ont été utilisées et de nombreuses méthodes ont été inventées et sont à disposition, comme la méthode de Box Counting, utilisée dans cette étude, qui prend en considération les changements de forme et de surface au niveau des échantillons du sol.

VI.2 Application de la méthode de Box Counting :

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

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

Pour calculer la dimension fractale de rugosité des sols de différents échantillons étudiés avec la méthode de Box Counting, avant et après les essais réalisés ; un appareil photographique de bonne résolution a été utilisé afin d'avoir une meilleure analyse des surfaces des sols.

Pour faciliter les calculs de DF_R , le logiciel *MATLAB R2009b* a été utilisé. En diminuant de plus en plus le nombre de pixels de la boîte de calcul, on se rapproche au fur et à mesure de la surface réelle du sol.

La méthode Box Counting est définie dans le chapitre II.

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

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

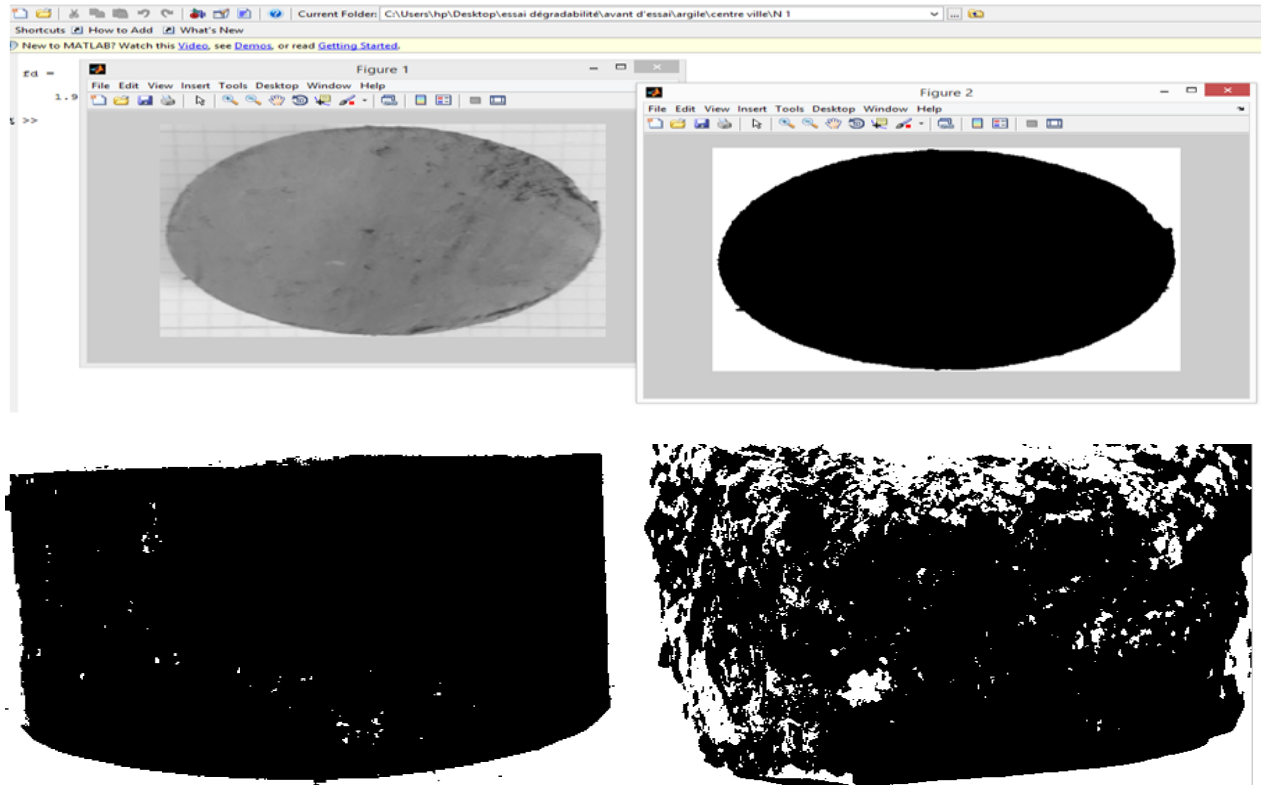


Figure VI.1 : Exemple du calcul DFR par le logiciel MATLAB R2009b

VI.3 Résultats et interprétations :

- Résultats de l'essai de Dégradabilité :

Tableau VI.1 : Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile C.V N°1.

CV N°1					
	Surface H	Surface v 1	Surface v 2	Surface v 3	Surface v 4
Avant	1,8686	1,9707	1,9537	1,9659	1,9757
Cycle 1	1,6941	1,8583	1,932	1,9404	1,925
Cycle 2	1,6443	1,8273	1,9133	1,8701	1,9168
Cycle 3	1,631	1,8212	1,828	1,8617	1,8947
Cycle 4	1,6281	1,7907	1,8208	1,8151	1,8437

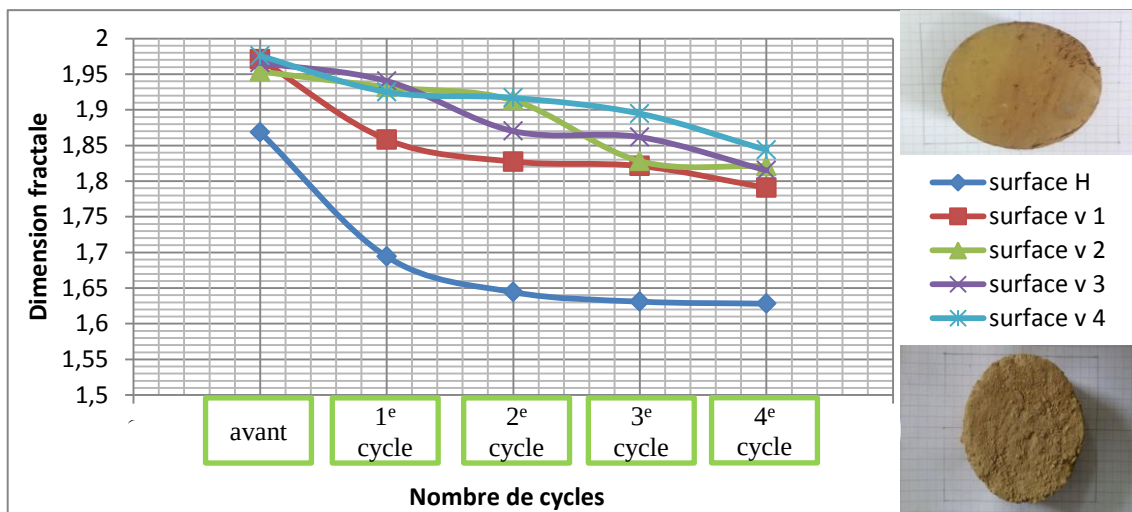


Figure VI.2 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon N°1 de C.V en fonction des cycles de Dégradabilité.

Tableau VI.2 : Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile C.V N°2.

CV N°2					
	Surface H	Surface v 1	Surface v 2	Surface v 3	Surface v 4
Avant	1,8529	1,9315	1,911	1,9067	1,9521
Cycle 1	1,8131	1,9216	1,8936	1,8858	1,9171
Cycle 2	1,7955	1,8891	1,8664	1,8624	1,8585
Cycle 3	1,7309	1,7636	1,807	1,842	1,8272
Cycle 4	1,6942	1,7505	1,7442	1,8109	1,7989

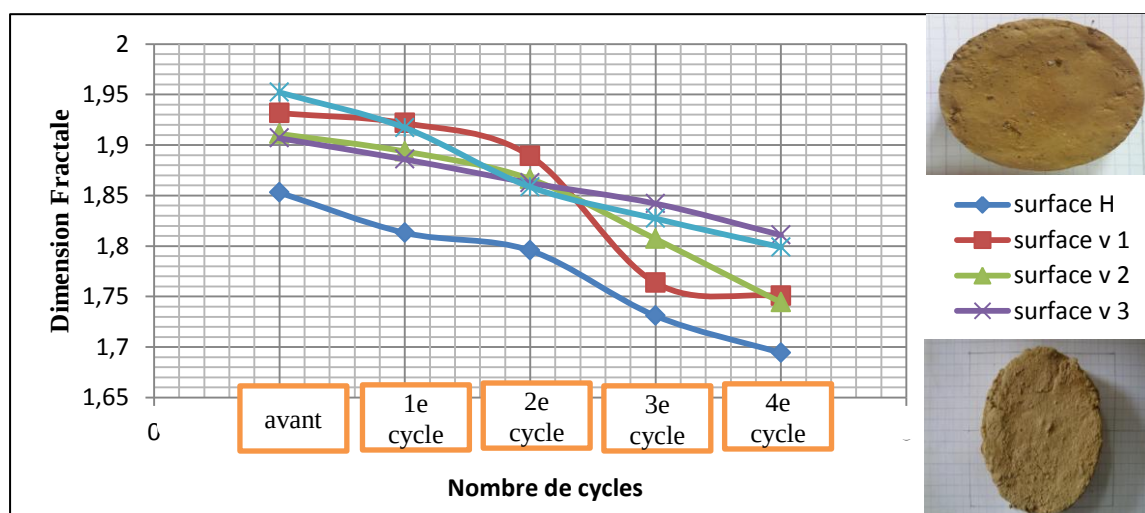
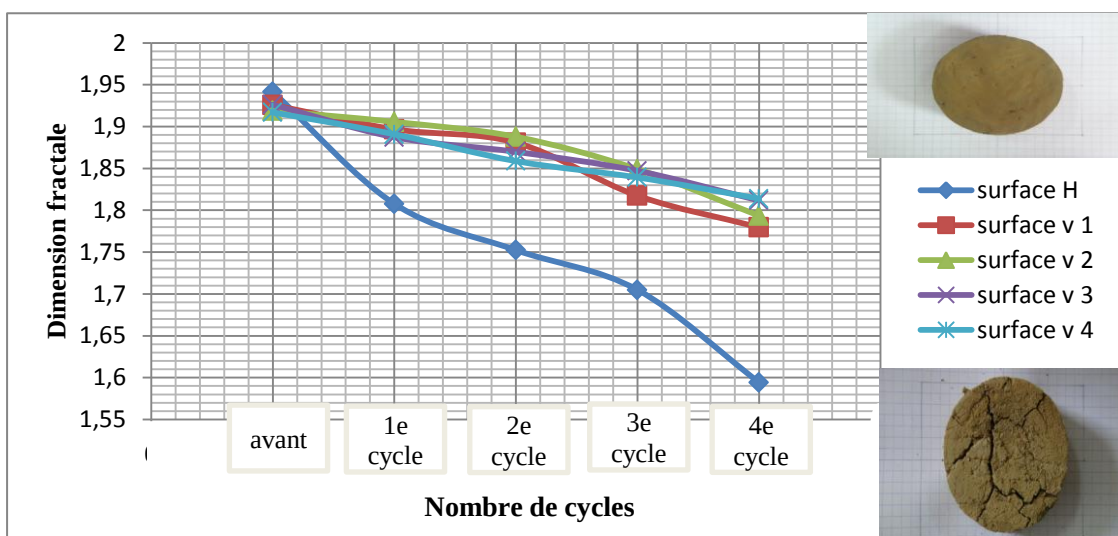


Figure VI.3 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon N°2 de C.V en fonction des cycles de Dégradabilité.

Tableau VI.3 : Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile C.V N°2.

Freha N°1					
	Surface H	Surface v 1	Surface v 2	Surface v 3	Surface v 4
Avant	1,9415	1,9259	1,919	1,9261	1,9169
Cycle 1	1,8077	1,8968	1,9056	1,8873	1,8908
Cycle 2	1,7524	1,8808	1,8878	1,8698	1,8587
Cycle 3	1,7049	1,8174	1,8491	1,8471	1,8392
Cycle 4	1,5943	1,7796	1,7935	1,8117	1,8139

**Figure VI.4 :** Variation de la dimension fractale de l'échantillon N°1 de F en fonction des cycles de Dégradabilité.**Tableau VI.4 :** Variation de la dimension fractale en fonction les cycles pour l'argile C.V N°2.

Freha N°2					
	Surface H	Surface v 1	Surface v 2	Surface v 3	Surface v 4
Avant	1,9739	1,8236	1,8549	1,8408	1,9045
Cycle 1	1,923	1,7691	1,7973	1,8361	1,8797
Cycle 2	1,8474	1,7131	1,7436	1,8261	1,8201
Cycle 3	1,6466	1,6821	1,7162	1,8016	1,7293
Cycle 4	/	/	/	/	/

Remarque :

Pour le quatrième cycle, l'échantillon de Freha a été fractionné avant la fin de cycle, En effet, sa dimension fractale n'a pas été calculée.

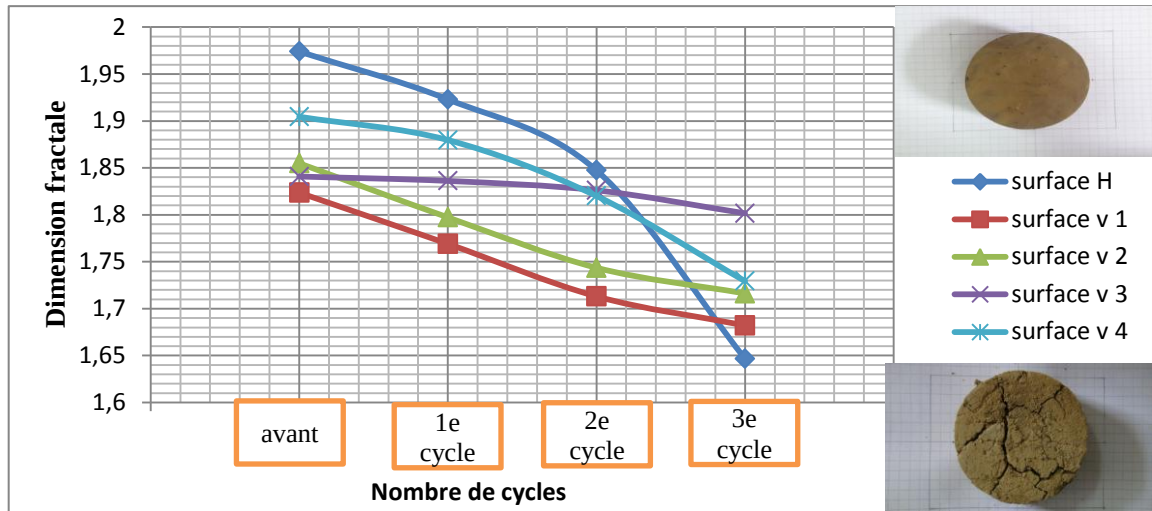


Figure VI.5 : Variation de la dimension fractale en fonction des cycles climatiques de l'essai Dégradabilité de l'échantillon N°2 de Fr.

- Résultats de l'essai gel-dégel :

Tableau VI.5 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile F. N°1.

Freha N°1				
Etapas de l'essai		Surface H	Surface v 1	Surface v 2
1	Avant (naturel)	1,9854	1,8520	1,8026
2	Après l'étuve	1,9238	1,8167	1,7720
3	10 ^{ème} cycle (à 48h)	1,7549	1,7384	1,7012

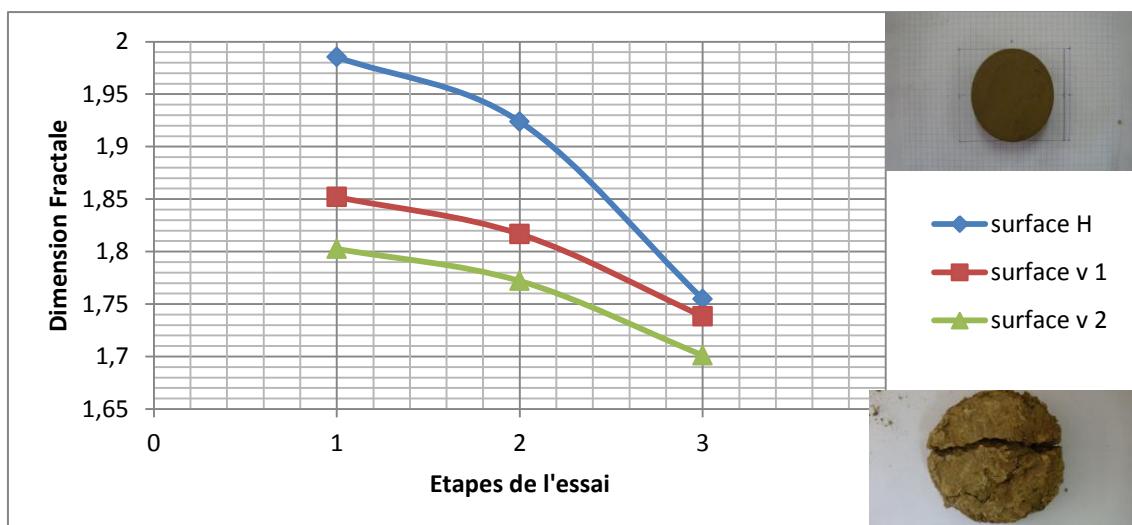
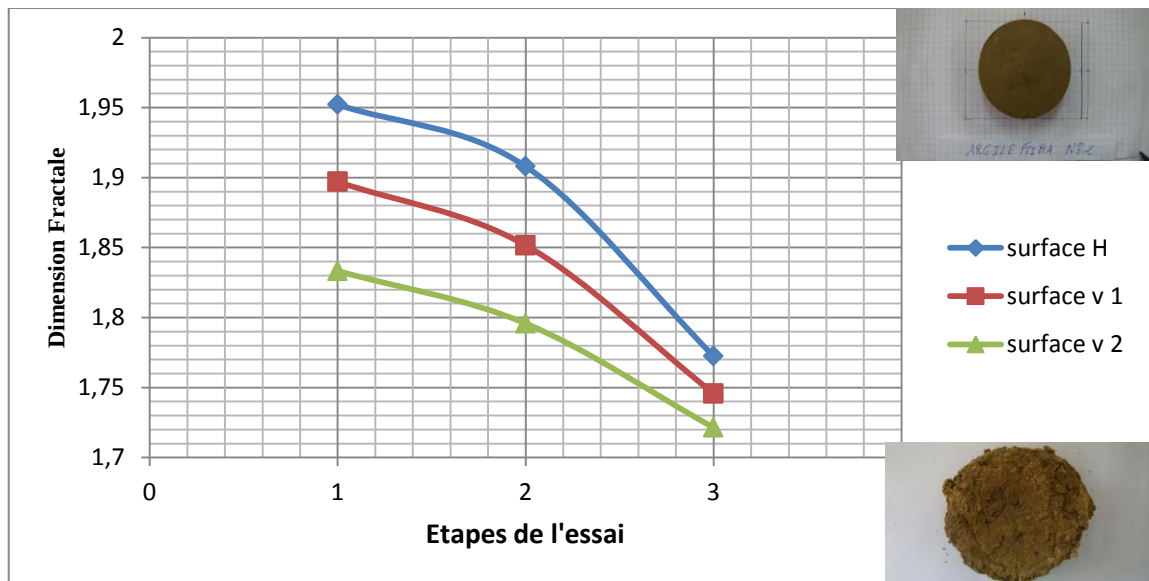


Figure VI.6: Variation de la dimension fractale en fonction des Etapes de l'essai pour l'échantillon N°1 de F.

Tableau VI.6 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile F. N°2.

Freha N°2				
Etapas de l'essai		Surface H	Surface v 1	Surface v 2
1	Avant (naturel)	1,9521	1,8970	1,8333
2	Après l'étuve	1,9080	1,8516	1,7958
3	10 ^{ème} cycle (à 48h)	1,7724	1,7458	1,7214

**Figure VI.7:** Variation de la dimension fractale en fonction des Etapes de l'essai pour l'échantillon N°2 de F.**Tableau VI.7:** Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile F.N N°3.

Freha N°3				
Etapas de l'essai		Surface H	Surface v 1	Surface v 2
1	Avant (naturel)	1,9321	1,8897	1,8548
2	Après l'étuve	1,8939	1,8538	1,8143
3	10 ^{ème} cycle (à 48h)	1,7725	1,7369	1,7025

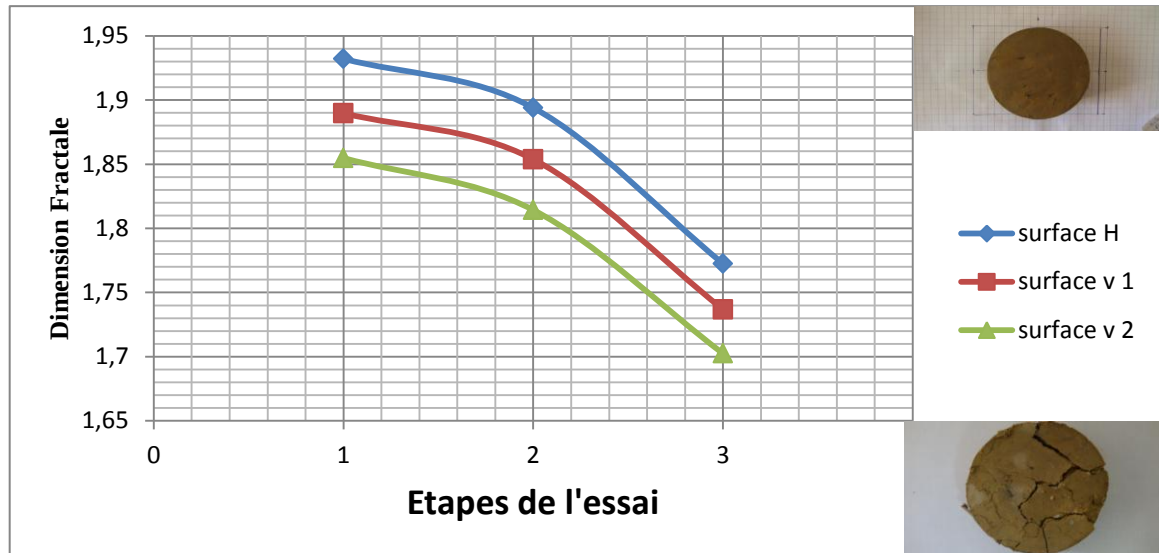


Figure VI.8: Variation de la dimension fractale en fonction des Etapes de l'essai pour l'échantillon N°3 de F.N.

Tableau VI.8: Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile C.V, N°1.

C.V, N°1				
Etapas de l'essai		Surface H	Surface v 1	Surface v 2
1	Avant (naturel)	1,9733	1,8855	1,8587
2	Après l'étuve	1,9482	1,8453	1,8035
3	10 ^{ème} cycle (à 48h)	1,8232	1,7555	1,7244

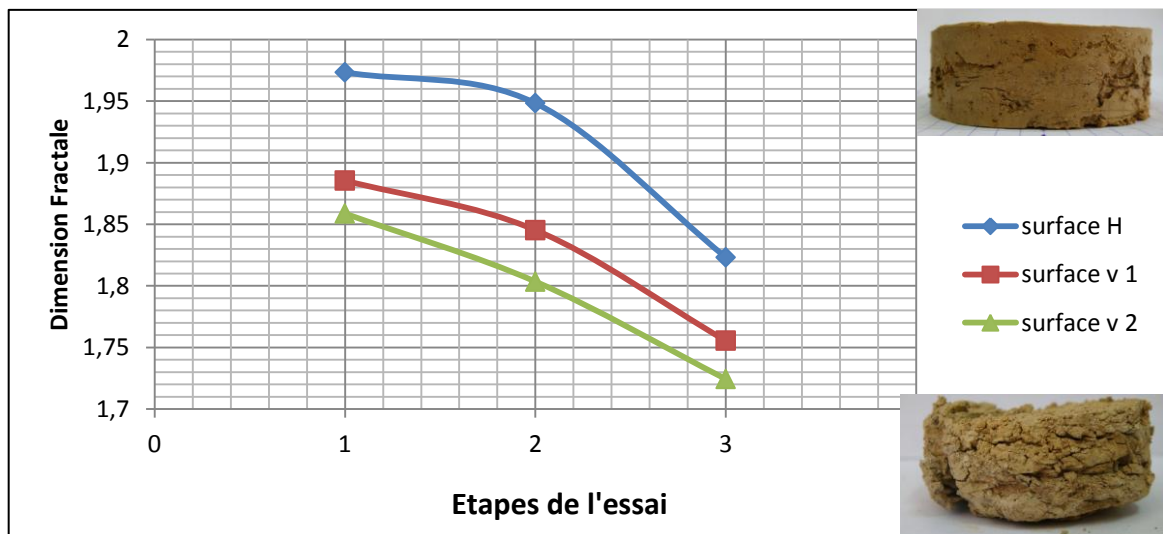
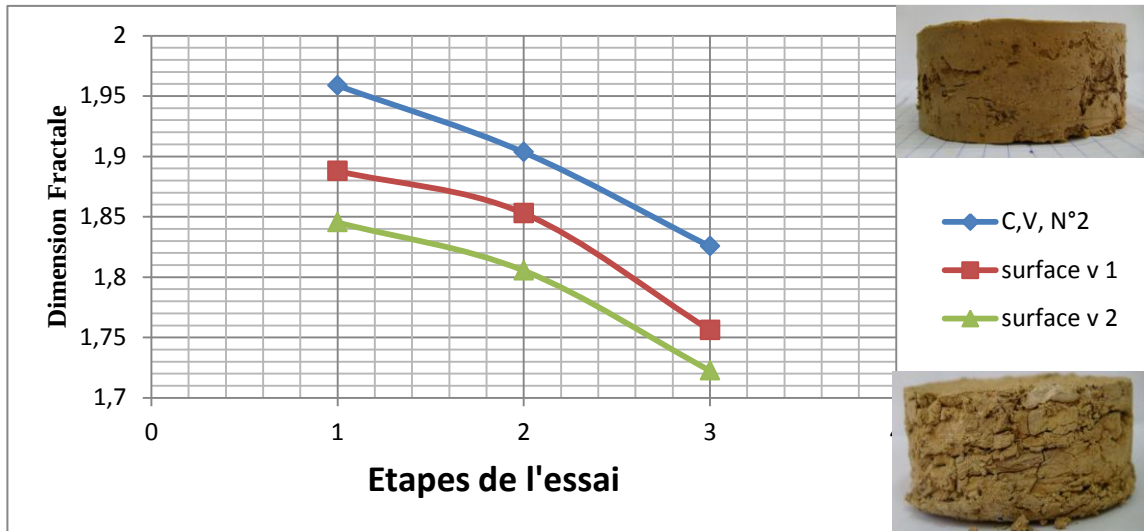


Figure VI.9: Variation de la dimension fractale en fonction des Etapes de l'essai pour l'échantillon N°1 de C.V.

Tableau VI.9 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile C.V, N°2.

C.V, N°2				
Etapas de l'essai		Surface H	Surface v 1	Surface v 2
1	Avant (naturel)	1,9587	1,8879	1,8453
2	Après l'étuve	1,9034	1,8528	1,8054
3	10 ^{ème} cycle (à 48h)	1,8254	1,7561	1,7225

**Figure VI.10**: Variation de la dimension fractale en fonction des Etapes de l'essai de pour l'échantillon N°2 de C.V.**Tableau VI.10** : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile C.V.N N°3.

C.V.N, N°3				
Etapas de l'essai		Surface H	Surface v 1	Surface v 2
1	Avant (naturel)	1,9799	1,8931	1,8579
2	Après l'étuve	1,9487	1,8601	1,8098
3	10 ^{ème} cycle (à 48h)	1,7793	1,7649	1,7137

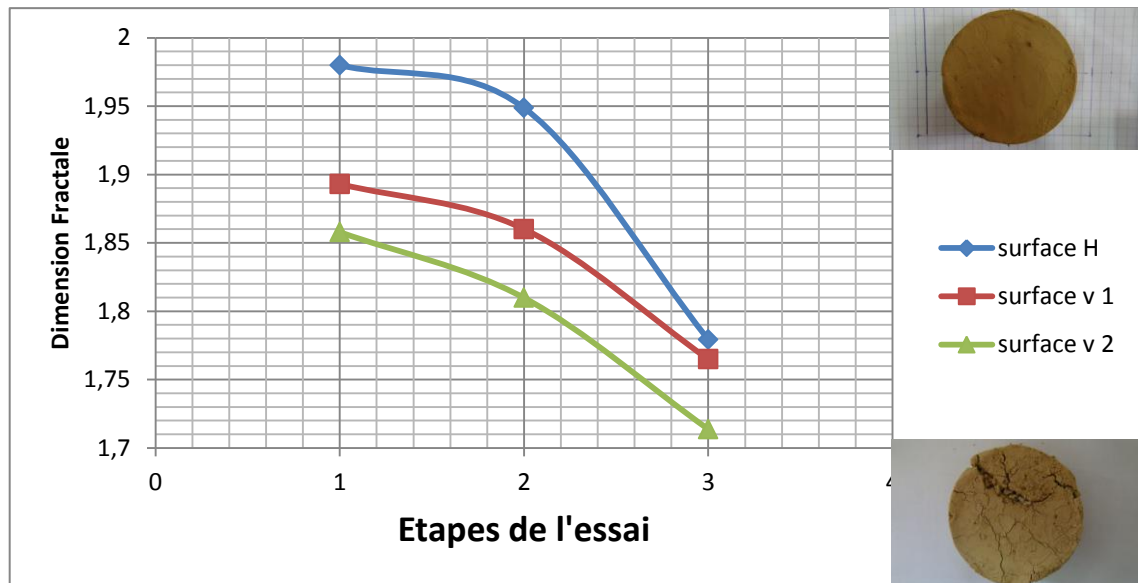


Figure VI.11: Variation de la dimension fractale en fonction des Etapes de l'essai pour l'échantillon N°3 de C.V.N.

- **Interprétation des résultats :**

Les figures présentées ci-dessus ne varient pas linéairement ; elles présentent des pentes différentes, qui varient selon le mode et Etapes de l'essai, la valeur maximale varie d'un échantillon à un autre, et généralement on trouve la valeur minimale est calculée pour les échantillons du sol de Freha, parce que son potentiel de gonflement est très élevé.

Les figures (VI.2, ...VI.11) montrent que la valeur de DF_R diminue avec l'augmentation du nombre de cycles appliqués, durant les deux essais réalisés. À la fin de chaque essai, qui se termine par un séchage, la rugosité augmente par rapport à son état initial ; les fissures et le changement d'état de la texture sont une cause de cette augmentation et de la diminution de la DF_R calculée.

Il a été remarqué aussi que la façon de diminution de la DF_R est différente d'un sol à un autre durant les deux essais; pour l'échantillon de Freha la diminution de DF_R est subitement rapide, par contre pour l'échantillon de Centre ville la diminution est lente.

Ces diminutions de DF_R peuvent s'expliquées par le changement de la texture, l'augmentation de la rugosité des échantillons et même la propagation de leurs fissures, qui ont un rôle principal dans la diminution de DF_R , sans oublier la présence des minéraux, qui ont une sensibilité à l'eau et le potentiel de gonflement des sols qui est élève (pour le sol de Freha).

VI.4 Conclusion :

La dimension fractale est un paramètre qui permet une meilleure compréhension des changements induits par les différentes sollicitations climatiques, Elle est affectée par plusieurs paramètres, qui influent significativement sur le mode de rupture des sols, lequel conduit à la diminution DF_R .

Les résultats du calcul de la dimension fractale obtenus avec la méthode de Box Counting confirment les résultats des essais expérimentaux réalisés et présentés dans le chapitre précédent, ce que prouve son efficacité.

Le calcul de la dimension fractale, des échantillons par la technique d'analyse d'image, semble être véritablement un outil puissant pour comparer les caractéristiques intrinsèques des sols liées à leur fragmentation. Les algorithmes donnent donc une estimation satisfaisante de la dimension fractale.

CONCLUSION GENERALE

Dans cette étude, on a pu explorer la relation entre le climat et le sol et comprendre mieux les influences climatiques sur le sol étudié, on a pu aussi faire une comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats analytiques du calcul de la dimension fractale par le logiciel MATLEB.

Les essais ont été réalisés sur des échantillons intacts de nature argileuse, prélevés de deux sites situés à la wilaya de Tizi-Ouzou ; un à Freha et l'autre au Centre ville de la wilaya.

De cette étude on peut constater que :

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

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

Annexe A

Les images prise pendant la réalisation des essais

L'analyse granulométrique par la sédimentation [NF P 94-056]



Essai d'ALHERBERG



Annexe B

*Représentation des images des échantillons prises au cours des
essais*

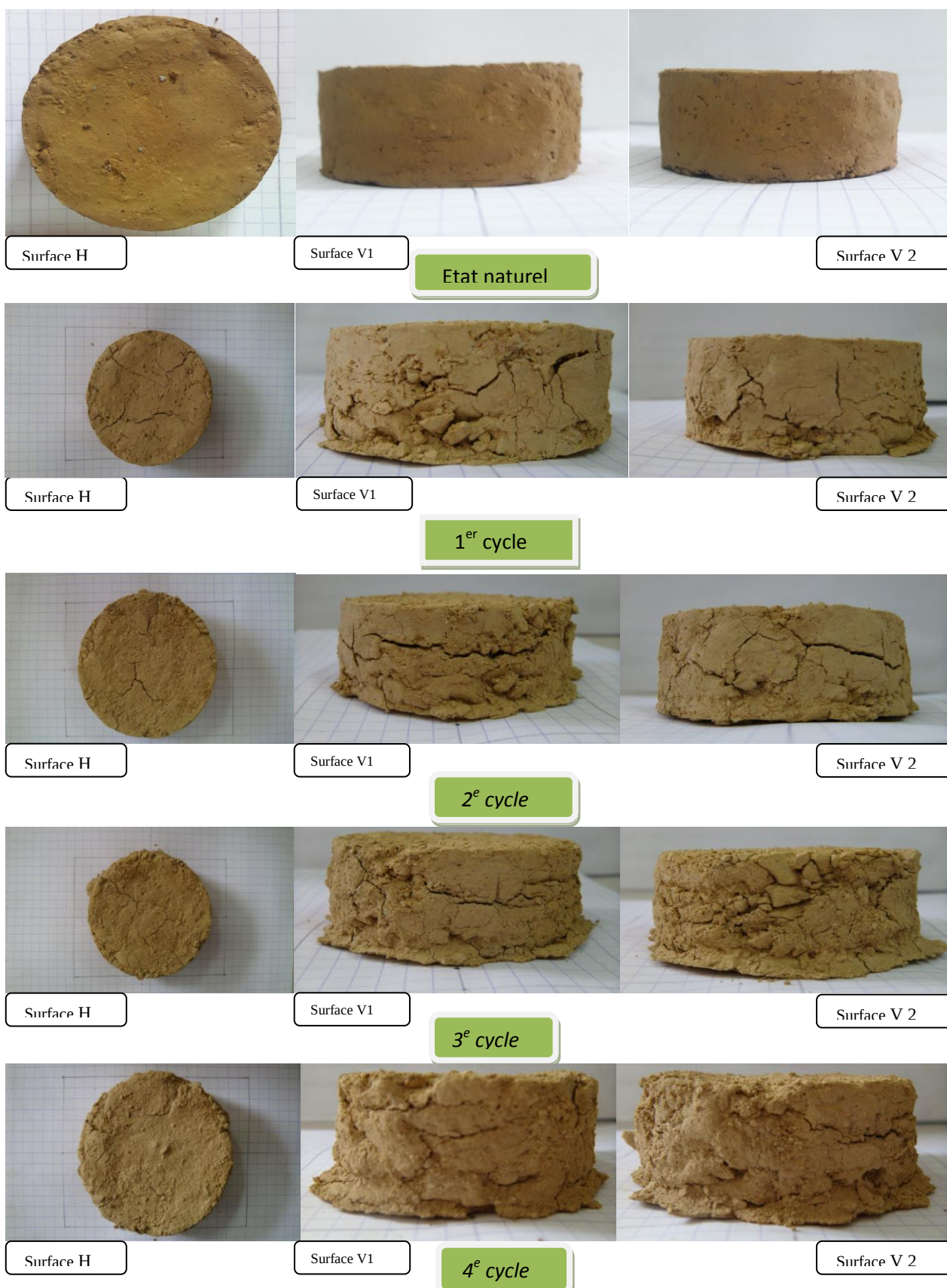


Figure B.1 : les images d'échantillon N°2 d'argile Centre ville (C.V), après chaque cycle de l'essai de Dégradabilité

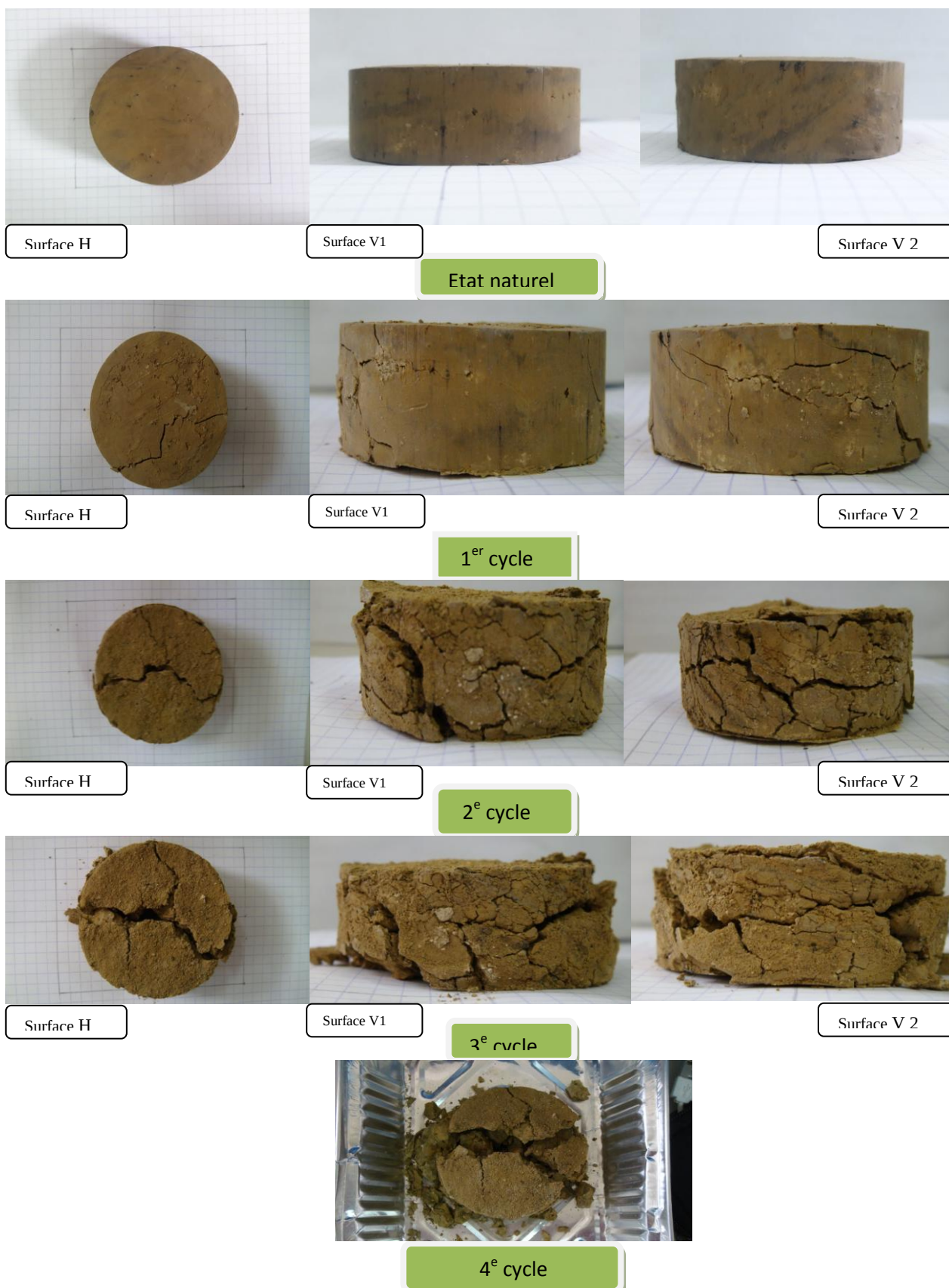


Figure B.2 : les images d'échantillon N°1 d'argile Fréha (F), après chaque cycle de l'essai de Dégradabilité

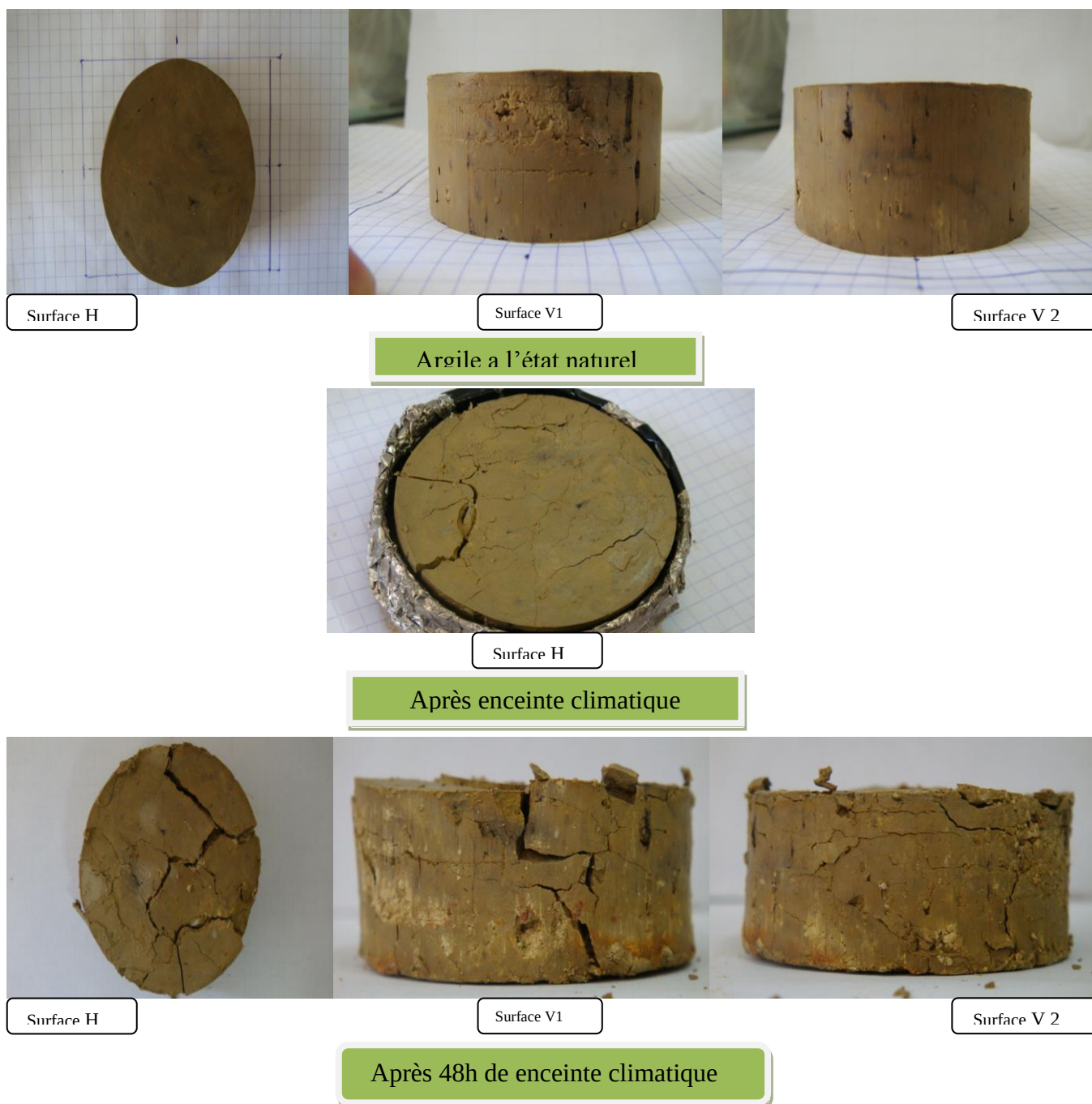


Figure B.3 : les images d'échantillon d'argile (F.N) à état naturel, après étuve et après enceinte climatique.



Surface H



Surface V1



Surface V 2

Argile à l'état naturel



Surface H



Surface V1



Surface V 2

Après l'étuve



Juste après 10 cycles



Après 10 cycles (après 48h)

Figure B.4 : les images d'échantillon N°2 d'argile Fréha(F) à état naturel, après étuve et après enceinte climatique.



Surface H

Surface V1

Surface V 2

Argile à l'état naturel



Surface H

Après l'étuve

Surface V 2



Juste après 10 cycles



Surface H

Surface V1

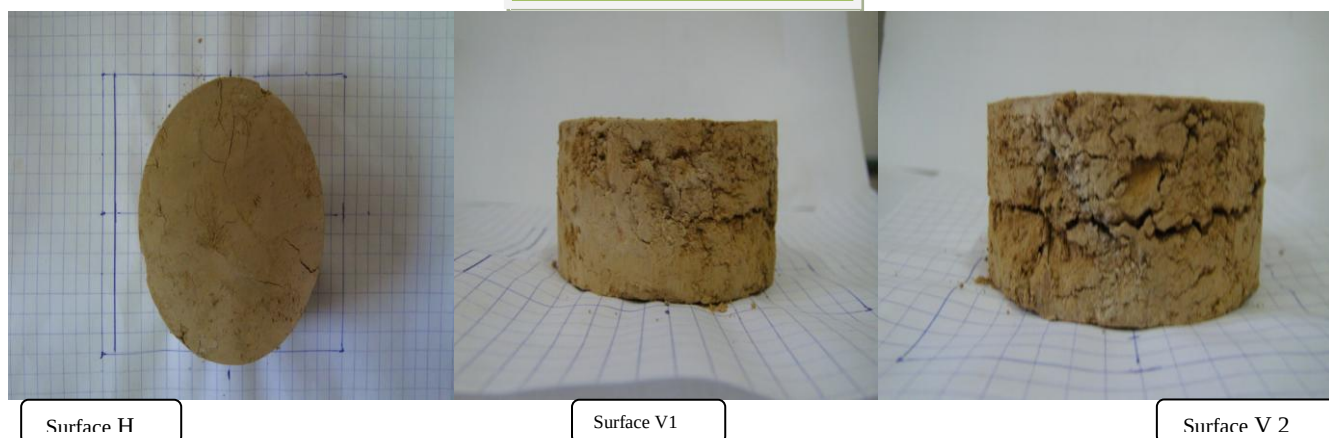
Surface V 2

Après 10 cycles (après 48h)

Figure B.5 : les images d'échantillon N°1 d'argile Centre ville(C.V), à état naturel, après étuve et après enceinte climatique.



Argile à l'état naturel



Après l'étuve



Juste après 10 cycles



Figure B.6 : les images d'échantillon N°2 d'argile Centre ville(C.V), à état naturel, après étuve et après enceinte climatique.

Référence

- **ABOUSHOOK. M (1984)** « Contribution à l'étude quantitative du gonflement des sols argileux : application à des sols intacts de la zone urbains du Caire. » Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Ecole Nationale Supérieure de Géologie, Nancy, France.
- **ACHIR. M (2011)** « Caractérisation du phénomène d'écrasement par l'étude de la dimension fractale des grains. » Mémoire de magister en génie civil option Géotechnique et Environnement, LGEA, Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- **AFNOR** : Norme française sol : reconnaissance et essais.
 - **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.

- **AISSA MAMOUNE. S. M (2009)** « Caractérisation et modélisation des argiles de la région de Tlemcen en utilisant les réseaux de neurones.» Thèse de doctorat, université de Abou Bekr Belkaid. Tlemcen, Algérie.
- **AUBOUIN.J, BROUSSE.R, LEHMAN.J.P, (1968)** « Précis de géologie. » 1^{er} cycle et licence. Tome I : pétrologie. Dunod.
- **AUDIGUIER-MARCEL. M (1979)** « Contribution à l'étude du comportement de l'eau dans les sols en fonction de leur texture. » Mémoire de DEA, Centre de Géologie d'ingénieur, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris,
- **AZZOUZ. F.Z (2006)** « Contribution à l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de Tlemcen. » Mémoire de magister, université d'Abou Bekr Belkaid. Tlemcen, Algérie.
- **BAHAR. R et KENAI. S (2002)** « Désordres dus à l'infiltration des eaux : cas de la ville d'El-Affroun. » Rev Fr de Géot 101: 91-103. Bahar R. & Kenai S. (2008). Etude de quelques problèmes de fondations et d'ouvrages de soutènement dans les sols argileux. Actes du Symp Int Sécheresse et Constructions. Paris 2003.
- **BECKER. M (1982)** « Influence relative du climat et du sol sur les potentialités forestières en moyenne montagne. » I.N.R.A., Laboratoire de phyto-écologie forestière centre de recherches forestières de Nancy, Champenoux.
- **BEKKOUCHE. A DJEDID A, BOUSMAHA N. (1997)** « Construire sur les sols expansifs. » Séminaire national de génie civil, M'Sila, Algérie.
- **BEKKOUCHE. A DJEDID A, AISSA MAMOUNE S.M. (2001)** « Identification des sols expansifs. » Séminaire national de génie civil 2001, Sidi Bel-Abbes, Algérie.
- **BELCASTRO. P (2009)** «Mandelbulb: Mandelbrot en 3D. » Publié dans la rubrique AILLEURS.
- **BOUCLY-NOROTTE.V (1991)** «Evolution des caractéristiques mécaniques et de la perméabilité de matériaux argileux sous l'effet de sollicitations thermiques, Minéralogie.» Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Français.
- **BOUZEBODJA. A (2016)** «L'influence de la dimension fractale en 3D sur les caractéristiques mécaniques des matériaux granulaires. »Thèse de Doctorat en génie civil option Géotechnique et Environnement, LGEA, Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- **CAILLERE. S, HENIN. S (1959)** « La classification des argiles. » XX Congr. Geol. Internat. Mexico (1956).

- **CAILLERE. S, HENIN. S (1963)** « Nouvelles études sur la synthèse des minéraux argileux a partir de gels. » Institut National Agronomique, Paris, France.
- **CASAGRANDE. A (1948)** « Classification and identification of soils. » Transaction, A.S.C.E., vol 113.
- **CHAUDHURI, B.B, SARKAR, N, KUNDU, P, (1993)** « Improved fractal geometry based texture segmentation technique. » IEE Proceedings-E.
- **CHEHEB.F (2016)** « Etude 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.
- **COQUET.Y (1995)** « Mesures in situ des propriétés de retrait de deux sols tropicaux peu gonflants ». Etude et Gestion des Sols 2.
- **COLLINS.K, MC COWN.A (1974)** « The Form and Function of Micro fabric Features In A Variety Of Natural Soils» Geotechnique 24, n°2.
- **CUI.Y.J (1993)** «Etude du comportement d'un limon compacté non saturé et de sa modélisation dans un cadre élastoplastique », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- **DAKSHANAMURTHY. V & RAMAN. V (1973)** « A simple method of identifying an expansive soil. » Soils and Foundations, 13 :1, p 97-104
- **DELAGE. P et CUI. Y. J (2001)** « L'eau dans les sols non saturés. » Extrait de la collection: Techniques de l'Ingénieur C301.
- **DJONKAMLA.Y,(2010)**« CARACTÉRISATION ET SIMULATION NUMÉRIQUE DU COMPORTEMENT VOLUMÉTRIQUE DE SOLS ARGILEUX GONFLANTS DE N'DJAMÉNA » Mémoire dans le cadre d'obtention du grade de Maître ès Sciences (M. SC) en Génie Civil, Faculté des études supérieures de l'Université Laval.
- **DONALD.A.M, HE.C, ROYALL.C.P, SFERRAZZA.M, STELMASHENKO .N.A., THIEL.B.L (2000)** «Applications of environmental scanning electron microscopy to colloidal aggregation and film formation ». Physicochemical and Engineering Aspects.
- **DUBUC. B, QUINIOU. J.F, ROQUES-CARMES. C, TRICOT. C et ZUCKER. S.W (1989)** « Evaluating the fractal dimension of profiles. » Phys. Rev. A.
- **EFTEKHARI. A (2004)** « Fractal Dimension of Electrochemical Reactions. »

Journal of the Electrochemical Society, vol. 151, n^o 9.

- **HUANG. G.H et ZHAN. W.H (2002)** « Fractal property of soil particle size distribution and its application. » *Acte Pedologica Sinica*, 39.
- **HYSLIP. J et VALLEJO. L (1997)** « Fractal analysis of the roughness and size distribution of granulaire material. » *Engineering Geology*, vol 48, 3-4.
- **FALCONER. K (1990)** « Fractal geometry: Mathematical foundations and applications. » John Wiley & Sons, England.
- **FALCONER. K (2003)** «Fractal geometry: Mathematical foundations and applications. » John Wiley and Sons, England.
- **FARID. S (2012)** «Réhabilitation thermique d'un local dans une zone aride. » Mémoire de magister, Département de génie mécanique, Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- **FEDER. J (1988)** «FRACTALS. », Plenum Press, New York.
- **FULOP. A, VICSEK.T (1989)** «Determination of fractal dimension for geometrical multiracial. », *Physical Review A*.
- **GENS.A, ALONSO.E.E (1992)** «A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays». *Revue canadienne de géotechnique* 29.
- **JIN, X.C, HONG. S.H, JAYASOORIAH (1995)** «A practical method for estimating fractal dimension. », *Pattern Recognition Letters*.
- **JIN. X.C, HONG. S.H ET JAYASOORIAH (1995)** « A practical method for estimating fractal dimensions. » *Pattern Recognition Letters*, vol. 16.
- **JOSIANE. L (2006)** « La géométrie fractale. » Mémoire comme exigence partielle de la maîtrise en Mathématiques et Informatique Appliquées Université du QUEBEC A TROIS-RIVIÈRES.
- **KELLER. J, KELLER. M, CROWNOVER. R.M et CHEN. R.Y (1987)** « Characteristics of Natural Scenes Related to the Fractal Dimension. » *IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence*, Vol. PAMI-9, NO. 5.
- **KELLER. J, CHEN. S et CROWNOVER. R (1989)** « Texture description and segmentation through fractal geometry. » *Computer Vision Graphics and Image Processing*, vol. 45, pp.150-166.
- **LARKE.K. C (1986)** « Computation of the Fractal Dimension of Topographical Surfaces Using the Triangular Prism Surface Area Method. » *Computer. Geosciences*.

- **LAMBE.A.T.W, WHITMAN.R.V (1969)** «Soil Mechanics, series in soil engineering». New York.
- **LEHAMEL. M (2011)** « Segmentation d'images texturées à partir des attributs fractals. » Mémoire de magister en Génie Electrique et Informatique Département Automatique option Traitement d'image et reconnaissance de formes, Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- **LÊ Thị Ngọc Hà (2009)** «comportement des sols fins ».
- **MABROUKI. D (2013)** « Etude de l'influence des paramètres climatiques sur la température du sol (application au site de Biskra). » Mémoire de Master en Génie Mécanique option Systèmes Energétique Et Développement Durable, Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- **MADJNOUN. A (2014)** « Analyse, caractérisation, prévision et modélisation du comportement des argiles gonflantes. » Thèse de Doctorat en génie civil option Géotechnique et Environnement, LGEA, Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- **MANDELBROT. B (1967)** « How long is the coastline of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. » Science, 155: 636 – 638.
- **MANDELBROT. B.B et VAN NESS. J.W (1968)** « Fractional Brownian motion, fractional noise and applications. » SIAM Review, vol. 10. pp. 422-437.
- **MANDELBROT. B.B (1975)** « Les objets fractals, forme, hasard et dimension. » 190 pp. Editions Flammarion, Paris.
- **MANDELBROT. B (1982)** « The Fractal Geometry of Nature. » New York: Freeman.
- **MANDELBROT. B (1983)** « The fractal geometry of nature. » Edition W.II. Freeman, San Francisco, 461 pp.
- **MITCHELL.J.K (1976)** «Fundamentals of soil Behaviour». Wiley
- **MITCHELL.J.K (1993)** «Fundamentals of soil Behaviour. » 2ème edition, New York.
- **OUAZ. O (2014)** « Etude de la dégradation des grains sous les conditions climatiques : calcul de leur dimension fractale. » Mémoire de master en génie civil option Géotechnique et Environnement, LGEA, Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- **OUTAYEB.S (2016)** « Evaluation de la dégradation chimique des grains de schiste

à l'aide de la notion de la dimension fractale. » Mémoire de Master académique en génie civil option Géotechnique et Environnement, LGEA, Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

- **PUISSANT.J (2015)** « Effets des changements climatiques sur la dynamique de décomposition microbienne du carbone organique du sol en prairie subalpine calcaire. » Thèse de Doctorat en Biodiversité et Ecologie, Université Grenoble Alpes.
- **SECRIERU.C (2009)** « applications de l'analyse fractale dans le cas de ruptures dynamiques. » Thèse de Doctorat de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Spécialité "Mécanique et matériaux" en France.
- **SOILLE. P et RIVEST. J-F (1996)** « On the validity of fractal dimension measurements in image analysis. » Journal of Visual Communication and Image Representation, vol. 7, p. 217–229.
- **SUN. W, XU. G, GONG. P et LIANG. S (2006)** « Fractal analysis of remotely sensed images: A review of methods and applications » International Journal of Remote Sensing, vol. 27, no. 22, pp. 4963- 4990.
- **SERGEYRV.Y.M, OSIPOV.V.I, SOKOLOV.N, GRABOWSKA-OLZEWSKA (1978)** «types of microstructure of clayey soils.proc. 3rd inter. cong. inter. assoc. of engineer. Geology, 1, section II.
- **TESSIER. D (1984)** « Étude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux: hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation »Thèse de doctorat, Institut national de la recherche agronomique, France.
- **TOURET.R.O (1988)** «Structures des Argiles Hydratées, Thermodynamique de la Déshydratation et de la Compaction des Smectites ». Strasbourg, Université Louis Pasteur.
- **VAN OLPHEN.H, KAROL, MYSELS.J** «Physical chemistry: enriching topics from colloid and surface science: a resources book for students and teachers of undergraduate courses in physical chemistry »International Union of Pure and Applied Chemistry. Commission I.6: Colloid and Surface Chemistry.
- **VINCENT.M, COJEAN.R, FLEUREAU.J.M, CUI.Y.J et al. (2009).** Rapport de synthèse final du projet ARGIC (Analyse du retrait/gonflement et de ses Incidences sur les Constructions) R Projet ANR-05-PRGCU- 005. Rapport BRGM/RP- 57011-FR en partenariat entre le Centre de Géosciences, le BRGM, le LMSSMat, le

CERMES, Fondasol, l'INERIS, le LAEGO, l'INRA, le LGCIE, le LCPC, Météo-France, le GHYMAC et l'Université de Poitiers.

- **WAKIM.J (2005)** «Influence des salutations aqueuses sur le comportement mécanique des roches argileuses » Thèse, Ecole Nationale supérieure des mines des paris. France.
- **WINDAL.T (2001)** « Etude en laboratoire du gonflement des sols : Mise au point d'un oedomètre flexible et étude de gonflement tridimensionnel », Thèse de doctorat, Université de Lille.
- **YAHIA-AISSA. M (1999)** « Comportement hydromécanique d'une argile gonflante fortement compactée. » Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, CERMES, Paris.
- **YEZLI. S (2011)** « influence de la dimension fractale sur les caractéristiques mécaniques des matériaux. » Mémoire de magister en génie civil option Géotechnique et Environnement, LGEA, Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Les sites d'internet utilisés :

- http://www.andi.dz/PDF/monographies/Tizi_ouzou.pdf
- http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers15-04/16383.pdf
- http://laurie.bougeois.free.fr/cours/Mineraux_argileux.pdf
- <https://www.scribd.com/document/273429801/Gonflement-Libre>
- http://www.ente-aix.fr/documents/135-geotechnique/geotechnique_Portet/TeleversementPagesAccesLibre/Module3_ClassificationSols_110718.pdf
- <http://macsancho.wordpress.com/>
- <http://www.mathcurve.com/courbes2d/tautochrone/tautochrone.shtml>
- <http://www.dmae.upm.es/cursofractales/capitulo1/3.html>
- http://fractals.nsu.ru/gallery_en.htm
- http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Relativit%C3%A9_d%27%C3%A9chelle&oldid=73896617
- <https://www.sndl.cerist.dz/>