

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 FIN D'ETUDE

Master Académique

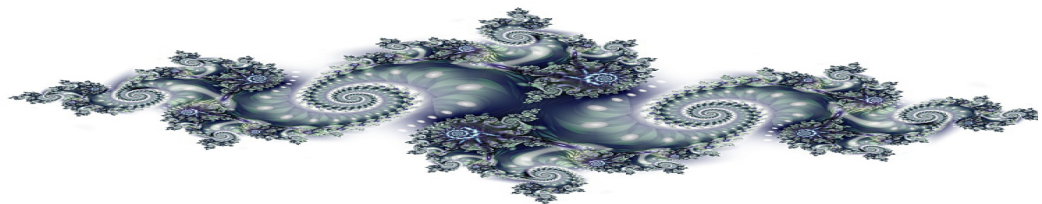
Spécialité : Génie Civil

Option : Géotechnique.

Réalisé Par : OURRAD KAHINA

THEME :

***L'Etude Des Effets Climatiques Sur Les Sols Fins Et
Détermination De La Dimension Fractale***



Devant le jury composé de :

Mr MELBOUCI Bachir, Professeur à l'UMMTOPrésident
Mme BOUZEBODJA Aldjia, Maître de Conférence-B à l'UMMT.....Promotrice
Mme BAIDI Fawzia, Maître Assistante-A à l'UMMTO.....Examinatrice

Année Universitaire : 2017/2018

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 BOUZEBOU DJA Aldjia, Maître de Conférence -B 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 avoir accepté de présider le jury de soutenance du présent mémoire.

Mes sincères remerciements vont aussi vers le membre du jury, Mme 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, à tous les responsables et les employés des deux entreprises LNHC et LCTP de Tizi-Ouzou, aux ingénieurs du Centre de Recherche Développement CRD unité de SONATRACH (BOUMERDES), Monsieur YAKOUB professeur chercheur et géologue à l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou

A Amine qui été présent aux bons et aux mauvais moments.

Dédicace

Je dédie ce lapidaire travail à :

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

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

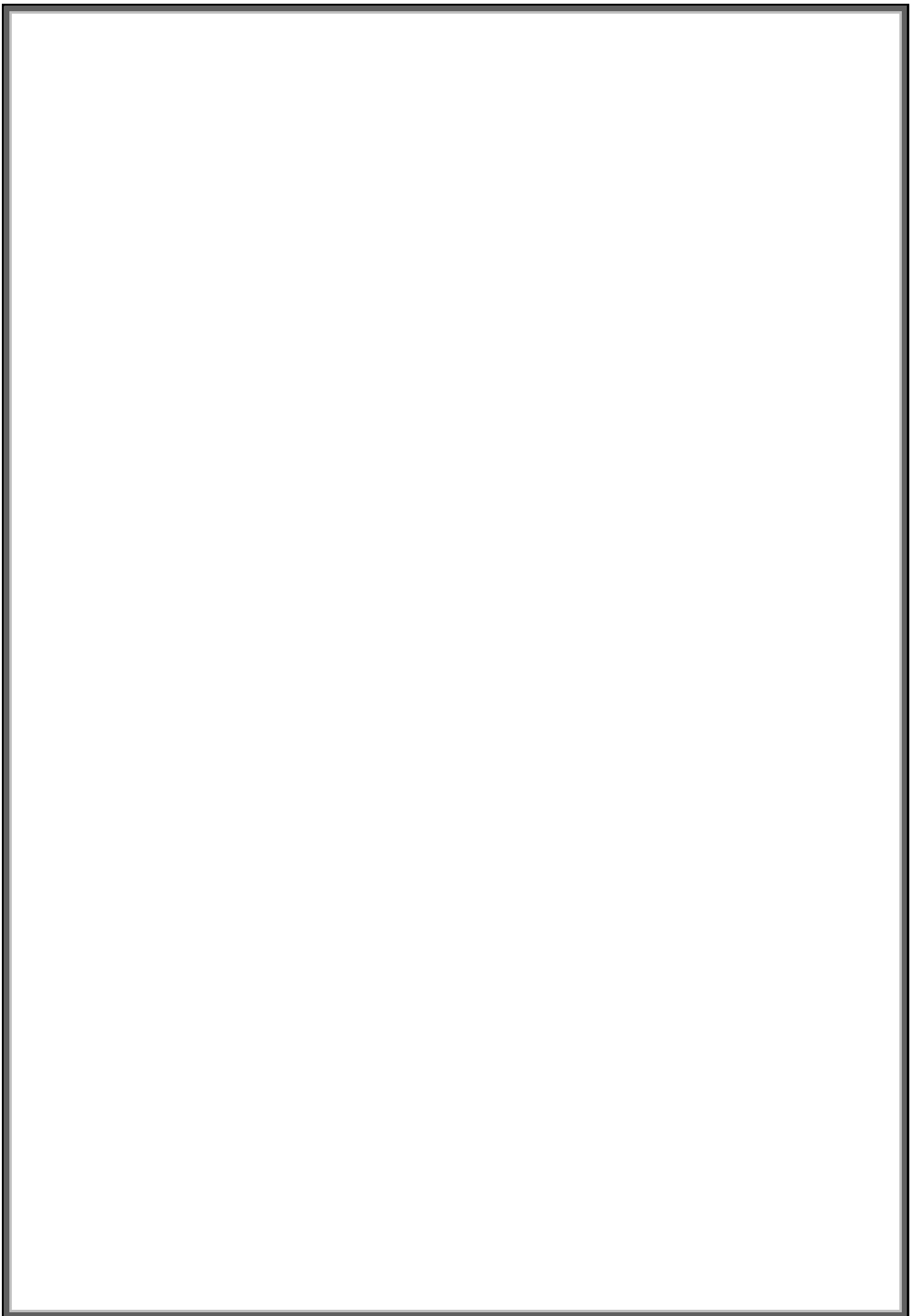
Mon Unique très chère frère Aziz et ma sœur Saida qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

Ma chère Sœur Dihia

Ma belle sœur Tima, Mon beau frère Lyes.

Mes très chers amis Jugurtha, Toufik, qui ont été d'une grande présence et motivation.

Tous les étudiants de ma promotion surtout Leiza, Sarah, Chapy, Yuna, 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
<i>PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE :</i>	
<i>Chapitre I : La Dimension Fractale Et Son Calcul En Génie Civil :</i>	
I.1 : Introduction.....	4
I.2 : Définition des Fractales.....	4
I.3 : Histoire des Fractales.....	5
I.3.1 : Les Premières images fractales.....	7
I.3.2 : L'autosimilarité.....	7
I.4 : Fractales en détail.....	7
I.4.1 : Cantor.....	7
I.4.2 : Une ligne qui remplit un carré.....	8
I.4.3 : Koch en renfort de Weierstrass.....	9
I.4.4 : Sierpinsky.....	10
I.5 : Les itérations complexes.....	10
I.6 : Les méthodes fractales.....	13
I.6.I : Méthode des Iterated Function System.....	14
I.7 : Notion de dimension fractale.....	16
I.7.1 : Dimension euclidienne (topologique) d_t	17
I.7.2 : La dimension de Hausdorff-Besicovitch ou dimension de recouvrement.....	18
I.7.3 : Dimension de Bouligand-Minkowski.....	19
I.8 : Définition mathématique de la dimension fractale.....	19
I.8.1 : Vérification avec la dimension classique.....	19
I.9 : Exemple de calcul de la dimension fractale.....	20
I.10 : Le calcul de la dimension fractale en génie civil.....	20

I.10.1 : Surface-Périmètre (Area-Perimeter).	22
I.10.2 : Méthode du diviseur (Line Divider).	22
I.10.3 : Méthode des lignes parallèles.	25
I.10.4 : Méthode de Comptage des Boîtes (Box Counting ou « BC »).	26
I.11 : Liaison entre la dimension fractale et les grains de sol.....	28
I.12 : Conclusion.	28
<i>Chapitre II : L'effet Des Conditions Climatiques Sur Les Sols Fins :</i>	
II.1 : introduction.....	30
II.2 : Identification et classification des sols fins.	30
II.2.1 : Caractérisation des sols fins.....	30
II.2.2 : Les argiles.	31
II.2.3 : Obtention de l'argile.	31
II.2.4 : Les différents types d'argiles.....	33
• Les : Limons.	33
• Les : marnes.....	33
II.3 : Les minéraux argileux.	34
II.3.1 : Structures cristallines fondamentales des minéraux argileux.....	34
II.3.2 : Les principaux types de minéraux argileux.	35
II.3.2.1 : La kaolinite [Si ₂ Al ₂ O ₅ (OH) ₄]	35
II.3.2.2: La montmorillonite [Si ₄ Al (2-x) Mg _x O ₁₀ (OH) ₂ , nH ₂ O].	36
II.3.3.3 : Smectites.....	37
II.3.3.4: Illite.....	38
II.3.3.5 : Vermiculites.....	38
II.2 : Généralités sur le changement climatique.	39
II.3 : Climat et système climatique.....	40
II.4 : Climat et cycle de l'eau.	40
II.5 : Le changement climatique dans la région méditerranéenne.....	42
II.6 : Comportement des sols soumis au gel et dégel.	43
II.6.1 : Les mécanismes se développant dans les sols fins.	43
II.6.2 : Processus liés au gel-dégel.	45
II.7 : Action du gel et dégel sur une chaussée routière.....	46
II.8 : Phénomène de gonflement.....	48
II.8.1 : Pourquoi les sols gonflent-ils et se rétractent-ils ?	49

II.8.2 : Pourquoi spécifiquement les sols argileux ?.....	50
II.8.3 : Facteurs intervenant dans le phénomène de retrait – gonflement des argiles.....	50
II.9 : Conclusion.	51

Chapitre III : Les Effets Climatiques Et Les Sols A Etudier :

III.1 : Introduction.	54
III.2 : Le problème du changement climatique.....	54
III.3 : Relations entre caractéristiques du sol et les propriétés thermiques.	55
III.3.1 : La capacité thermique des sols.	56
III.3.2 : Conductivité thermique du sol.	56
III.4 : Les minéraux argileux et le système « argile – eau ».	57
III.5:le climat et ses effets sur le matériau étudié.	58
III.5.1 : Le changement climatique en Algérie.	58
III.5.2 : Situation géographique.....	59
III.6 : climat de Tizi-Ouzou.	61
III.7 : climat de Boumerdes.	63
III.8 :L'influence climatique sur l'argile.	63
III.9 : Le retrait-gonflement.....	64
III.9.1 : Les fissures.	65
III.9.2 : Transformations des minéraux.	67
III.10 : Conclusion.....	67

PARTIE EXPERIMENTALE :

Chapitre IV : Identification Du Sol Etudié :

IV.1 : Introduction.	68
IV.2 : Origine des matériaux utilisés.....	68
IV.3 : Géologie des sites.....	69
IV.4 : Caractéristiques physiques et minéralogiques.....	70
IV.4.1 : Caractéristiques physiques.	70
IV.4.1.1 : Teneur en eau naturelle W % (NF P 94 – 050) – Méthode par étuvage.	70
Interprétation des résultats.....	70
IV.4.1.2 : Masse volumique des sols.	70
a) Masse volumique des grains solides des sols selon (NF P 94 – 054) – Méthode au pycnomètre.....	70
b) Masse volumique humide de sol (NF P 94 - 053) – Méthode de l'immersion dans l'eau..	72

c) Masse volumique du sol sec (NF P 94 – 064).....	72
IV.3.1.3 : Indice des vides et Degré de saturation.....	73
a) Indice des vides (e).....	73
b) Degré de saturation Sr (%).	74
IV4.1.4 :L’analyse granulométrique par la sédimentation [NF P 94- 056].....	75
a) Principe de l’essai.....	75
b) La procédure de l’essai.....	75
c) Les résultats des analyses granulométriques par sédimentation.....	76
d) Interprétation des résultats.	80
IV.4.1.5 Les limites d’ATTERBERG [NF P 94-051].....	80
IV.4.1.5.1 La procédure de l’essai.....	81
a) La détermination de la limite de liquidité.....	82
b) La détermination de la limite de plasticité.	83
c) L’indice de plasticité..	84
d) Résultats des limites d’Atterberg.	85
d.1 : La limite de plasticité.	85
d.2 La limite de liquidité.	86
e) Interprétation des résultats.....	90
IV.4.1.6 :L’activité AC.....	90
IV.4.1.7 : Mesure du potentiel de gonflement.....	91
IV.4.1.7.1 : Classifications.	91
a) Classifications selon un seul paramètre.....	91
b) Combinaison de deux paramètres.	92
IV.4.1.8 : Mesure du potentiel de retrait.....	93
IV.4.1.9 : Valeur au bleu de méthylène (VBS) (NF P 94 – 068) – Essai à la tâche. 94	
Interprétation des résultats.....	96
IV.4.2 : Analyse des compositions minéralogiques des échantillons étudiés.	97
• Interprétation des résultats.....	101
IV.5 : Conclusion.....	101
Chapitre V : Les Essais Réalisés Sur Le Sol Etudié :	
V.1 : Introduction.	102
V.2 : Préparation des échantillons.	102
V.2.1 : Échantillonnage.	102

V.3 : Les essais réalisés.	103
V.3.1 : Essai gel dégel.	103
V.3.1.1 : Principe d'essai.	103
V.3.1.2 : Appareillage.	103
V.3.1.3 : Déroulement d'essai.	104
V.3.1.4 : Images des échantillons.	105
• Interprétation des résultats des échantillons.	110
V.3.1.5 : Les résultats obtenus.	112
• Interprétation des résultats.	114
V.3.2 : Essai de Dégradabilité.	114
V.3.2.1 : But de l'essai.	114
V.3.2.2 : Appareillage.	115
V.3.2.3 : Le déroulement de l'essai.	115
V.3.2.4 : Les images retenues des échantillons.	115
• Interprétation des résultats.	122
V.3.2.5 : Les résultats obtenus.	123
• Interprétation des résultats.	125
V.3.3 : Essai de Canicules.	125
V.3.3.1 : Principe d'essai.	125
V.3.3.2 : Appareillage.	125
V.3.3.3 : Le déroulement de l'essai.	126
V.3.3.4 : Les images retenues des échantillons.	126
V.3.3.5 : Les résultats obtenus.	130
• Interprétation des résultats.	132
V.4 : Conclusion.	133
<i>Chapitre IV : Le Calcul De LA dimension Fractale Par La Méthode Box Counting.</i>	
VI.1 : Introduction.	134
VI.2 : Application de la méthode de Box Counting.	134
VI.3 : Résultats obtenus.	135
❖ Résultats de l'essai de Gel/ Dégel.	135

❖ Résultats de l'essai de Dégradabilité.....	143
❖ Résultats de l'essai de Canicules.....	146
• Interprétation des résultats des trois essais.....	151
VI.4 : Conclusion.....	152

LISTE DES SYMBOLES ET NOTATIONS

<i>Notation</i>	<i>Définition</i>
MO	<i>Matière organique</i>
W	<i>Teneur en eau (%)</i> .
W_w	<i>Masse de l'eau (g)</i> .
M_s	<i>Masse de l'échantillon à l'état sec (g)</i> .
m₁	<i>Masse du pycnomètre vide (g)</i> .
m₂	<i>Masse du pycnomètre plein d'eau (g)</i> .
m₃	<i>Masse du pycnomètre avec le matériau (g)</i> .
m₄	<i>Masse du pycnomètre avec le matériau et l'eau (g)</i>
m_s	<i>Masse sèche (g)</i>
m_h	<i>Masse humide (g)</i> .
ρ_w	<i>Masse volumique de l'eau égale à 1 (g/cm³)</i> .
ρ_s	<i>La masse volumique des particules solides (g/cm³)</i> .
ρ_d	<i>Masse volumique du sol sec (g/cm³)</i>
ρ_h	<i>Masse volumique humide (g/cm³)</i> .
e	<i>Indice des vides</i>
S_r	<i>Degrés de saturation (%)</i> .
γ_s	<i>Poids spécifique des grains solides (N/m³)</i> .
γ_w	<i>Poids spécifique de l'eau (N/m³)</i>
V_s	<i>Volume des grains solides (cm³)</i>
V_v	<i>Volume des Vides (cm³)</i>
V_w	<i>Volume de l'eau (cm³)</i> .
R	<i>Lecture sur le pycnomètre</i>
R'	<i>Lecture corrigée</i>
D	<i>Diamètre des grains (mm)</i> .
T	<i>Température de burette (°C)</i> .
T'	<i>Température de la burette ambiante (C°)</i> .

W_L	<i>Limite de liquidité (%)</i> .
W_p	<i>Limite de plasticité (%)</i> .
I_p	<i>Indice de plasticité (%)</i> .
I_c	<i>Indice de consistance (%)</i> .
VBS	<i>La valeur de bleu de sol</i>
Mb	<i>La masse de bleu permettant la saturation par adsorption (g)</i>
Ms	<i>Masse sèche de la prise d'essai (g)</i> .
F2	<i>Proportion d'argile F2 % < 2μm</i>
Ac	<i>Activité de Skempton</i>
D_{FR}	<i>Dimension fractale de rugosité</i>
D_F	<i>Dimension fractale</i>
D_M	<i>Dimension Minkowski-Bouligaud</i>
C	<i>Une valeur constante qui décrit la similitude de la forme fractale</i>
P	<i>Périmètre polygone (mm)</i> .
D_{tot}	<i>Dimension totale de fractale</i>
A	<i>Surface du grain (mm)</i>
λ	<i>Espacement constant sur un ensemble de lignes parallèles</i>
M(R<r)	<i>Masse cumulative des particules avec la taille R plus petite qu'un comparatif donnée de classer (g)</i> .
Mt	<i>Masse totale des particules (g)</i> .
r	<i>Taille de l'ouverture des passoirs (mm)</i>
r_L	<i>Dimension des particules maximale définie par la plus grande ouverture de la taille des passoirs (mm)</i>
X	<i>Dimension des boites</i>
N(X>x)	<i>Nombre des boîtes</i>
K	<i>Constante</i>
M	<i>La pente de la droite la mieux adaptée à l'équation</i>
C.V.Compacté	<i>Echantillon de centre ville réalisé à l'essai Proctor</i>
C.V.N.Compacté	<i>Echantillon à l'état naturel de centre ville réalisé à l'essai Proctor</i>

LISTE DES FIGURES

Chapitre I :

Figure. I.1. (a) : Les premières étapes de la construction d'une baderne d'Apollonius.....	5
Figure. I.1. (b) : Les trois cercles initiaux ayant permis de créer la baderne (LAJOIE.J 2006).	5
Figure. I.1. (c) : Une baderne d'Apollonius. (LAJOIE.J 2006).	5
Figure. I.2 : Illustration des cinq premières étapes de la construction du pentagone de Durer. (LAJOIE.J 2006).	6
Figure. I.3 : Illustration des cinq premières étapes de la construction du pentagone de Sierpinsky (LAJOIE.J 2006).	6
Figure. I.4. (a) : Premières étapes de la construction de l'ensemble de Cantor.	8
Figure. I.4 (b) : l'ensemble de Cantor est formé par les points à la base de chaque ligne. (LAJOIE.J 2006).	8
Figure I.5 : Courbe de Peano (LAJOIE.J 2006).	9
Figure. I.6 : Courbe de Hilbert (LAJOIE.J 2006).	9
Figure. I.7 : Etapes de la construction d'une courbe de Von Koch. (LAJOIE.J 2006)	10
Figure. I.8 : Illustration des premières étapes de la construction du triangle de Sierpinsky. (LAJOIE.J 2006).	11
Figure. I.9. (a) : Carpette de Sierpinsky.	11
Figure. I.9 (b) : Pentagone de Sierpinsky.....	11
Figure. I.9. (c) : Napperon de Koch : Hexagone de Sierpinsky dont le centre est délimité par un flocon de Koch.	11
Figure. I.9 (d): Flocon de Koch formé de trois courbes de Koch (en noir). (LAJOIE.J 2006)...	11
Figure. I.10 : Eponge de Menger-Sierpinsky (LAJOIE.J 2006).	11
Figure I.11 : Ensembles de Julia. (LAJOIE.J 2006).	12
Figure. I.12 : La partie noire constitue l'ensemble de Mandelbrot. (LAJOIE.J 2006).	13
Figure I.13 : Illustration du processus récursif d'un L-system. (LAJOIE.J 2006).	14
Figure I.14 : Utilisation de la méthode des IFS pour construire la fougère de Barnsley.	15
Figure I.14 (a): Image initiale (LAJOIE.J 2006).....	15
Figure I.14 (b) : Première itération (LAJOIE.J 2006).....	15
Figure I.14 (c) : 2 itérations (LAJOIE.J 2006).	15
Figure I.14 (d) : 3 itérations (LAJOIE.J 2006).	15
Figure I.14 (e) : 10 itérations (LAJOIE.J 2006).	15
Figure I.14 (f) : 25 itérations. (LAJOIE.J 2006).....	15

Figure. I.15 .Résumé chronologique de l’historique des fractales. (LAJOIE.J 2006).	15
Figure I.16: Les trois dimensions entières (FALCONER. K, 1990).	18
Figure. I.17 : Recouvrement de la côte de Grande-Bretagne par des réseaux carrés de maille décroissante.	19
Figure. I.18 : Exemple de calcule (MELBOUCI. B, 2002).	20
Figure. I.19 : La dimension fractale D pour les courbes de Von Koch (LANTAGNE. K et al. 2002).	21
Figure. I.20: Calcul du périmètre et de la surface d’un grain ($\Phi = 6.3$ mm) à l’aide de logiciel Auto-CAD 2009 (BOUZEBODJA.A, 2016).....	22
Figure .I.21 : Application de la méthode Surface-Périmètre sur les grains du schist (8 mm de diamètre). (BOUZEBODJA.A, 2016).	23
Figure. I.22 :(a) Grain de sable après l’analyse de l’image. (b), (c) et (d) contiennent les polygones tracés sur le grain avec des tailles de mesure respectivement de 2 mm, 1 mm et 0.25 mm. (BOUZEBODJA.A, 2016).	24
Figure. I.23 (a) : Calcul de la dimension fractale totale,.....	25
Figure. I.23 (b) : Calcul de la dimension fractale texturale (D1)	25
Figure. I.23 (b) : Calcul de la dimension fractale texturale et structurale (D2) (BOUZEBODJA.A, 2016).....	25
Figure. I.24 : Présentation des exemples sur l’application de la méthode des lignes parallèles sur un grain de 5 mm (YEZLI. S, 2011).....	26
Figure I.25 : Détermination de la dimension fractale par la méthode des lignes parallèles (YEZLI. S, 2011).....	27
Figure I.26 : Différentes étapes de maillage de l’image du grain et illustration de la méthode de Box Counting (OUTAYEB.S, 2016.	28
Chapitre II :	
Figure .II.1 : Processus de formation de l’argile. (NEFZI.A).....	32
Figure II.2 (a) : Tétraèdre de silice (Grim.1959).	34
Figure II.2 (b) : feuillet de silice en tétraèdre (Grim.1959).	34
Figure II.3: Schéma de la structure de la kaolinite (Lambe.1953).	35
Figure II.4: photographie d’une kaolinite prise au microscope électronique à balayage (Mitchell, 1976).	35
Figure II.5: Photographie d’une montmorillonite prise au microscope électronique à balayage (Mitchell, 1976).....	36

Figure II.6 : Analyse chimique d'argile verte type Montmorillonite. (Adrienne. P, 2003).....	37
Figure II.7: Vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite (Grim.1959).....	37
Figure. II.8 : Structure d'illite (Lambe, 1953).	38
Figure II.9 : Caractéristiques des argiles (Jasmund et Lagaly, 1992).	39
Figure II.10 : Le système climatique. Description schématisée des composants du système climatique et de leurs principales interactions (GIEC, 2007).	40
Figure II.11: Le cycle global de l'eau. (Trenberth.2006).....	41
Figure II.12: Vue d'un réchauffement de la planète: une représentation du changement de température, par région, 1976-2000 (Henson, 2008).....	42
Figure. II.13: Le gel dans les deux types de sols.....	44
Figure II.14: Comportement des sols soumis au gel et au dégel.	44
Figure II.15: Relief acéré caractéristique de la prédominance des processus de gélifraction (Saleinaz, VS).....	46
Figure II.16 – Désagrégation d'une paroi rocheuse sous l'effet de la gélifraction (Saastal, VS).....	46
Figure II.17: Action du gel sur une chaussée routière. (ALDALATI.R.2014).	47
Figure II.18: Action du dégel sur une chaussée routière. (ALDALATI.R.2014).	48
Figure II.19: Les formes de l'eau dans le sol. Une vue schématique.	50

Chapitre III :

Figure III.1 Conductivité thermique de constituants du sol en fonction de la teneur en eau (MUSY ET SOUTTER, 1991) ...	57
Figure. III.2 : flux de chaleur et dynamique de l'eau dans le sol. (MUSY ET SOUTTER).....	57
Figure III.3 : Evolution de la température moyenne annuelle à Oran en °C (1926-2006) (Tabet-Aoul, 2008).	59
Figure III.4 wilaya de Tizi-Ouzou.	60
Figure.III.5 wilaya de Boumerdes.	60
Figure.III.6 Extrait de la carte géologique de l'Algérie édité en 1951-1952 montrant la géologie de la région de Boumerdes. (MADJNOUN. A .2014).	61

Figure.III.7. Variations mensuelle des précipitations humidité et températures dans la région de Boumerdes durant la période 1995-2009 (données de l'office national météorologique de Dar El Beida, Alger, Algérie.	63
Figure III.8 : Effet du retrait-gonflement sur une construction.....	65
Figure III.9: Schéma de mécanisme de gonflement - retrait des argiles (CALVET. R, 2009). .	66
Figure III.10: Conséquence du gonflement des argiles dans la déstructuration d'un sol (FAGEL.N, 2005).	66
Figure III.11 : développement des fissures	66

Chapitre IV :

Figure. IV.1 : Situation Géographique des sites étudiés.	69
Figure VI.2 les différentes mesure de l'essai.	71
Figure VI.3 : Matériels utilisé.	72
Figure IV.4: Matériel d'essai d'Analyse granulométrique par sédimentométrie.....	76
Figure IV.5 : Analyse granulométrique par sédimentation de l'échantillon d'Azazga.....	77
Figure IV.6 : Analyse granulométrique par sédimentation de l'échantillon de Tizirt.....	78
Figure IV.7 : Analyse granulométrique par sédimentation de l'échantillon de Cap Djinet.	79
Figure IV.8 : Analyse granulométrique par sédimentation de l'échantillon de Centre Ville.....	80
Figure IV.9 : Appareil de Casagrande.....	81
Figure VI.10. Préparation de l'échantillon de sol.	82
Figure VI.11. Matériels utilisés.....	83
Figure VI.12. Le mortier malaxé.....	83
Figure IV.13 : La fermeture de la rainure	83
Figure VI.14. Confection de boules	84
Figure VI.15. Cassure du Cylindre.....	84
Figure IV.16 : Courbe de limite de liquidité de l'argile d'Azazga.	87
Figure IV.17 : Courbe de limite de liquidité de l'argile de Tizirt.	88
Figure IV.18 : Courbe de limite de liquidité de l'argile de Cap Djinet.....	88
Figure IV.19 : Courbe de limite de liquidité de l'argile de Centre Ville.	88
Figure IV.20: Potentiel de retrait (Building Research Establishment, 1980).....	93
Figure IV.21: Matériel d'essai au bleu de méthylène (résultats de l'essai à la tâche).	95
Figure IV.22 Réflexion des rayons X par une famille de plans réticulaires espacés d'une distance d.	98

Figure IV.23 Machine à diffraction rayon X.....	99
Figure IV.24 : Diffractogramme aux rayons X de l'échantillon d'Azazga.	99
Figure IV.25 : Diffractogramme aux rayons X de l'échantillon de Tizirt.....	100
Figure IV.26 : Diffractogramme aux rayons X de l'échantillon de Cap Djinet.	100
Figure IV.27 : Diffractogramme aux rayons X de l'échantillon de Centre Ville	101

Chapitre V:

Figure V.1 : Préparation des échantillons.	102
Figure V.2 : Matériel utilisé.	104
Figure V.3 : Les images de l'échantillon N°1 d'Azazga à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.....	106
Figure V.4 : Les images de l'échantillon N°1 de Tizirt à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.....	107
Figure V.5 : Les images de l'échantillon N°1 de Cap Djinet à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.....	109
Figure V.6 : Les images de l'échantillon N°1 de C.V.Compacté à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.....	110
Figure V.7 : Variation de la masse d'argile d'Azazga au cours d'essai.....	112
Figure V.8 : Variation de la masse d'argile de Tizirt au cours d'essai.	113
Figure V.9 : Variation de la masse d'argile de Cap Djinet au cours d'essai.....	113
Figure V.10 : Variation de la masse d'argile de C.V.Compacté au cours d'essai.....	114
Figure V.11 : Images de l'échantillon d'argile d'Azazga pendant l'essai de Dégradabilité, à l'état naturel et après chaque cycle.....	117
Figure V.12 : Images de l'échantillon d'argile de Tizirt pendant l'essai de Dégradabilité, à l'état naturel et après chaque cycle.....	119
Figure V.13 : Images de l'échantillon d'argile de Cap Djinet pendant l'essai de Dégradabilité, à l'état naturel et après chaque cycle.	120
Figure V.14 : Images de l'échantillon d'argile de Centre Ville (C.V.Compacté) pendant l'essai de Dégradabilité, à l'état naturel et après chaque cycle.	122
Figure V.15 : Variation de la masse d'argile d'Azazga au cours de l'essai de Dégradabilité.....	124
Figure V.16 : Variation de la masse d'argile de Tizirt au cours de l'essai de Dégradabilité.	124
Figure V.17 : Variation de la masse d'argile de Cap Djinet au cours de l'essai de Dégradabilité..	124

Figure V.18: Variation de la masse d'argile de C.V.Compacté au cours de l'essai de Dégradabilité.	125
Figure V.19: Images de l'échantillon d'argile N°01 d'Azazga pendant l'essai de canicules.	127
Figure V.20: Images de l'échantillon d'argile N°01 de Tizirt pendant l'essai de canicules.	128
Figure V.21: Images de l'échantillon d'argile de Cap Djinet pendant l'essai de Canicules.	129
Figure V.22: Images de l'échantillon d'argile N°01 de Centre Ville (C.V.Compacté) pendant l'essai de canicules.	130
Figure.23 : Variation de la masse de l'argile d'Azazga pendant l'essai de canicules.	121
Figure V.24 : Variation de la masse de l'argile de Cap Djinet pendant l'essai de canicules.	121
Figure V.25 : Variation de la masse de l'argile de Centre ville pendant l'essai de canicules.	122
Figure V.26 : Variation de la masse de l'argile de C.V.Compacté pendant l'essai de canicules.	123

Chapitre VI :

Figure VI.1 : Exemple du calcul de la D_{FR} par le logiciel MATLAB R2009b.	135
Figure VI.2: Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour L'échantillon N°01 d'Azazga.	136
Figure VI.3: Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon N°02 d'Azazga.	136
Figure VI.4 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile Témoin Azazga.N.	137
Figure VI.5: Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon N°01 Tizirt.	138
Figure VI.6: Variation de la dimension fractale en fonction des Etapes de l'essai pour l'échantillon N°02 Tizirt.	138
Figure VI.7 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile Témoin Tizirt.N.	139
Figure VI.8: Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon N°01 Cap Djinet.	140
Figure VI.9: Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon N°02 Cap Djinet.	140
Figure VI.10 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile Témoin Cap Djinet.N.	141
Figure VI.11: Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon N°01 C.V.Compacté.	142
Figure VI.12: Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon N°02 C.V.Compacté.	142

Figure VI.13 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile Témoin C.V.N.Compacté.	143
Figure VI.14 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon d'Azazga en fonction des cycles de Dégradabilité.....	144
Figure VI.15 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de Tizirt en fonction des cycles de Dégradabilité.....	144
Figure VI.16 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de Cap Djinet en fonction des cycles de Dégradabilité.	145
Figure VI.17 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de C.V.Compacté en fonction des cycles de Dégradabilité.....	146
Figure VI.18 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de l'argile N°01 d'Azazga en fonction des cycles de Canicules.	146
Figure VI.19 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de l'argile N°02 d'Azazga en fonction des cycles de Canicules.	147
Figure VI.20 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de l'argile N°01 de Tizirt en fonction des cycles de Canicules.	148
Figure VI.21 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de l'argile N°02 de Tizirt en fonction des cycles de Canicules.	148
Figure VI.22 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de l'argile C.V.Compacté N°01 de en fonction des cycles de Canicules.....	149
Figure VI.23 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de l'argile C.V.Compacté N°02 de en fonction des cycles de Canicules.....	150
Figure VI.24 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de l'argile de Cap Djinet en fonction des cycles de Canicules.....	150

Annexe :

Figure I.1 : Les images de l'échantillon N°02 d'Azazga à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.

Figure I.2 : Les images de l'échantillon Témoin d'Azazga (Azazga N) à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.

Figure I.3 : Les images de l'échantillon N°02 de Tizirt à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.

Figure I.4 : Les images de l'échantillon Témoin de Tizirt (Tizirt N) à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.

Figure I.5 : Les images de l'échantillon N°02 de Cap Djinet à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.

Figure I.6 : Les images de l'échantillon Témoin de Cap Djinet (Cap Djinet N) à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.

Figure I.7 : Les images de l'échantillon N°02 de Centre ville (C.V.Compacté) à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.

Figure I.8 : Les images de l'échantillon témoin de Centre ville (C.V.N.Compacté) à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.

Figure II.1: Images de l'échantillon d'argile N°02 d'Azazga pendant l'essai de Canicules.

Figure II.2: Images de l'échantillon d'argile N°02 de Tizirt pendant l'essai de Canicules.

Figure II.3: Images de l'échantillon d'argile N°02 de Centre ville (C.V.Compacté) pendant l'essai de Canicules.

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau III.1 : Climatologie de Tizi-Ouzou (2010-2015).....	62
Tableau III.3 : Climatologie de Tizi-Ouzou (2017)	62
Tableau III.2 : Climatologie de Tizi-Ouzou (2016).	62

Chapitre IV :

Tableau IV.1 : Détermination de la teneur en eau naturelle.	70
Tableau IV.2 : masse volumique des grains solides.	71
Tableau IV.3 : Masse volumique des grains.	72
Tableau IV.4 : classification des masses volumiques sec.	72
Tableau IV.5 : Masse volumique du sol sec.	72
Tableau IV.6 : Indices des vides des sites.....	72
Tableau IV.7 : L'état de saturation du matériau.	74
Tableau IV.8 : Degré de saturation pour les sites.	74

Tableau IV.9: Résultats des analyses granulométriques par sédimentométrie pour le site d'Azazga.....	76
Tableau IV.9: Résultats des analyses granulométriques par sédimentométrie pour le site De Tizirt.....	77
Tableau IV.9: Résultats des analyses granulométriques par sédimentométrie pour le site De Cap Djinet.....	78
Tableau IV.9: Résultats des analyses granulométriques par sédimentométrie pour le site De Centre Ville.....	78
Tableau. IV-9 : Résultats des limites de plasticité d'Azazga.....	85
Tableau. IV-10 : Résultats des limites de plasticité de Tizirt.....	85
Tableau. IV-11 : Résultats des limites de plasticité de Cap Djinet.....	85
Tableau. IV-12 : Résultats des limites de plasticité de C.V.Compacté.....	86
Tableau IV.13 : Limite de liquidité de sol d'Azazga.....	86
Tableau IV.15. : Limite de liquidité du sol de Cap Djinet.....	87
Tableau IV.16 Limite de liquidité du sol de C.V.Compacté.....	87
Tableau IV.17. : Tableau récapitulatif des limites de liquidité des sols étudiés.....	89
Tableau IV.18 Classification des sols selon leur indice de plasticité (MOURoux.P et al, 1988).....	89
Tableau IV-19: Les résultats et les appréciations.....	89
Tableau IV-20: L'indice de consistance.....	90
Tableau IV-21 : Résultats de l'indice de consistance.....	90
Tableau IV-22 : Classes de l'activité A_c	91
Tableau IV-23 : Activité (AC) de SKEMPTEN pour les sols.....	91
Tableau IV.23 : Evaluation du potentiel de gonflement à partir de l'indice de plasticité (MOURoux.P et al, 1983).....	92
Tableau IV.24 : Résultats du potentiel de gonflement à partir de l'indice de plasticité pour les sols.....	92
Tableau IV.25 : Degré d'expansion en fonction de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité (SNETHEN.N et al. 1977).....	92
Tableau IV.26 : Résultats de Degré d'expansion en fonction de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité (SNETHEN.N et al. 1977).....	93
Tableau IV.27 : Evaluation du potentiel de retrait à partir de l'indice de plasticité.....	94
Tableau IV.28: Désignation du sol en fonction de son VBS.....	95
Tableau IV.29: Résultats des valeurs au bleu de méthylène.....	95

Tableau IV.30 : Résultats finals des expériences pour le site d'Azazga.....	96
Tableau IV.31 : Résultats finals des expériences pour le site de Tizirt.	96
Tableau IV.32 : Résultats finals des expériences pour le site de Cap Djinet.....	96
Tableau IV.33 : Résultats finals des expériences pour le site de C.V.Compacté.....	97

Chapitre V:

Tableau V.1 : Variation de la masse de l'argile d'Azazga avant et après l'essai Gel/Dégel.	112
Tableau V.2 : Variation de la masse de l'argile de Tizirt avant et après l'essai Gel/Dégel.....	112
Tableau V.3 : Variation de la masse de l'argile de Cap Djinet avant et après l'essai Gel/Dégel.	113
Tableau V.4 : Variation de la masse de l'argile de C.V.Compacté avant et après l'essai Gel/Dégel.....	114
Tableau V.5 : Variation de la masse d'argile des quatre sols au cours de l'essai.de Dégradabilité	123
Tableau V.6 : Variation de la masse de l'argile d'Azazga pendant l'essai.de canicules.	130
Tableau V.7 : Variation de la masse de l'argile de Cap Djinet pendant l'essai de canicules.	131
Tableau V.8 : Variation de la masse de l'argile de Tizirt pendant l'essai de canicules.....	132
Tableau V.9 : Variation de la masse de l'argile de Centre ville pendant l'essai de canicules.	132

Chapitre VI:

Tableau VI.1 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile d'Azazga. N°01.	135
Tableau VI.2 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile Azazga. N°02.....	136
Tableau VI.3 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile témoin Azazga.N	137
Tableau VI.4 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile de Tizirt. N°01.....	137
Tableau VI.5 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile de Tizirt. N°02.....	138
Tableau VI.6 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile témoin TizirtN.	139
Tableau VI.7 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile de Cap Djinet. N°01.	139
Tableau VI.8 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile de Cap Djinet. N°02.	140
Tableau VI.9 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile témoin Cap Djinet.N.	141
Tableau VI.10 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile de Centre Ville(C.V.Compacté). N°01	141

Tableau VI.11 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile de Centre Ville(C.V.Compacté) N°02.	142.
Tableau VI.12 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile témoin C.V.N.Compacté.	143
Tableau VI.13 : Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile d'Azazga.	143
Tableau VI.14 : Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile de Tizirt.	144
Tableau VI.15 : Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile de Cap Djinet.....	145
Tableau VI.16 : Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile de C.V.Compacté.	145
Tableau VI.17 : Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile d'Azazga N°01.....	146
Tableau VI.18 : Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile d'Azazga N°02.....	147
Tableau VI.19 : Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile de Tizirt N°01.....	147
Tableau VI.20 : Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile de Tizirt N°02.....	148
Tableau VI.21 : Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile de Centre Ville N°01.	149
Tableau VI.22 : Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile de Centre Ville N°02.	149
Tableau VI.23 : Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile de Cap Djinet.....	150

INTRODUCTION GENERALE

La menace du changement climatique est le centre d'inquiétude de la communauté internationale. Afin de comprendre cet intérêt international, il faudrait connaître la signification du terme « changement climatique ». Le sens du terme « changement climatique » est assez simple à comprendre et ne suscite plus de controverses. 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. Cependant, ses causes, sa magnitude ainsi que les impacts de ces changements sur le bien-être humain et l'environnement sont très discutés. Les processus atmosphériques sur les sols ont été importants dans toutes les études des grandes recherches.

L'Algérie est pleinement concernée par le problème des argiles gonflantes qui sont très répandues en plusieurs régions. 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. Ce phénomène continu a cessé de manifester dans de nombreuses régions et engendre chaque année des dégâts considérables.

Le caractère gonflant de certaines argiles est lié en premier lieu au changement climatique et 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.

Afin de réduire les risques d'apparition de ces désordres, des études géotechniques permettant l'identification de ce phénomène est donc primordiale afin d'en tenir compte dans les études de génie-civil.

Les sols étudiés dans ce travail sont prélevés de la wilaya de Tizi-Ouzou et la wilaya de Boumerdes 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 présent 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, en calculant leurs dimensions fractales avec un programme fait par le logiciel MATLAB, avec une comparaison des résultats expérimentaux et les résultats du calcul. 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 fractals, de la dimension fractale et ses méthodes de calcul.

Le deuxième chapitre présente des généralités sur les sols fins particulièrement les argiles, leurs propriétés et leurs minéralogie et l'effet des conditions climatique et son influence sur ces derniers.

Le troisième chapitre présente l'influence climatique sur les sols étudiés, suivis par des petites notions sur le climat de Tizi-Ouzou et de Boumerdes.

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 trois essais climatiques (essai Gel-dégel, Dégradabilité et cycles de canicules) réalisés sur les échantillons des sols intacts prélevés des 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 de calcul.

Enfin, une *ANNEXE* qui représente les images des échantillons prises au cours des essais de Dégradabilité , Gel-Dégel.et Canicules.

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 qui a donné une rénovation pour cette connaissance mathématique. Depuis, on a observé que les fractales sont présentés de façon universelle dans la nature. Ainsi, comprendre ce concept permet de mieux comprendre notre environnement et les applications des fractales sont nombreuses.

La structure fragmentaire du sol est très généralement reconnue. Depuis longtemps les pédologues ont étudié intensivement les propriétés des agrégats du sol et de leur assemblage afin de rendre compte de la variation de la structure ou du degré d'agrégation du sol. Ce problème classique de la physique du sol peut être abordé sous un éclairage nouveau en raison du fait que le sol étant à la fois un milieu fragmenté et un assemblage poreux, une représentation fractale de sa structure paraît tout à fait approprié.

La dimension fractale est une valeur non entière ($1 < D < 3$) qui mesure le degré d'irrégularité ou de la fragmentation d'un objet, ou la mesure de la rugosité d'une surface. Elle est donc un nombre réel positif caractérisant la manière dont la masse ou la forme de l'objet est répartie dans l'espace.

I.2 : Définition de fractal :

Les objets fractals sont des figures géométriques de structure complexe qui sont caractérisés par leurs formes d'irrégularité, qui sont extrêmement interrompues ou fragmentées quelque soit l'échelle d'agrandissement. C'est Mandelbrot qui a introduit ce terme pour désigner ces fameux objets mathématiques,

Fractale qui vient du mot latin « *Fractus* » c'est-à-dire qui a été fractionné à l'infini et qui veut dire fragmenter ou briser, et l'une des caractéristiques principales de la fractale est l'autosimilarité qui veut dire qu'un agrandissement d'un objet est identique à lui-même quelle que soit l'échelle à laquelle on l'observe.(FALCONER. K, 1990)

I.3 : Histoire des fractales :

Depuis récemment, le concept des fractales gagne en popularité. Or, bien que ce mot n'ait été inventé par *Benoit Mandelbrot* que dans les années 70, les éléments soutenant cette nouvelle branche des mathématiques se sont mis en place depuis bien plus longtemps.

❖ Au commencement :

Pour parler de fractales, on fait souvent référence à la géométrie de la nature. De fait, elles se retrouvent partout dans notre environnement. Ainsi, elles existent depuis toujours. Cependant, on peut se demander quelles ont été les premières images fractales créées artificiellement par des hommes.

I.3.1 : Les premières images fractales :

La plus ancienne références retrouvées dans la documentation nous vient *d'Apollonius de Perge* et remonte à trois siècles avant J.-C. Dans son livre « *Tangencies* », ce disciple d'Euclide démontra comment tracer un cercle tangent à trois autres objets qui sont soit des points, des lignes ou des cercles. Ainsi, il utilisa ce résultat pour construire une figure qui sera reprise plus tard par *Mandelbrot* en tant qu'image fractale. (Figure I.1)

La construction consiste à prendre un triangle curviligne (dont les cotés sont des arcs de cercles). On peut alors trouver un cercle inscrit à l'intérieur. Cette étape crée trois nouveaux triangles curvilignes dans chacun desquels on peut inscrire un autre cercle. En continuant ce procédé jusqu'à l'infini, on trouve une image appelée la *baderne d'Apollonius*. (Figure I.1)

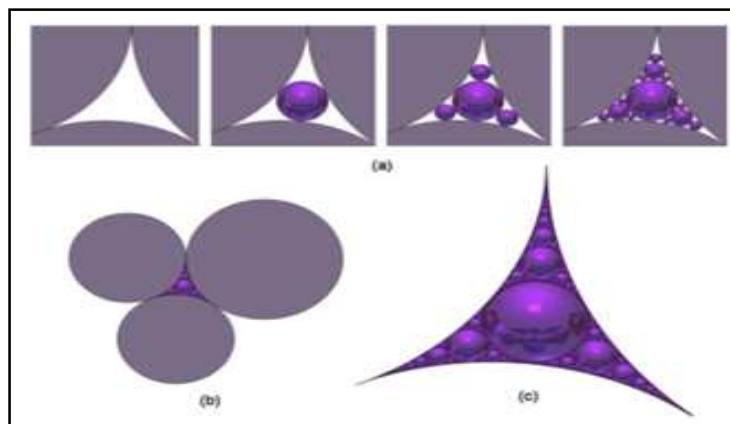


Figure. I.1. (a) Les premières étapes de la construction d'une baderne d'Apollonius (b) Les trois cercles initiaux ayant permis de créer la baderne (c) Une baderne d'Apollonius. (LAJOIE.J 2006).

Ensuite, ce n'est qu'en **1520** qu'apparaît une autre image fractale : *le pentagone de Durer* (Figure I.2) Sa construction est expliquée dans le manuel de géométrie Instructions pour la mesure à la règle et au compas, des lignes, plans et corps solides écrit par l'artiste allemand *Albrecht Durer*. Inspiré par *Léonard de Vinci*, ce peintre croyait que les arts devaient être basés sur les sciences en particulier sur les mathématiques qui, selon lui, étaient la branche des sciences la plus exacte, la plus logique et la plus efficace d'un point de vue graphique. (HERMANN.Z, 2010)

Son image fractale consiste en un pentagone régulier dans lequel on place six petits pentagones congrus; cinq d'entre eux doivent recouvrir les angles du pentagone initial de façon à ce que les cotés adjacents correspondent et le dernier pentagone doit se situer au centre du grand pentagone mais en ayant subi une rotation de 180° par rapport à celui-ci. (Figure I.2), En reprenant ce processus pour chacun des nouveaux pentagones et ainsi de suite, on trouve une image ressemblant à une dentelle.

Cette figure sera étudiée plus tard par *Sierpinsky* (mais en négligeant le pentagone central) qui généralisera cette construction à tous les polygones convexes réguliers. (Figure I.3)

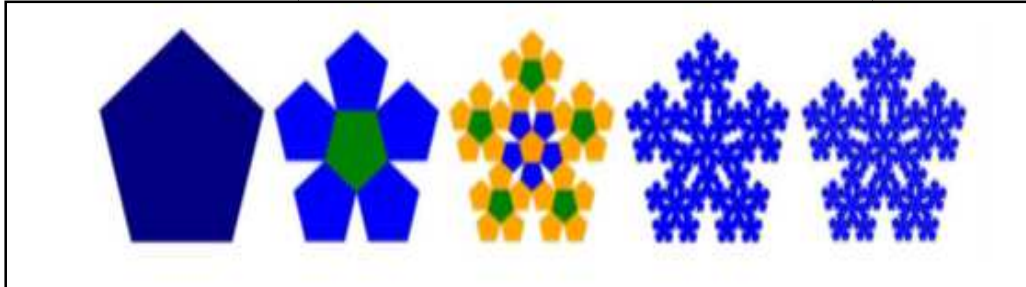


Figure. I.2 Illustration des cinq premières étapes de la construction du pentagone de Durer. (Les couleurs ne servent qu'à faciliter la compréhension du processus) (LAJOIE.J, 2006)

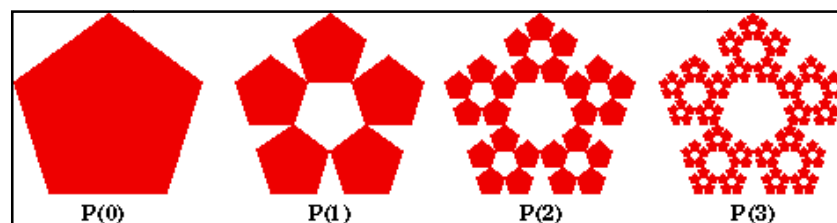


Figure. I.3. Illustration des cinq premières étapes de la construction du pentagone de Sierpinsky (LAJOIE.J, 2006)

I.3.2 : L'autosimilarité :

En plus des premières images fractales, 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 auto-similaire (PAVEL.S et BOILEAU.M, 2005) 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 d'écrira 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. Ces figures ainsi construites auront parfois des propriétés assez étranges qui perturberont plusieurs certitudes bien établies à l'époque. C'est pourquoi, *Mandelbrot* parle de la période de 1875 à 1925 comme de la « *crise des mathématiques* ».

I.4 : Fractales en détail :

Maintenant que les bases ont été posées, on constate qu'il existe plusieurs types de fractales et qu'on peut les classer de différentes façons. Par exemple, il y a les fractales déterministes et probabilistes selon qu'elles sont obtenues par un algorithme bien défini à l'avance ou de façon tout à fait aléatoire. Ici, nous présentons les fractales en fonction de la technique utilisée pour les créer.

I.4.1 : Cantor :

Un peu plus tard, *Cantor* prit tout le monde par surprise en prouvant en 1877 dans une lettre à *Dedekind* qu'il y avait une correspondance biunivoque entre l'intervalle de points $[0,1]$ et les points d'un espace à p dimensions. Autrement dit, cette découverte assurait qu'il était possible de se repérer dans un carré à l'aide d'un seul paramètre alors qu'il en faut habituellement deux pour décrire une figure bidimensionnelle. Lui-même fut déstabilisé par ce résultat puisqu'il écrit : « *Je le vois, mais je ne le crois pas!* ». Cette découverte aura un impact évident sur la définition de la dimension Fractal.

En 1883, il publie son fameux ensemble triadique ou poussières de Cantor (CANTOR.G,1883) Pour construire l'ensemble, il prend l'intervalle $[0,1]$ qu'il divise en trois parties égales et retire le tiers central soit l'intervalle $(1/3, 2/3)$. Remarquons que les extrémités sont conservées dans l'ensemble. Ensuite, il enlève le tiers central de chacun des nouveaux segments et ce indéfiniment (Figure I.4).

Le résultat troublait à l'époque puisqu'il s'agit d'un exemple d'un ensemble parfait, c'est-à-dire qui contient tous ses points d'accumulation et seulement ceux-ci, mais qui n'est dense nulle part. De plus, il contient une quantité non-dénombrable de points. Bien que l'ensemble de Cantor ne soit pas le plus visuel, il joue un rôle important dans plusieurs branches des mathématiques.

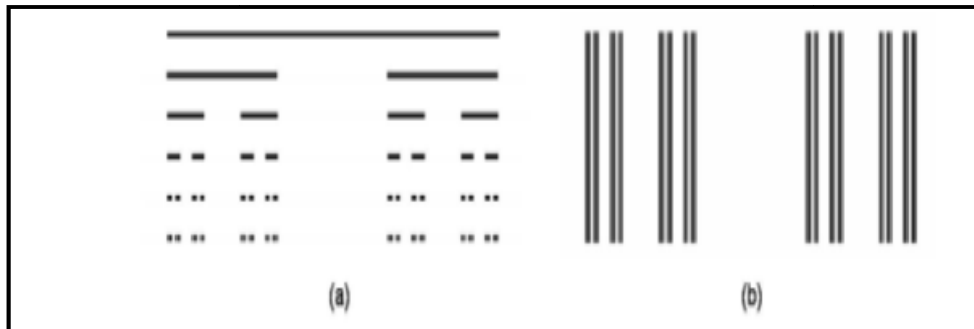


Figure. I.4. (a) Premières étapes de la construction de l'ensemble de Cantor (b) On utilise des lignes verticales pour faciliter la visualisation; l'ensemble de Cantor est formé par les points à la base de chaque ligne. (LAJOIE. J, 2006).

I.4.2 : Une ligne qui remplit un carré :

Ensuite, à la fin du XIXe siècle, *Peano* (Peano.G 1830) et *Hilbert* (HILBERT.D, 1891) construisirent presque simultanément une courbe qui remplit un carré. Dans le premier cas, *Peano* a proposé une série de courbes semblables. Sa construction la plus célèbre consiste tout d'abord à tracer une diagonale du carré. Pour réaliser la deuxième étape, on subdivise le carré initial en neuf carrés semblables et on parcourt tous les carrés en passant par une de leurs diagonales d'un seul trait de crayon tel qu'illustré à la figure I.5. On reprend ensuite chacun des petits carrés qu'on subdivise à nouveau et on y trace le même parcours. Le carré est entièrement recouvert lorsque le processus itératif tend à l'infini.

Pour ce qui est de la construction proposée par *Hilbert*, on commence par diviser le carré initial en quatre carrés semblables et on relie le point central de chacun dans le sens horaire sans revenir au premier point. Ensuite, chaque carré est divisé à nouveau pour former quatre groupes de quatre carrés. De la même façon, on relie les points centraux de façon à ce que le dernier point du groupe 1 soit relié avec le premier

point du groupe 2 et ainsi de suite. En répétant cette itération jusqu'à l'infini on arrive à recouvrir le carré initial avec une courbe. (Figure I.6)

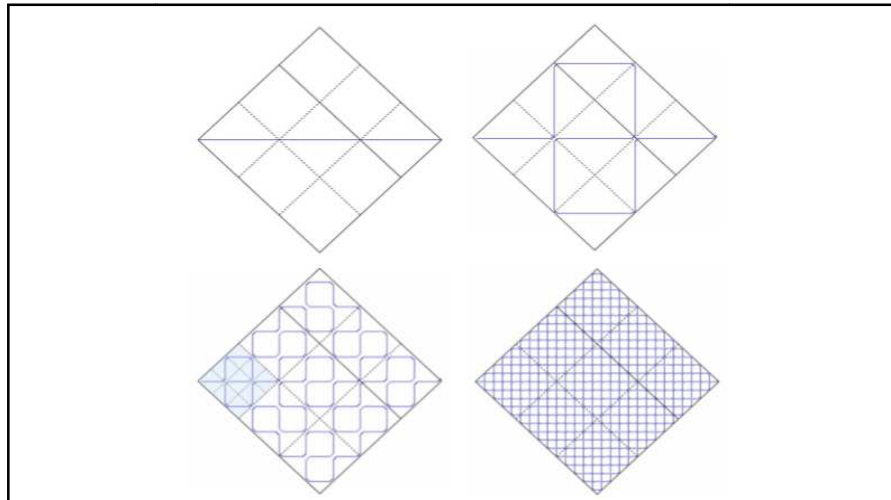


Figure I.5. Courbe de **Peano** (LAJOIE. J, 2006)

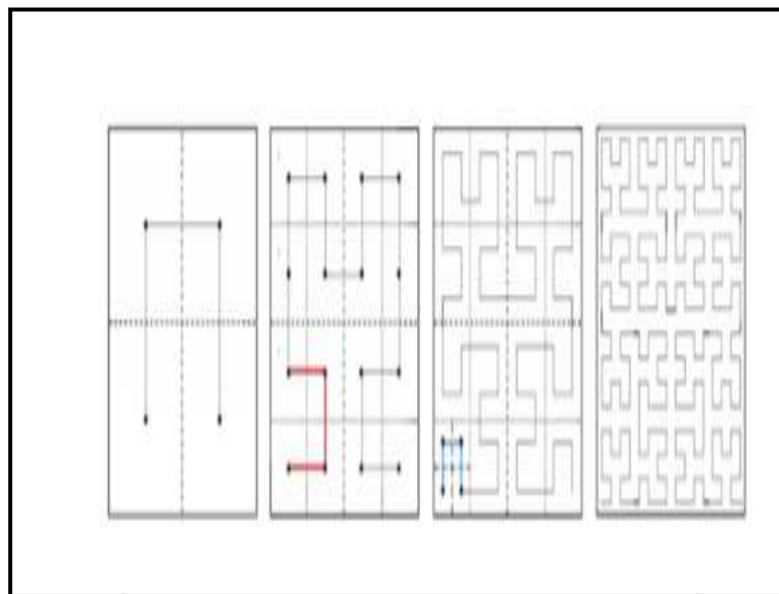


Figure. I.6 Courbe de **Hilbert** (LAJOIE.J, 2006)

I.4.3 : Koch en renfort de Weierstrass :

Bien que la fonction proposée par *Weierstrass* soit exacte, elle paraissait assez compliquée pour que certains mathématiciens continuent d'espérer que ce dernier ait fait une erreur. Or, en **1904**, *Von Koch* proposa une construction extrêmement simple aboutissant à une courbe continue qui n'a pas de tangente. (VON KOCH.H, 1904), (VON KOCH. H 1906).

Pour y arriver, on prend un segment de longueur 1 et on remplace son tiers central par un « pic » formé de deux segments de longueur $1/3$. On refait le même

processus pour chacun des quatre nouveaux segments et ainsi de suite, à l'infini, on obtient une courbe exclusivement formée de « pics » qui on le sait, n'admettent pas de tangente (Figure I.7).

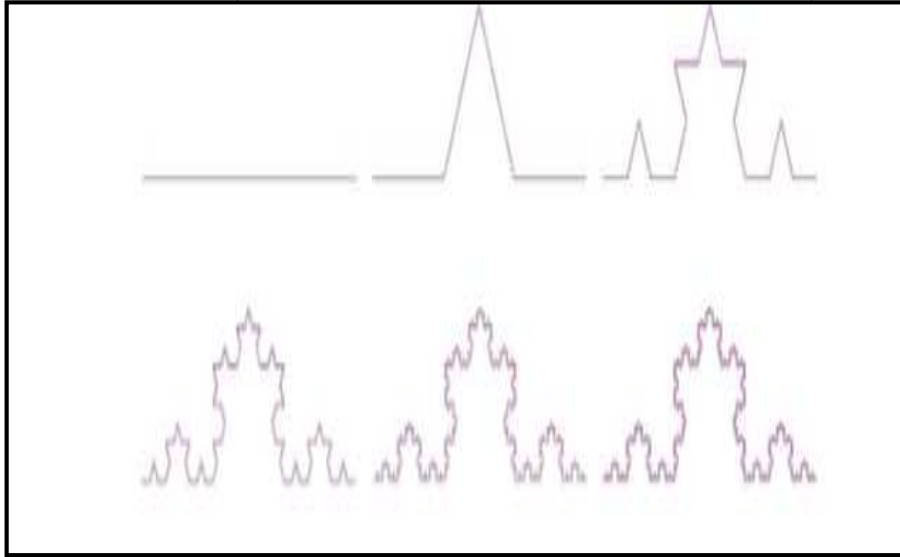


Figure. I.7 .Etapes de la construction d'une courbe de Von Koch (LAJOIE.J, 2006).

I.4.4 : Sierpinsky :

Finalement, nous présentons un dernier « monstre » apparu en **1915** : *le tamis de Sierpinsky*. (SIERPINSKI.W.1915), Cette construction consiste à prendre un triangle quelconque et à lui retirer le triangle formé par les points milieux de ses trois cotés. Pour chacun des trois triangles ainsi formés, on retire le triangle central de la même façon et on poursuit le procédé jusqu'à l'infini. (Figure I.8)

Ce même processus peut être généralisé à tous les polygones convexes réguliers. En prenant un carré et en lui retirant toujours le carré central, on obtient la carquette de *Sierpinsky* (Figure I.9 (a)).

En appliquant cette idée à un pentagone mais en y ajoutant un pentagone inversé au centre pour chaque itération, on retrouve le pentagone de *Durer* tel que présenté plus tôt. (Figure I.2), Pour ce qui est de l'hexagone, il génère une figure qu'on appelle parfois le « *napperon de Koch* » (Figure I.9 (c)) puisque la frontière de son centre est constituée de trois courbes de *Koch* bout à bout formant ce qu'on appelle le « *flocon de Koch* » (Figure I.9 (d)).

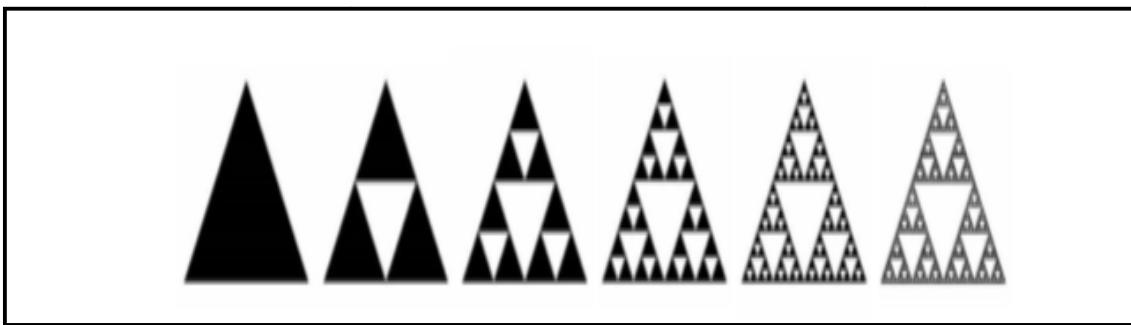


Figure. I.8. Illustration des premières étapes de la construction du triangle de Sierpinsky. (LAJOIE. J, 2006).

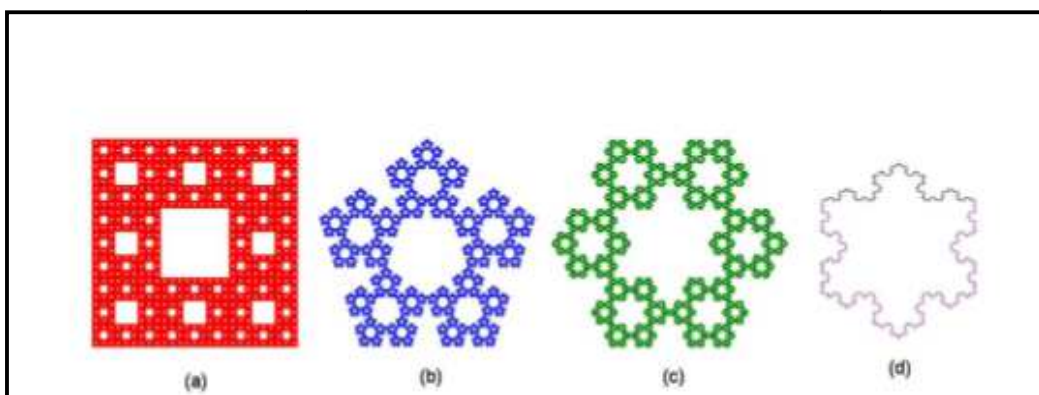


Figure. I.9. (a) Carpettes de Sierpinsky, (b) Pentagone de Sierpinsky (c) Napperon de Koch : Hexagone de Sierpinsky dont le centre est délimité par un flocon de Koch (d) Flocon de Koch formé de trois courbes de Koch (en noir). (LAJOIE. J, 2006).

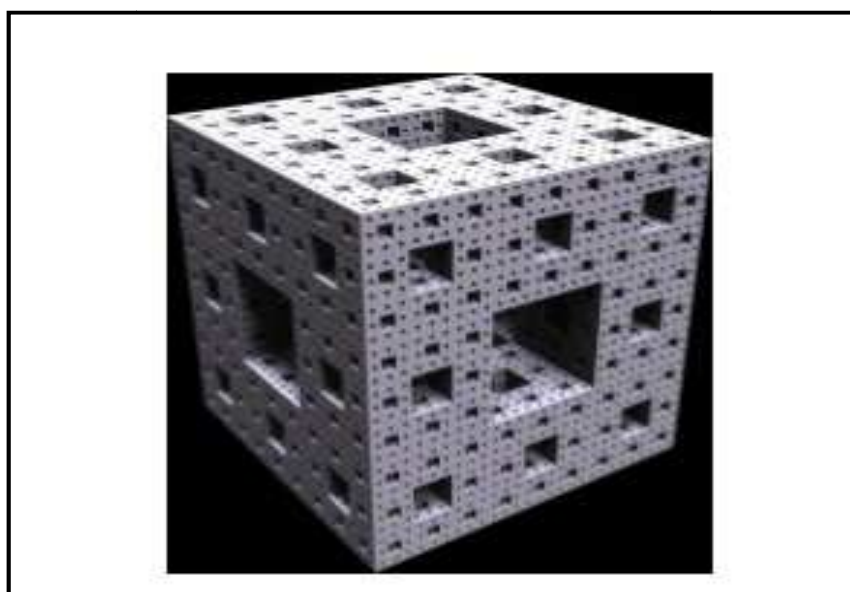


Figure. I.10. Eponge de Menger-Sierpinsky (LAJOIE. J, 2006).

I.5 : Les itérations complexes :

En 1918, *Julia* publie à l'âge de 25 ans un chef-d'œuvre de 199 pages qui le rendit célèbre dans le monde des mathématiques (JULIA.G, 1918). Sept ans plus tard, *Cremer* rédige un essai (CREMER.H, 1925) dans lequel on retrouve la première visualisation graphique d'un ensemble de *Julia*.

Cependant, il s'agit d'une vague approximation et il faudra attendre l'arrivée des ordinateurs et *Mandelbrot* pour apprécier, en 1980, la beauté et la complexité de ces ensembles. Notons que *Fatou* avait travaillé simultanément sur le même sujet.

En effet, en 1915, l'Académie des Sciences de Paris avait proposé l'étude des itérations d'un point de vue global comme sujet pour son Grand Prix de 1918. Ainsi, il n'est pas surprenant que deux mathématiciens aient développé la théorie de façon similaire et c'est pourquoi on parle parfois des ensembles de *Fatou-Julia*. Ces ensembles sont simplement obtenus par des itérations.

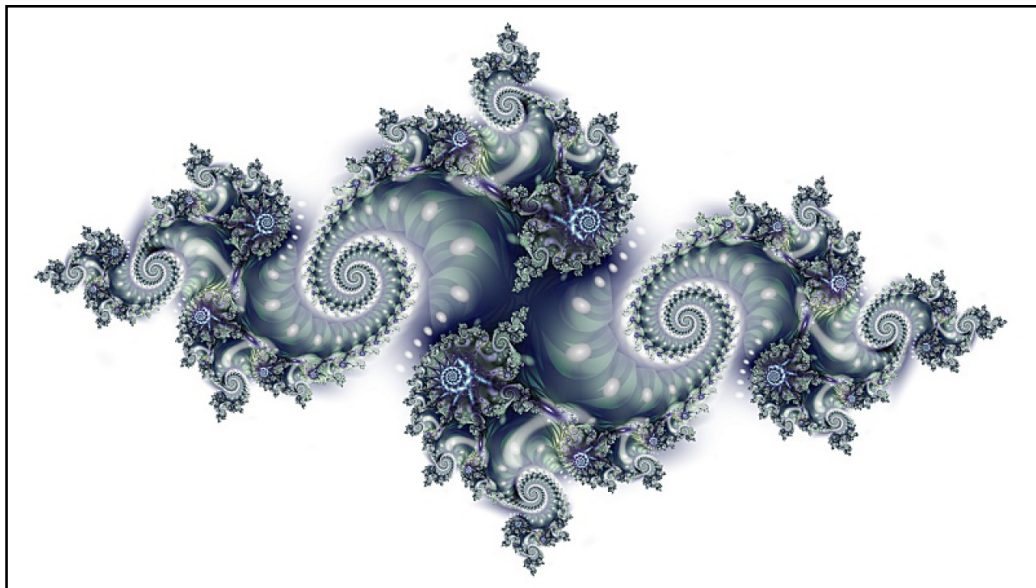


Figure I.11.Ensembles de Julia. (LAJOIE. J, 2006)

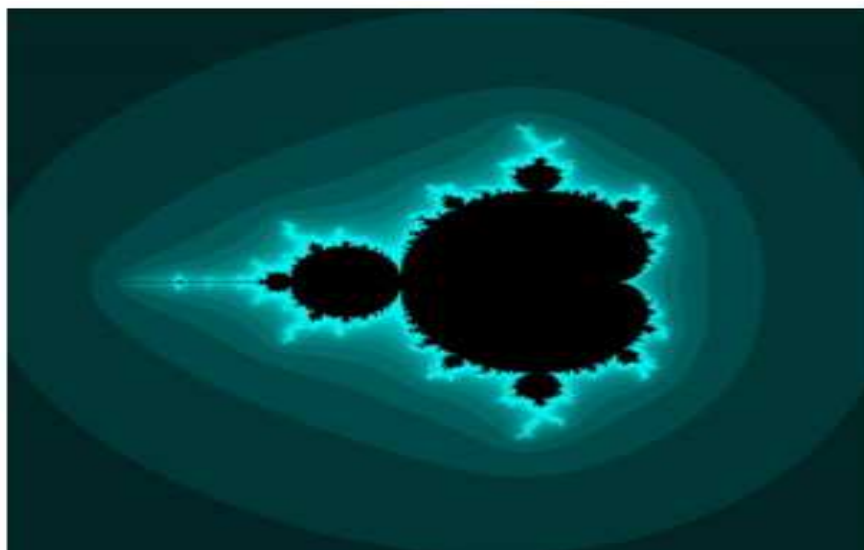


Figure. I.12. La partie noire constitue l'ensemble de Mandelbrot. (LAJOIE. J, 2006).

I.6 : Méthodes fractales :

* Les L-Systems :

Comme l'affirme *Mandelbrot*, les fractales constituent la géométrie de la nature. Il n'est donc pas surprenant que le biologiste *Aristid Lindenmayer* ait eu recours à un processus fractal pour décrire la croissance des végétaux. En effet, en **1968**, il publia un article (LINDENMAYER.A, 1968) dans lequel il formalise la description de la croissance d'une plante. C'est ce qu'on appelle les *L-Systems* («L» pour Lindenmayer). Ceux-ci se prêtent très bien à une implémentation informatique. Un L-system est essentiellement une chaîne de caractères, régie par un ensemble de règles de production, qui évolue en fonction du temps. Les caractères représentent une interprétation graphique.

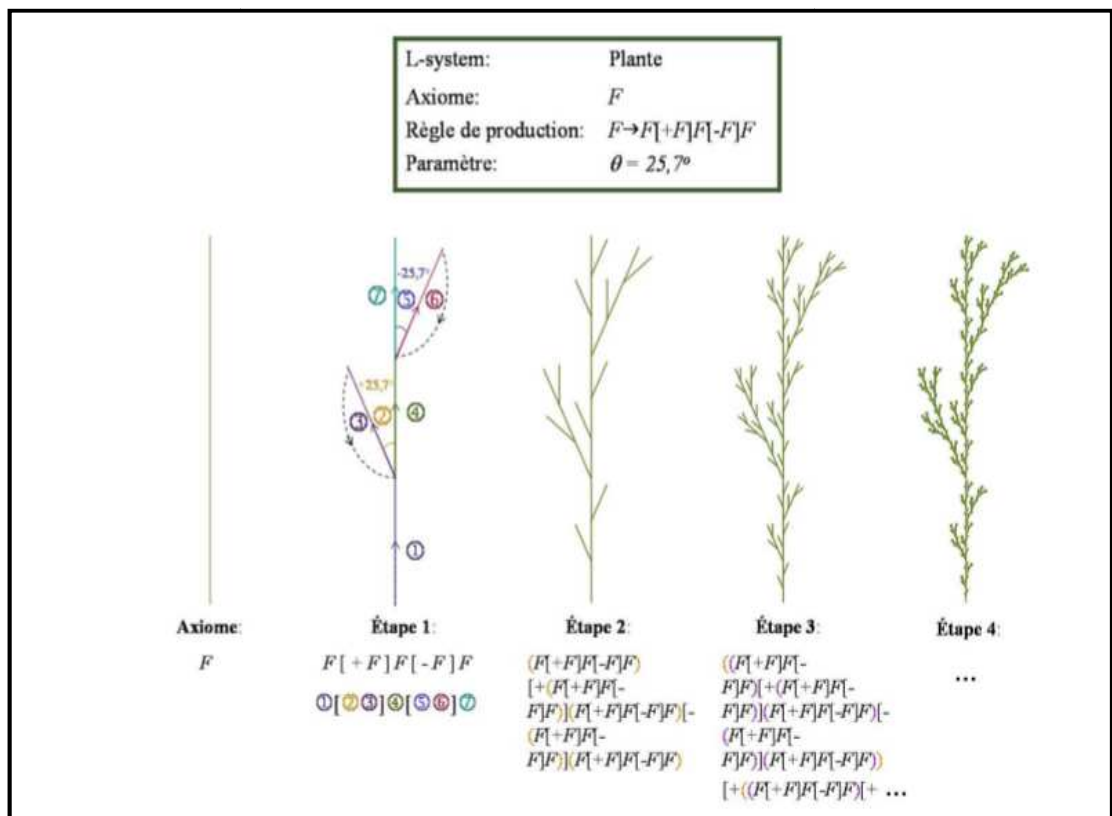


Figure I.13. Illustration du processus récursif d'un L-system. (LAJOIE. J, 2006).

I.6.1 : Méthode des Iterated functions system (IFS) :

A la suite du célèbre livre de Mandelbrot « *The Fractal Geometry* » of Nature, Hutchinson (HUTCHINSON.J, 1981) a proposé une technique simple de construction de fractales qui fut améliorée par **Barnsley**, (BARNSELY. M. F, 1988). Il s'agit de la technique des IFS (Iterated functions system).

Considérons un ensemble de transformations qui ont la propriété d'être des contractions (la distance entre deux points quelconques du domaine est réduite par la transformation). Partant de n'importe quelle image, on lui applique chacune des transformations et on fait l'union des figures obtenues. A partir de cette nouvelle image, on reprend le processus et ce indéfiniment.

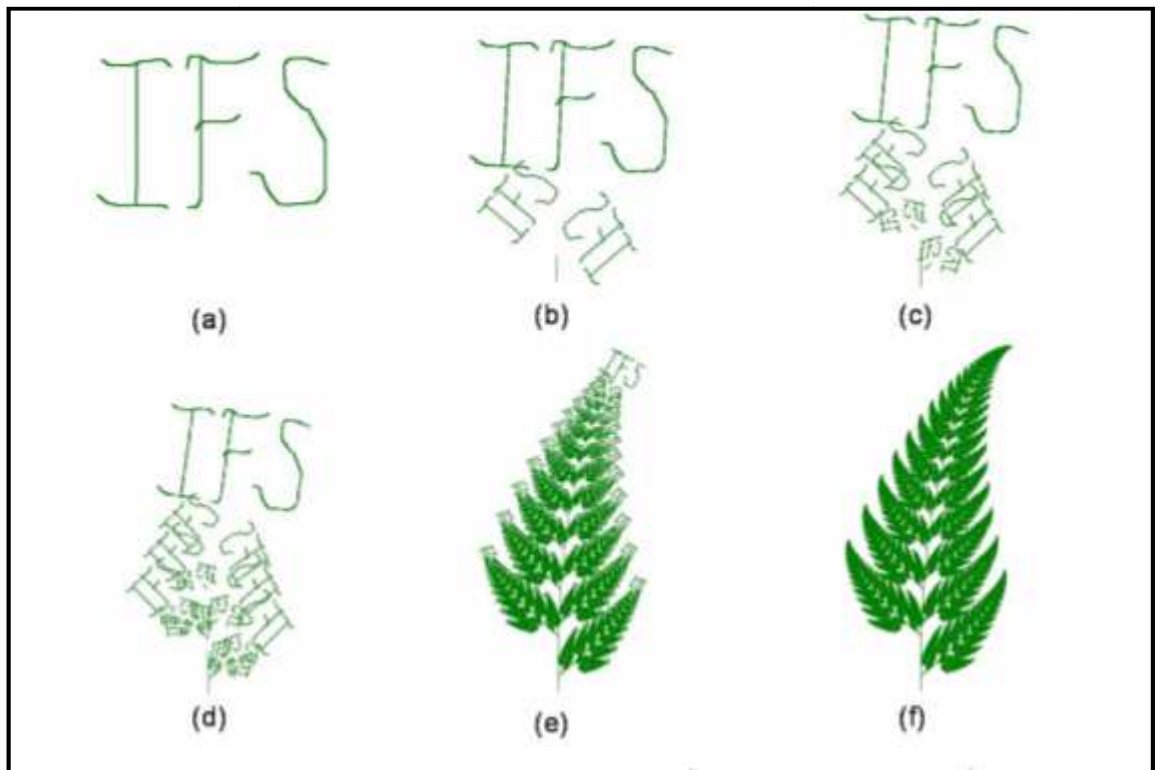


Figure I.14. Utilisation de la méthode des IFS pour construire la fougère de Barnsley. (a) Image initiale (b) Première itération (c) 2 itérations (d) 3 itérations (e) 10 itérations (f) 25 itérations. . (LAJOIE.J 2006).

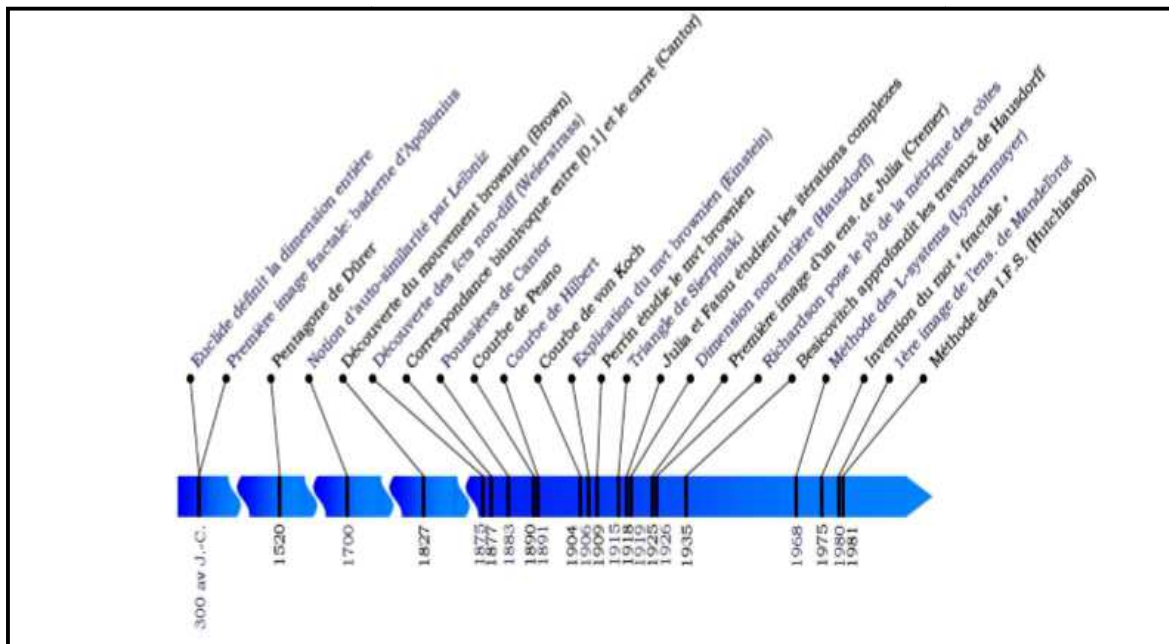


Figure. I.15 .Résumé chronologique de l'histoire des fractales (LAJOIE. J, 2006).

I.7 : Notion de dimension fractale :

Parallèlement à la création de ces objets pathologiques, le concept de dimension, essentielle à la théorie des fractales, subira toute une évolution. Bien établie depuis 300 ans avant J.-C., la notion de dimension entière avait été définie par *Euclide*. En effet, dans le premier livre de « Les éléments », on peut lire au sujet de la géométrie plane :

1. Un point est ce qui n'a aucune partie.
2. Une ligne est une longueur sans largeur.
3. Les extrémités d'une ligne sont des points.
5. Une superficie est ce qui possède longueur et largeur seulement.
6. Les extrémités d'une superficies sont des lignes.

Et plus tard, dans le onzième livre au sujet de la géométrie spatiale :

1. Un solide est ce qui a longueur, largeur et profondeur.
2. Les termes d'un solide sont des superficies.

Pour mesurer une longueur, une surface ou un volume, une méthode usuelle consiste à recouvrir ces ensembles de pavés dont la longueur, la surface ou le volume sont pris comme unité de mesure.

« Définition de la 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.

Désigné par **DF** la dimension fractale peu se définir aussi comme une grandeur qui a vocation à traduire la façon qu'a un ensemble fractal de remplir l'espace, à toutes les échelles. Dans le cas des fractales, elle est non entière et supérieure à la dimension topologique.

Les définitions les plus importantes sont la dimension de *Hausdorff-Besicovitch*, la dimension de *Minkowski* (ou "*box-Counting*"), et la dimension de *corrélation*. Dans le cas d'ensembles fractals simples (autosimilarité stricte) on conjecture (SCHROEDER, M.R, 1991) que ces définitions donnent des résultats identiques.

Pour introduire la notion de la dimension fractale, il est indispensable de parler d'abord de la **dimension euclidienne (topologique)** qui est utilisée que dans les dimensions entières : pour mesurer une longueur, une surface ou un volume, une méthode

usuelle consiste à recouvrir ces ensembles de pavés dont la longueur, la surface ou le volume sont pris comme unité de mesure.

I.7.1 : Dimension euclidienne (topologique) d_t

Pour un point on a une dimension 0, pour un segment 1, pour une surface 2 et pour un volume 3.

On peut constater 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.16.

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 l'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 .

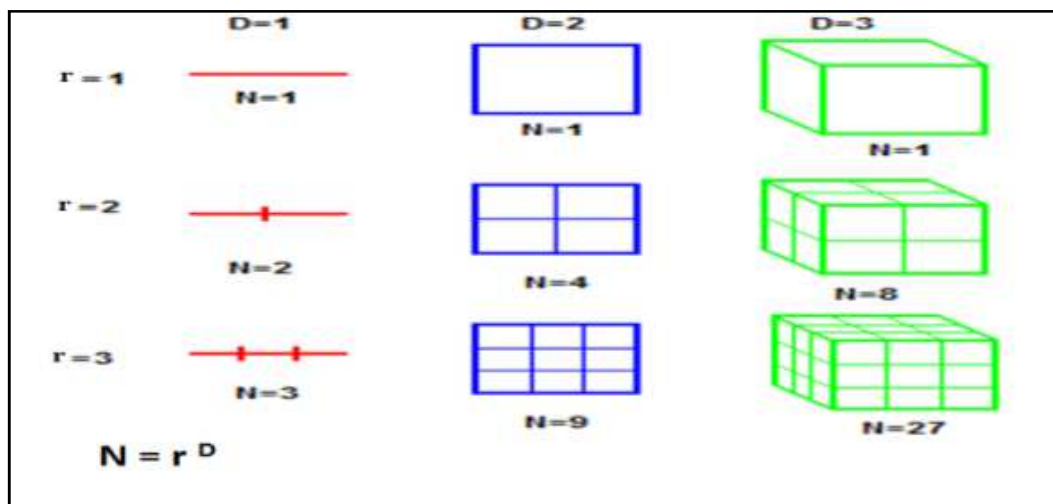


Figure I.16: Les trois dimensions entières (FALCONER. K, 1990).

Pour une courbe fractale où sa dimension n'est jamais entière, les outils de la géométrie Euclidienne ne suffisent plus à résoudre les problèmes qu'ils introduisent. De nos jours, seule l'utilisation des fractales et de leur caractère chaotique ou paradoxal (le fini contenant l'infini), permet de résoudre ces problèmes qui est la deuxième dimension qui est La *dimension de Hausdorff* appelée aussi *dimension fractale*.

I.7.2 : La dimension de Hausdorff-Besicovitch ou dimension de recouvrement :

Contrairement à la dimension euclidienne, la dimension de Hausdorff d'un objet fractal n'est pas nécessairement entière. Cela peut s'interpréter par le fait que certaines courbes fractales, de dimension euclidienne 1 tendent à remplir une surface de dimension 2 (courbe de Peano) au bout d'un certain nombre infini d'itération.

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 défini comme suit :

$$D = ((\ln n) / (\ln 1)) / r$$

Avec :

n : le nombre d'homothéties interne.

r : la raison.

I.7.3 : Dimension de Bouligand-Minkowski :

Dans de nombreux cas, la dimension de Hausdorff décrit correctement le terme de correction pour un résonateur à périmètre fractal dans la conjecture de Lorentz. Cependant, en général, la dimension appropriée à utiliser s'avère être la dimension de Minkowski-Bouligand (Schroeder, 1991).

Soit $F(r)$ la surface tracée par un petit cercle de rayon r suivant une courbe fractale. Ensuite, en fournissant la limite existe,

$$D_M = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln F(r)}{-\ln r} + 2$$

Il est conjecturé que pour toutes les fractales strictement auto-similaires, la dimension de Minkowski-Bouligand est égale à la dimension de Hausdorff D ; sinon $D_M > D$.



Figure. I.17. Recouvrement de la côte de **Grande-Bretagne** par des réseaux carrés de maille décroissante.

I.8 : Définition mathématique de la dimension fractale :

Appelons $L(I)$ la longueur mesurée avec un étalon de longueur 1, D la dimension fractale de l'objet étudié, AB est la taille macroscopique de l'objet, c'est-à-dire la distance entre les deux bouts de l'objet. On a alors

$$L(I) = (AB/I)^D$$

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

$$n = L^D/l^D \quad \text{D'où} \quad D = \frac{\ln n}{\ln(L/l)}$$

I.8.1 : Vérification avec la dimension classique :

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

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

$$n = k^2 / (k/2)^2 = 4$$

$$L=k \text{ et } l= k/2$$

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

De même, un cube de côté K se divise en 8 cubes de côté $k/2$, la dimension est alors égale à $\ln 8 / \ln 2 = 3$.

*on trouve à la fin la dimension classique définie par Euclide.

I.9 : Exemple de calcul de la dimension fractale :

Application sur la courbe de Von Koch (objet auto-similaire), On peut facilement évaluer DF pour les courbes de Von Koch, où chacune des étapes d'itération fournit à chaque fois une approximation polygonale convenable. Dans le cas illustré ci-dessous, les mathématiciens trouvent, ce qui conduit aux valeurs indiquées sur la droite.

En fonction de l'angle de départ, on obtient des résultats très différents. Selon la Théorie du Chaos, une infime variation des conditions initiales peut en effet entraîner des formes ou des évolutions très distinctes.

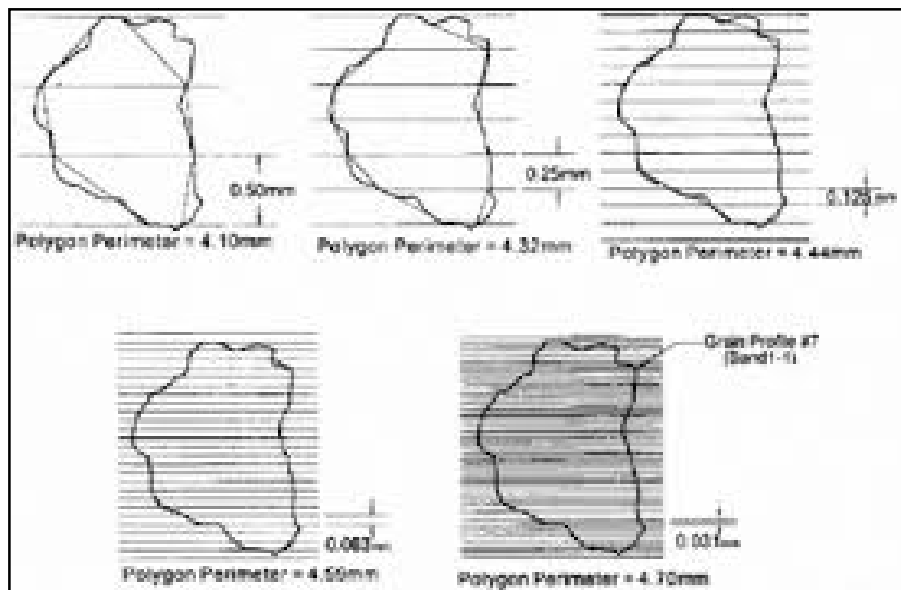


Figure. I.18 : Exemple de calcul (MELBOUCI. B, 2002)

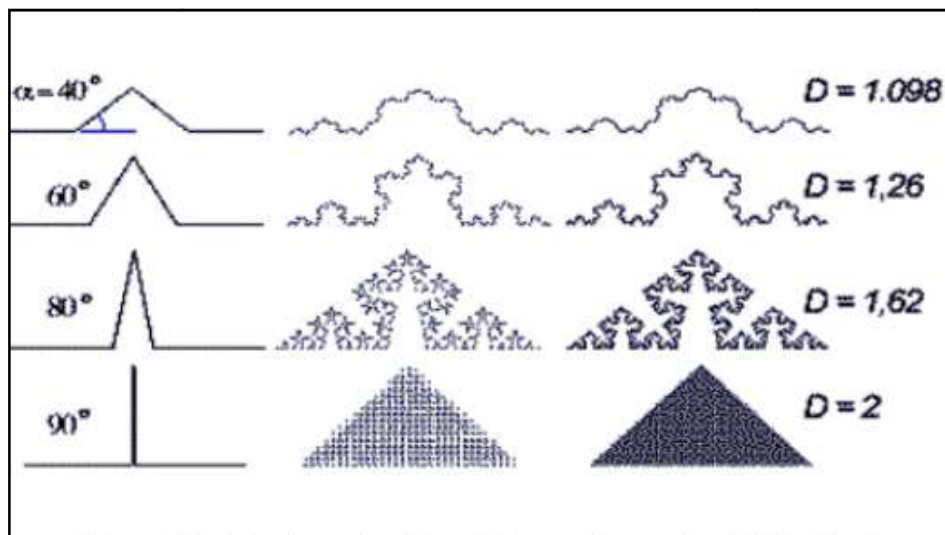


Figure. I.19 : La dimension fractale D pour les courbes de Von Koch (LANTAGNE. K et al. 2002).

I.10 Le calcul de la dimension fractale en génie civil :

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

Les méthodes de calcul les plus courantes sont :

- Méthode des masses.

- Méthodes des lignes parallèles.
- Méthode de compactage des boîtes (box Counting).

On peut aussi accompagner ces dernières par deux méthodes qui sont La méthode Surface-Périmètre (Area-Perimeter) et Méthode du diviseur (Line Divider).

I.10.1 : Surface-Périmètre (Area-Perimeter) :

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 I.20).

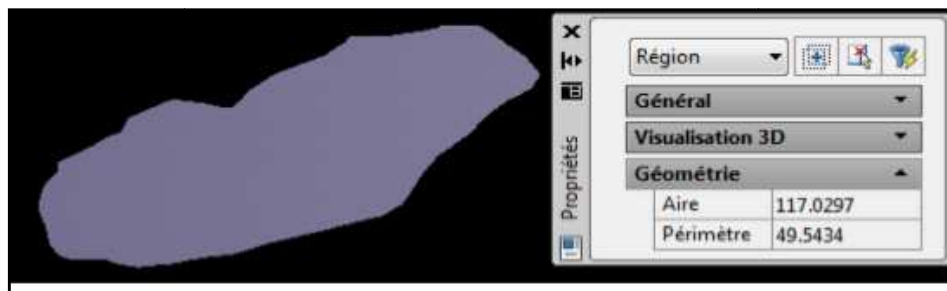


Figure. I.20: Calcul du périmètre et de la surface d'un grain ($\Phi = 6.3$ mm) à l'aide de logiciel Auto-CAD 2009 (BOUZEBODJA. A, 2016).

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 (MANDELBROT. B, 1983) :

$$C = p^{1/DFr} / A^{0.5} \quad (I.1)$$

Dans cette équation « c » est une valeur constante qui décrit la similitude de la forme fractale, P est le périmètre du grain, A est la surface du grain, et le DFR est la dimension fractale de la rugosité moyenne des grains. Prenant le logarithme des deux côtés dans l'équation (I.1), on peut obtenir l'expression

$$(1/DFr) \log p = \log(c \sqrt{A}) \quad (I.2)$$

Faire certains arrangements nécessaires :

$$\text{Log } P = (DF_R/2) (\log c^2 + \log A) \quad (I.3)$$

- Finalement on obtient l'équation suivante :

$$\text{Log } P = K + DF_R/2 (\log A) \quad (I.4)$$

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

$$P = C.A^m \quad (I.5)$$

De l'équation (I.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 I-21), la dimension fractale (DF_R) est ensuite calculée par le rapport :

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

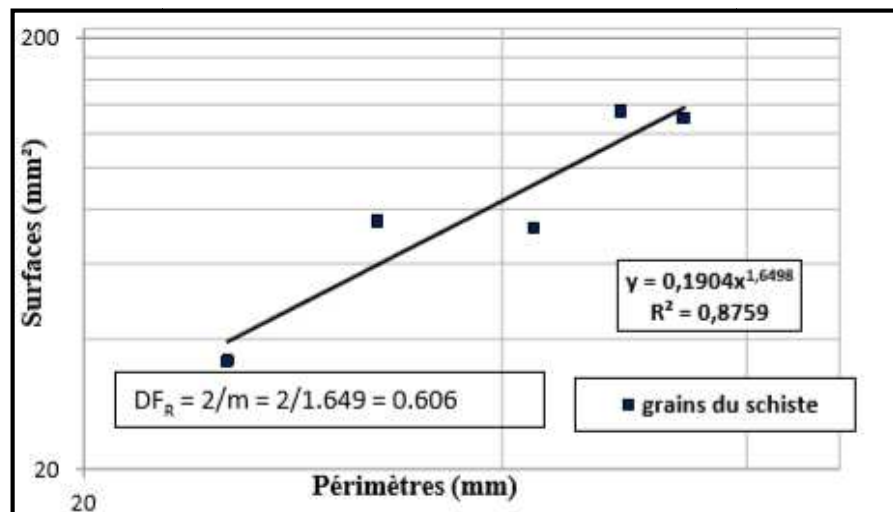


Figure .I.21 : Application de la méthode Surface-Périmètre sur les grains du schist (8 mm de diamètre) (BOUZEBODJA. A, 2016).

I.10.2 Méthode du diviseur (Line Divider)

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 :

$$P(l) = n l^{1-DR} \quad (I.7)$$

Avec :

$P(l)$: périmètre totale de polygone.

(l) : unité de mesure.

DR : dimension fractale du grain étudié.

Cette méthode est particulièrement utilisée dans des images digitalisées (numérisées en noir et blanc) avec des mesures de tailles décroissantes. Traçant le périmètre de polygone P (l) obtenu en fonction de l'unité de mesure (l), la dimension fractale est alors lié à la pente.

« m » de la meilleure droite de régression obtenue en utilisant les données de l'équation et sera calculée comme suit :

$$DR = 1 - m \quad (I.8)$$

Exemple

Soit un grain simple donné dans la figure (I.22), des lignes de mêmes tailles sont reliées entre elles pour former des polygones de différentes tailles à l'intérieur du grain (Figure I.22 b, c, d). Tout le périmètre du grain obtenu est tracé en fonction de l'unité de mesure, et ce rapport est utilisé pour calculer les dimensions fractales de rugosité, comme le montre la figure (I.22).

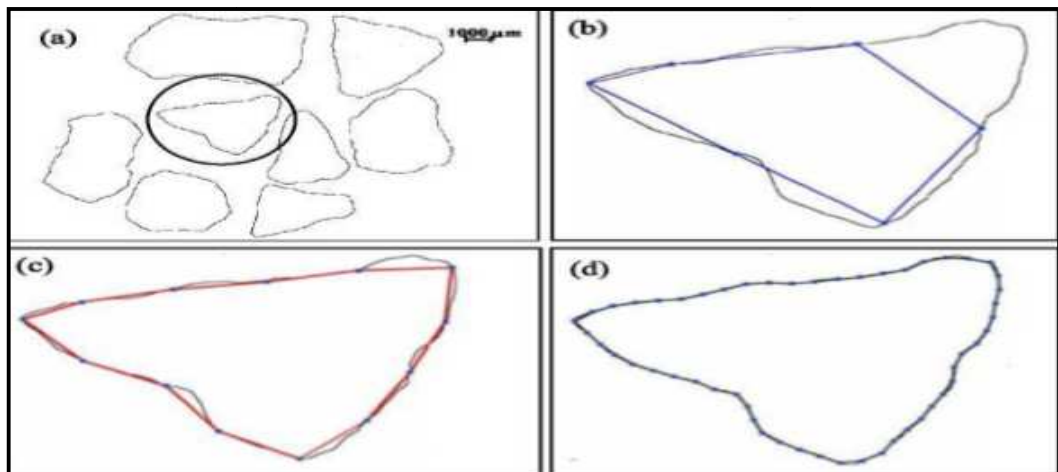


Figure. I.22 : (a) Grain de sable après l'analyse de l'image. (b), (c) et (d) contiennent les polygones tracés sur le grain avec des tailles de mesure respectivement de 2 mm, 1 mm et 0.25 mm. (BOUZEBOUDJA. A, 2016).

A partir de cette méthode, trois types de dimension fractale peuvent être déduits. 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 (D1) dans la figure (I-23-b), la ligne à la droite du point d'arrêt représente la dimension "structurale" de fractale (D2) dans la figure (I-23-b). La dimension totale de fractale (DF_R tot) représente la ligne de l'ajustement normal aux points de repères entiers

(Figure I-23-a), qui ne concernent pas le point d'arrêt des tendances structurales et de textures.

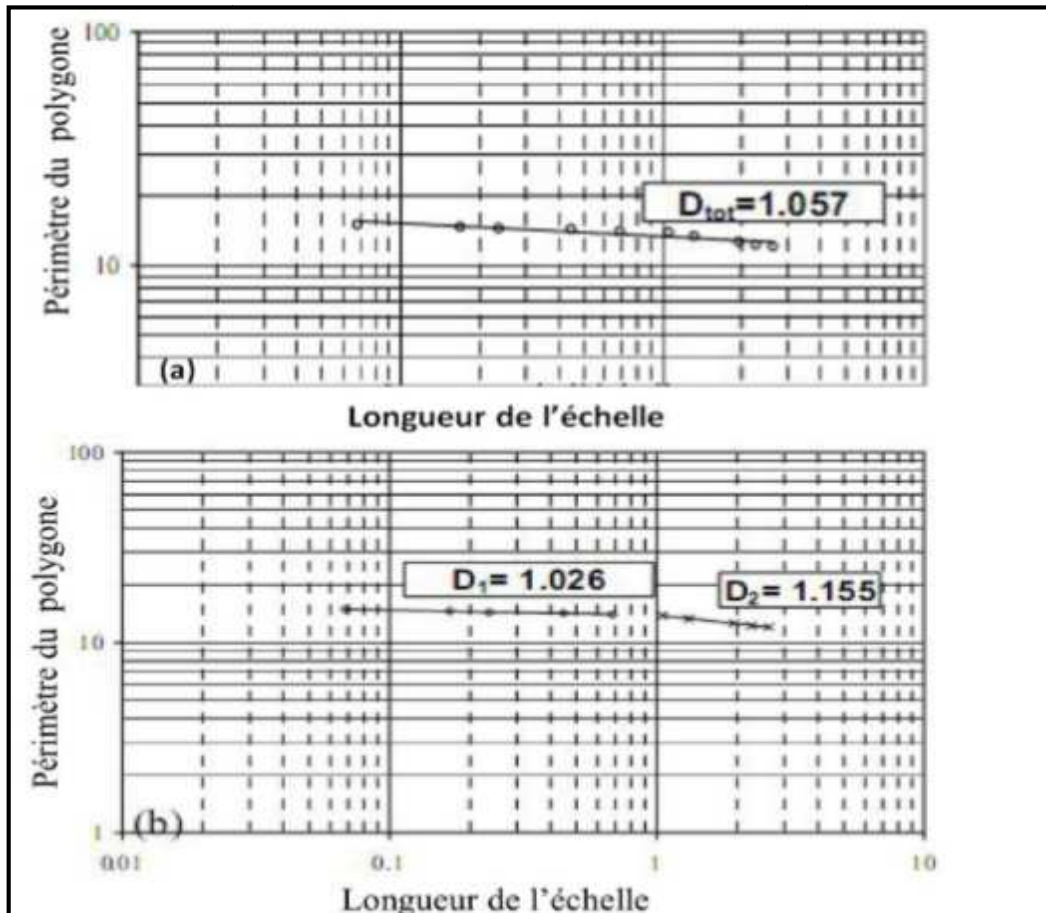


Figure. I.22 : Calcul de la dimension fractale totale en (a), texturale (D_1) et structurale (D_2) en (b) (BOUZEBODJA. A, 2016).

I.10.3 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 I.23), 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 I.23), comme décrit par Vallejo et Hyslip (HYSLIP. J, VALLEJO. L, 1997)

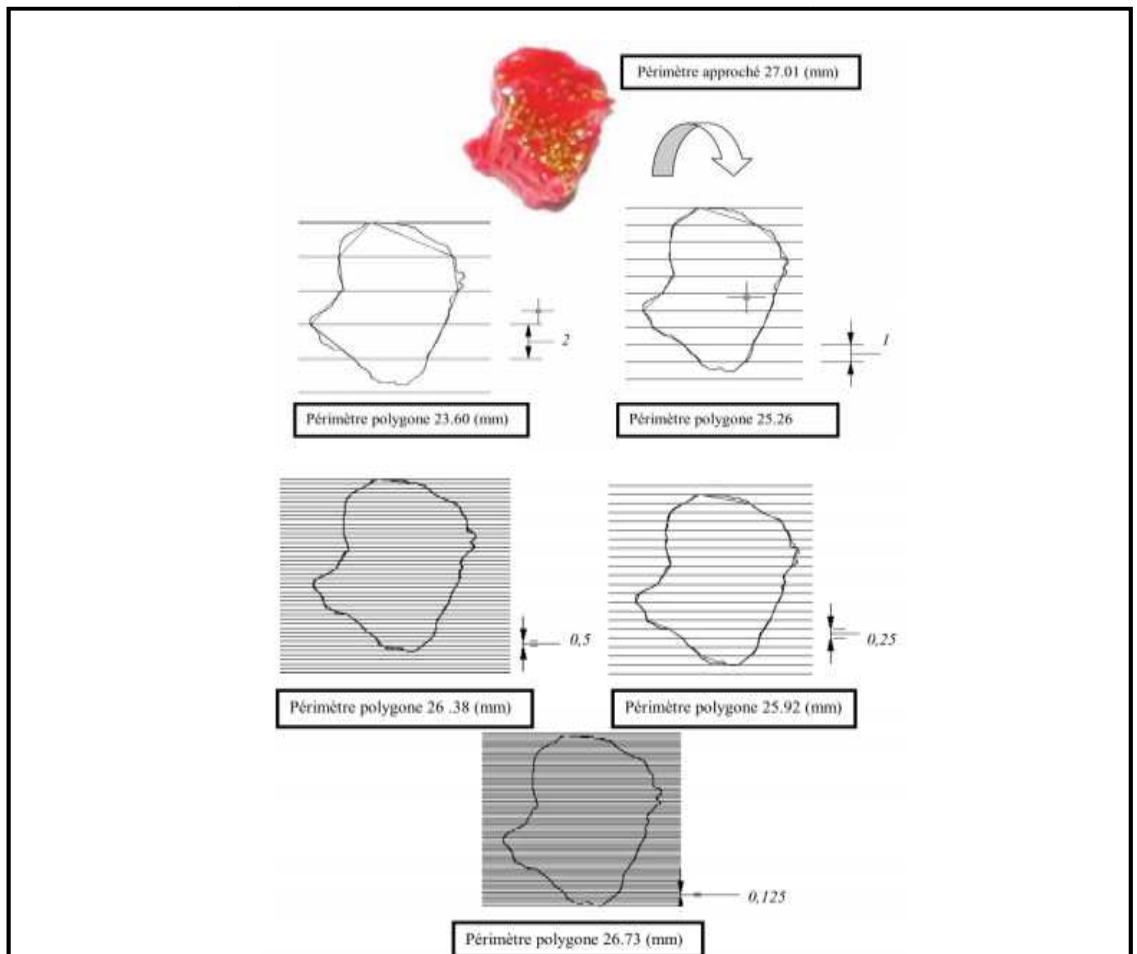


Figure. I.23 : Présentation des exemples sur l'application de la méthode des lignes parallèles sur un grain de 5 mm (YEZLI. S, 2011).

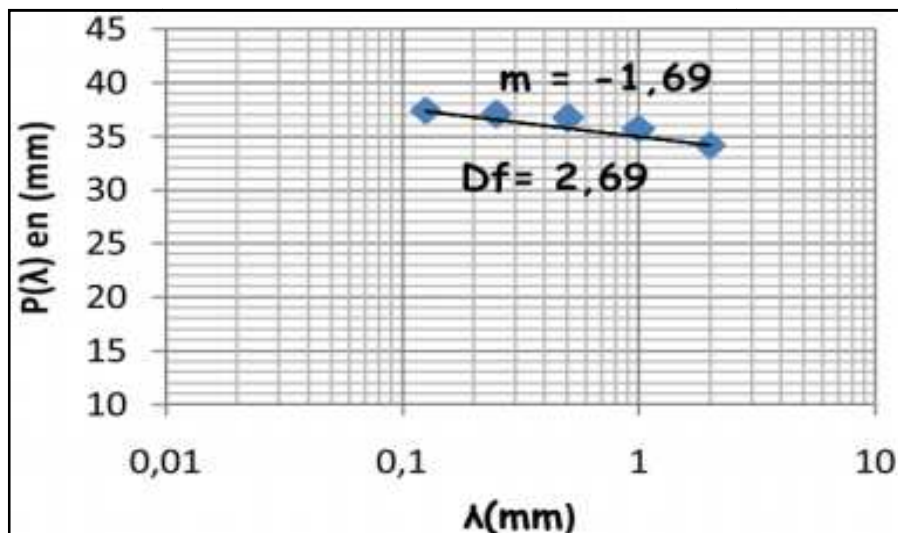


Figure I.24 : Détermination de la dimension fractale par la méthode des lignes parallèles (YEZLI. S, 2011).

I.10.4. Méthode de Comptage des Boîtes (Box Counting ou « BC ») :

Cette méthode a été définie dans le travail de Russel et al en 1980 (RUSSEL et al, 1980), c'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 et ainsi de suite.

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

$$N(X > x) = Kx^{DF_{FR}} \quad (I.9)$$

x : dimension des boîtes ;

X : dimension linéaire des grains plus grande que la dimension x ;

N(X>x) : nombre de boîtes ;

K : constante de proportionnalité ;

DF_{FR} : dimension fractale de fragmentation.

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

$$DF_{FR} = -m \quad (I.10)$$

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

Exemple :

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.

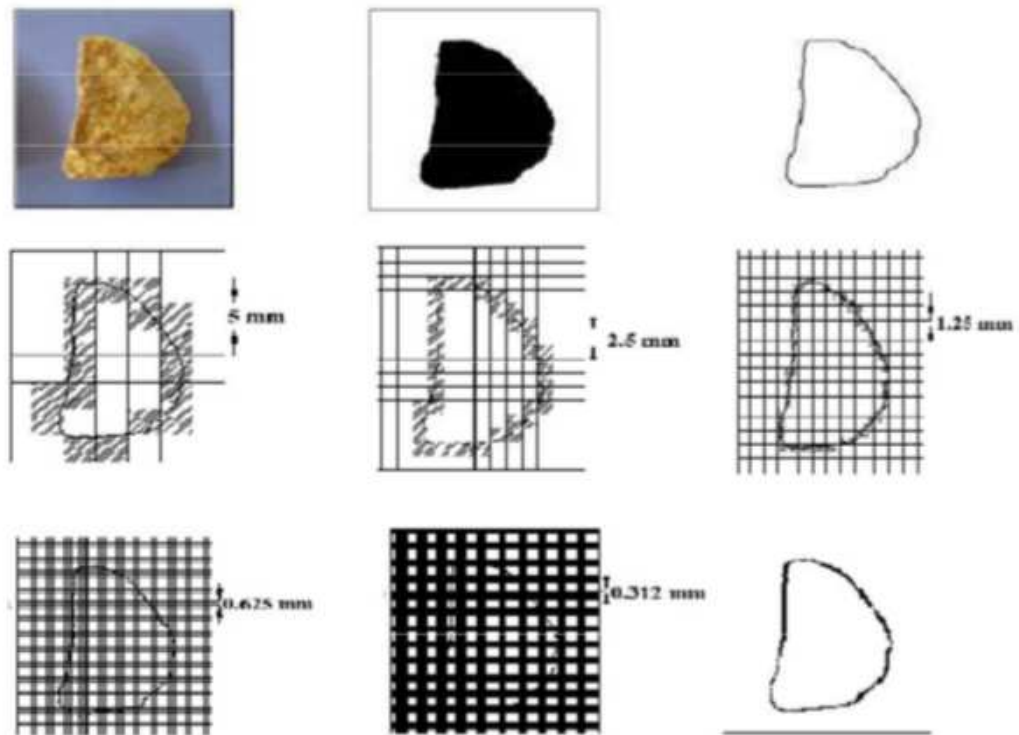


Figure I.25. Différentes étapes de maillage de l'image du grain et illustration de la méthode de Box Counting (OUTAYEB. S, 2016).

I.11 Liaison entre la dimension fractale et les grains de sol :

Le sol est considéré comme étant un milieu à la fois fragmentaire et poreux. Cette notion de modèle fractal met en jeu la définition d'un domaine d'échelle dans le quel une structure fractale est développée, ainsi que de la fragmentation incomplète d'un élément de sol en classes de fractures semblables et un volume résiduel. Les principales prédictions de ce modèle sont illustrées par des données déjà publiées sur des sols de textures différentes.

I.12 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons retracé l'histoire de la géométrie fractale, nous avons rappelé la théorie qui permet de générer des fractales selon la technique *des Iterated functions System (IFS)*. Nous avons décrit aussi les différentes définitions sur les fractales et la dimension fractale.

Nous pouvons constater que la notion fractale est riche et au même temps intéressante de plus de son utilité dans plusieurs domaines. Les fractals sont des images de synthèse obtenu par un procédé de construction graphique très simple répété sur une

large gamme d'échelle durant le temps. D'une manière général, un objet fractal est un objet qui ne peut être complètement décrit par la géométrie euclidienne car il comporte une infinité de détails. La dimension fractale est donc un nombre réel positif caractérisant la manière dont la masse ou la forme de l'objet est répartie dans l'espace et ils existent plusieurs méthodes pour la calculer.

II.1 : Introduction :

Selon le type de l'ouvrage et son mode de conception, le sol peut constituer une base d'appuis pour l'ensemble de l'ouvrage (route, tunnel, barrage poids) ou un point d'appuis pour quelques éléments seulement (bâtiment, pont, barrage en arc). Certains sols en raison de leurs propriétés géotechniques sont considérés comme des sols instables (Argile) créant donc un handicap économique et technique pour les différentes parties impliquées dans ce domaine.

Les conditions climatiques ont pour conséquence de changer les propriétés physiques des sols, ce qui peut entraîner différents dommages notamment aux chaussées routières. Des soulèvements et des tassements différentiels de sol peuvent survenir quand ces derniers d'infrastructure subissent des sollicitations saisonnières (gel/dégel, canicules...etc.). Lorsque sont de nature argileuse, les problèmes se produisent surtout lors des premières périodes de gel et dégel, car avec le temps, ces sols vont s'altérer et leur sensibilité au gel diminue.

Certains sols présentent une détérioration avancée après seulement un hiver. De plus, d'un site à l'autre le phénomène de tassements différentiels est très variable. Deux sites peuvent être séparés de quelques centaines de mètres et dans un cas il peut y avoir mauvais comportements et dans l'autre il peut n'y avoir aucun problème et le tronçon résiste pendant des années avant de se détériorer. C'est ce qui a entraîné la réalisation de plusieurs projets de recherches, en laboratoire et sur le terrain, afin de mieux comprendre l'effet des Conditions climatiques de sur les sols argileux.

II.2 : Identification et classification des sols fins:

II.2.1 : Caractérisation des sols fins:

Les sols fins mous et compressibles (argiles et les vases) sont fréquemment rencontrés. Les problèmes relatifs à ce type de sol est qu'ils subissent des déformations importantes sous les charges qui leur sont appliquées. Leur capacité portante est souvent trop faible pour supporter les charges prévues. Toutes ces caractéristiques nous amène aux problèmes rencontrés dans la pratique à savoir des tassements excessifs et l'instabilité de l'ouvrage.

Les sols fins en général et l'argile en particulier sont constitués d'un ensemble de particules minérales ayant une taille inférieure à 2 μm . Ce matériau a fait l'objet de nombreux travaux sur sa nature minéralogique. Au niveau minéralogique, les argiles sont des

silicates simples ou complexes d'aluminium, de magnésium et de fer. La plupart des minéraux argileux se présentent sous la forme de feuillets, d'où leur nom de *phylithes* ou *phyllo-silicates*. Chaque particule est constituée d'un empilement de quelques dizaines ou centaines de feuillets. La constitution chimique, l'épaisseur et l'écartement des feuillets définissent la minéralogie de l'argile et ses propriétés (NEFZIA, 2012).

En général, trois grands types argiles sont identifiés: *la kaolinite*, *la smectite* et *l'illite*. Dans les sols, ces types d'argiles peuvent être mélangés. La proportion de chacune de ces argiles varie suivant les sols.

II.2.2 Les argiles:

L'argile est une roche sédimentaire composée pour une large part de minéraux argileux, en général des silicates d'aluminium plus ou moins hydratés présentant une structure feuilletée (Phyllo-silicates) expliquant leur plasticité, ou fibreuse (sépiolite et palygorskite) expliquant leurs qualités d'absorption (GLEN.L, 2001).

II.2.3. Obtention de l'argile

Formation Les argiles naissent du sol en constant mouvement. Elles apparaissent selon trois grands processus de formation, juxtaposables. Le premier est relatif à la simple décomposition des roches par érosion. Les phénomènes caractérisant une érosion des sols sont nombreux. La pluie, le vent, le gel, le dégel, les vagues et bien d'autres sont autant de phénomènes naturels à l'origine de la formation des argiles.

Le deuxième processus est appelé néoformation. Ceci correspond à la formation du minéral. Par combinaison, des substances transportées par l'eau du sol vont, par combinaison, s'arranger pour former une structure minérale.

Le troisième mécanisme correspond au processus de transformation des minéraux évoluant par dégradation (perte d'équilibre du sol) ou aggradation (accumulation de sédiments dans un cours d'eau par excès de transport par l'eau) d'ions minéraux argileux.

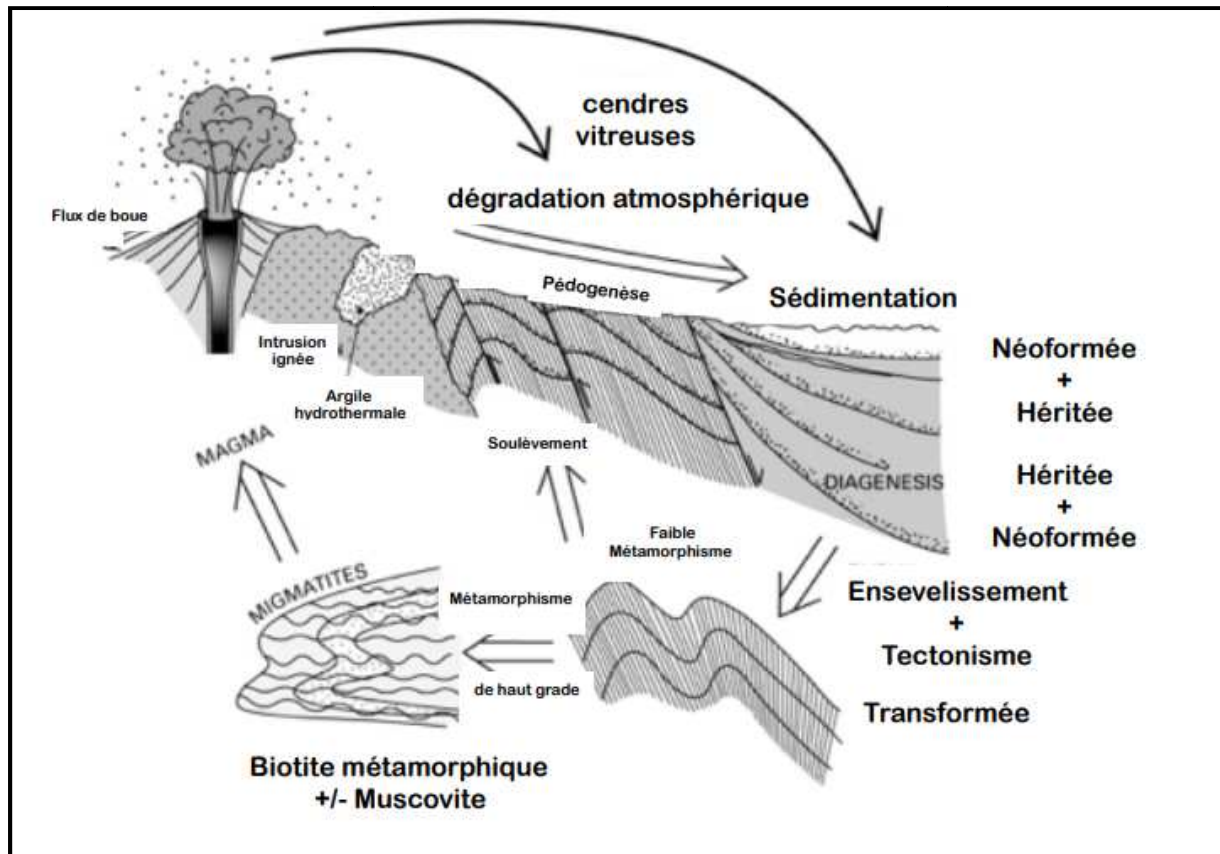


Figure .II.1 Processus de formation de l'argile (NEFZLI.A, 2012).

Les roches argileuses sont présentes presque partout à la surface de la planète, mais leurs propriétés et leur composition diffèrent selon les conditions dans lesquelles elles se sont formées. L'altération de diverses roches, de part les temps géologiques, sont à l'origine des différentes argiles. C'est un ensemble qui caractérise l'argile, le type de roche dont elle est issue, le climat, la topographie du sol, un climat froid provoquera une altération faible de la roche. Les minéraux argileux auront donc une composition similaire à Celle des minéraux provenant de la roche d'origine. C'est le cas des *illites* et des *chlorites*.

Un climat à la fois chaud et humide va entraîner une forte hydrolyse voyant l'obtention des *kaolinites* et des *smectites*.

Un climat tempéré verra un processus d'altération dit modéré s'opérer sur la roche, Il en résultera la création d'argiles de types *illites*, *chlorites* ou encore *vermiculites*, la topographie des sols peut également jouer un rôle dans la composition de l'argile

Inversement, un milieu confiné, comme retrouvé dans les cuvettes, produira des *smectites* par phénomène de concentration.

Les argiles provenant de la dégradation des roches sont des argiles résiduelles. Les roches vont s'accumuler par érosion éolienne ou hydrique entraînant la formation des argiles. (ADRIANNE.P, 2003)

Les argiles fibreuses quand à elles proviennent de croutes de calcaires. Ces zones présentant un climat sec, sont riches en sels, elles peuvent se former en solution, par une richesse ionique. (ADRIANNE.P, 2003) .Une argile néoformée peut évoluer avec son milieu. La transformation va se réaliser par soustraction ou fixation d'ions. Une kaolinite peut donc devenir une chlorite et des smectites, des illites.

II.2.4 Les différents types d'argiles:

Les types d'argiles les plus fréquents sont:

- **Les limons :**

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

- **Les marnes :**

Roche tendre composée en proportions variables d'argile et de calcaire mêlés à du sable, qui a la propriété de se déliter et qui est utilisée selon sa composition pour l'amendement des terres, la fabrication de ciments, de tuiles, de céramiques .On considère, selon leur composition, trois grandes catégories :

- les marnes argileuses qui contiennent 5 à 35 % de carbonate de calcium ;

- les marnes proprement dites et les calcaires marneux avec des taux respectivement de 35 à 65 % et 65 à 95 %, Comme pour les argiles, les marnes argileuses présentent notamment l'inconvénient de craqueler sur une certaine profondeur en cas de sécheresse.

D'une façon générale, les marnes sont une assise de fondations bonne à moyenne en l'absence de gypse. En revanche, elles sont médiocres, voire dangereuses, lorsqu'elles sont très argileuses en affleurement ou lorsqu'elles se situent au-dessus d'une masse de gypse.

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

II.3 : Les minéraux argileux:

Les minéraux argileux sont des particules très fines dont le diamètre équivalent est inférieur à 0,002 mm, ils appartiennent à la famille des **phyllosilicates** (BRINDLEY.G.W et PEDRO.G). Ce sont pour la plus part des, silicates d'aluminium, de magnésium ou de fer dont les atomes sont disposés de façon à former des figures géométriques très régulières. Chaque minéral argileux est formé par l'empilement de cristaux microscopique, qui portent le nom de feuillets.

II.3.1 : Structures cristallines fondamentales des minéraux argileux

Les Feuillet sont l'unité de base des minéraux argileux, ils ont une apparence similaire à celle d'une lame ou d'une feuille extrêmement mince, Ils sont constitués d'unités cristallines que l'on appelle structures fondamentales. Celles-ci se juxtaposent dans un seul plan, et c'est pourquoi les feuillets ont une surface très grande par rapport à l'épaisseur.

On évalue l'épaisseur des feuillets et des structures fondamentales à environ 0,5 nm (5×10^{-7} mm). Il existe deux structures fondamentales: *La structure fondamentale tétraédrique* et la *structure fondamentale octaédrique*. La structure fondamentale tétraédrique est composée de quatre atomes d'oxygène (O) formant un tétraèdre avec en son centre un atome de silicium (SiO_4). Un Feuillet tétraédrique simple résulte d'un arrangement des structures fondamentales tétraédriques. Ces tétraèdres se combinent entre eux pour former des couches tétraédriques.

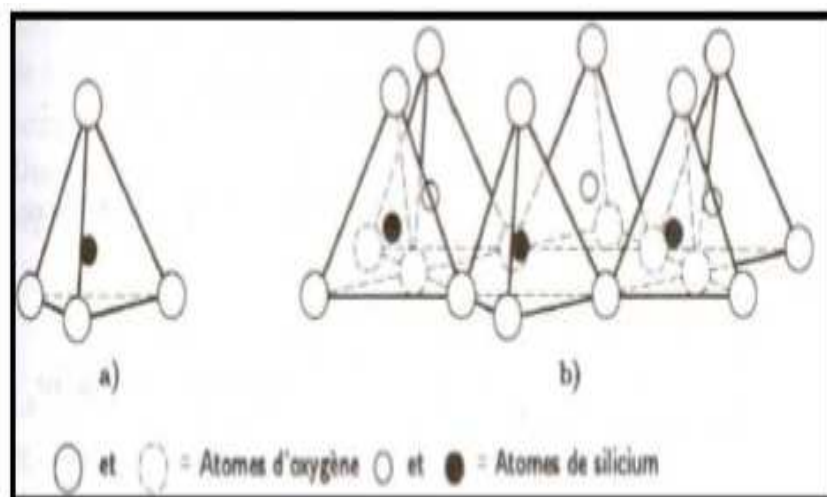


Figure II.2 (a)Tétraèdre de silice ; b) feuillet de silice en tétraèdre (GRIM, 1959).

II.3.2 Les principaux types de minéraux argileux:

II.3.2.1 La kaolinite [Si₂ Al₂ O₅(OH)₄]

C'est une argile blanchâtre, elle est formée de couches élémentaires comprenant chacune un feuillet tétraédrique (silice) et un feuillet octaédrique (aluminium). Les particules de kaolinite contiennent habituellement entre 70 et plus de 100 couches élémentaires, ce qui se traduit par une épaisseur variant entre 50 et 100 nm et qui peut même, dans certains cas, atteindre 2000 nm.

Les couches sont maintenues ensemble par des liens d'hydrogène et les forces de Van der Waals. (Interaction électrique de faible intensité entre deux atomes, molécules, ou entre une molécule et un cristal.) Ces liens d'hydrogène étant très forts, l'eau qui est toujours présente dans les dépôts d'argile s'infiltrer 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.

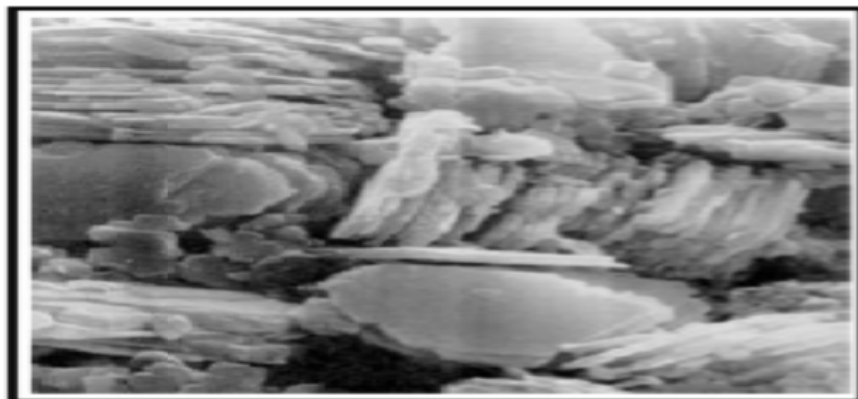
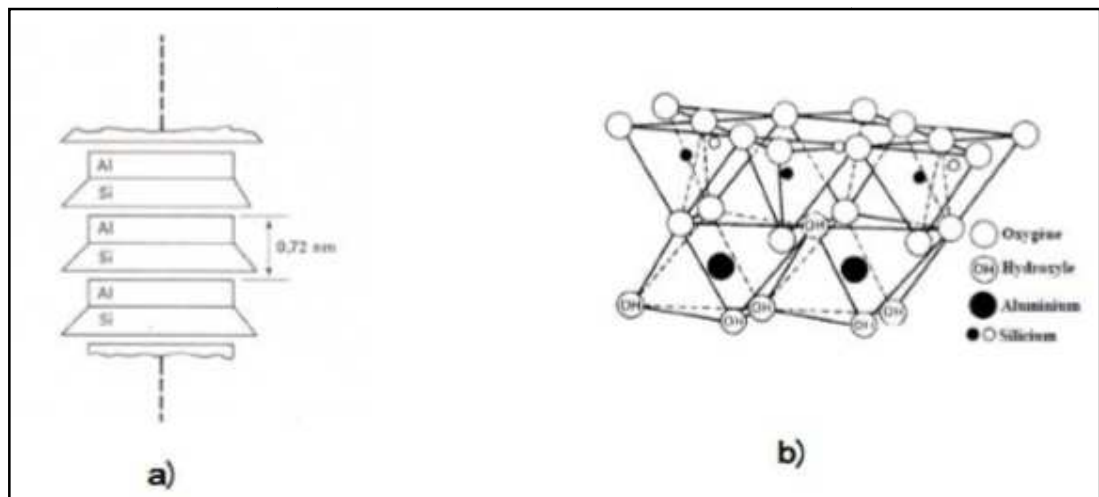


Figure II.4: photographie d'une kaolinite prise au microscope électronique à balayage (MITCHELL, 1976).

II.3.2. 2 La montmorillonite [$\text{Si}_4 \text{Al}(2-x) \text{Mg}_x \text{O}_{10}(\text{OH})_2, n\text{H}_2\text{O}$]

C'est un minéral abondant. 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 *smectite*. Des molécules d'eau fortement attirées vers les surfaces chargées des feuillets tétraédriques assurant les liens entre les couches. Ces liens demeurent cependant plutôt faibles, car lorsque la quantité d'eau augmente dans le sol, les molécules d'eau peuvent s'infiltrer très facilement entre les couches et les séparer. Les particules de montmorillonite comptent généralement entre une et quelques couches élémentaires et ont une épaisseur variant de 1 à 10 nm; elles se rangent parmi les plus fines chez les minéraux argileux. Montmorillonite, on peut aussi citer La *vermiculite* qui est un minéral argileux appartenant au même groupe que la montmorillonite.

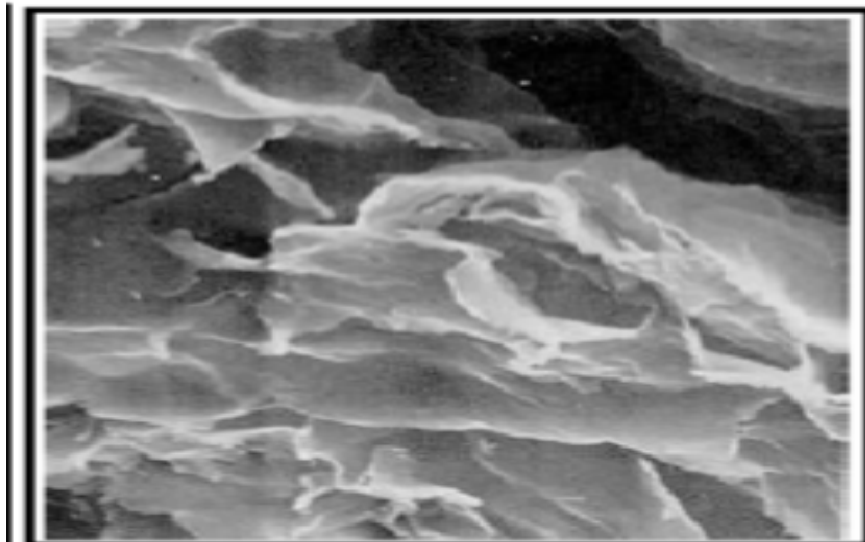


Figure II.5: Photographie d'une montmorillonite prise au microscope électronique à balayage (MITCHELL, 1976).

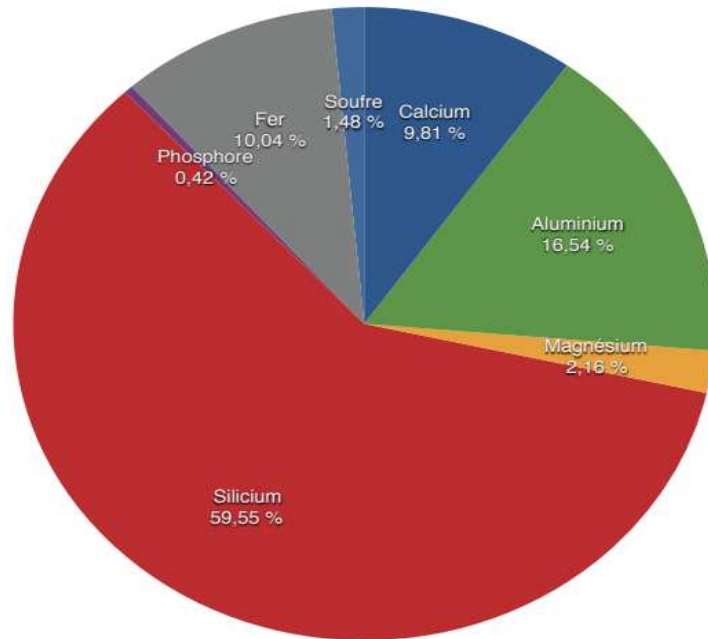


Figure II.6. Analyse chimique d'argile verte type Montmorillonite (ADRIANNE.P, 2003).

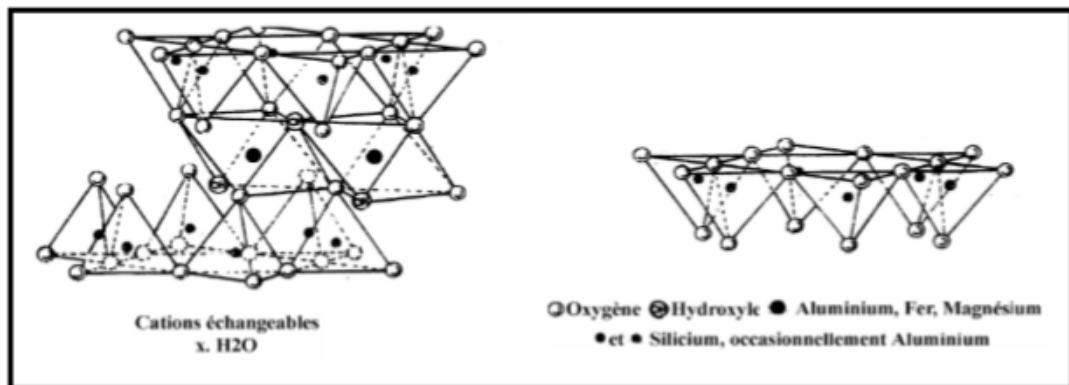


Figure II.7: Vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite (GRIM, 1959).

II.3.3.3 Smectites:

Cette famille d'argile regroupe les montmorillonites, les bentonites, les saponites, les nontronites, les beidelites, (MOORE.D.M et REYNOLDS.R.C, 1989), Ces différentes argiles sont connues pour leur capacité à piéger les molécules d'eau. Elles sont appelées argiles gonflantes. Sous l'action de l'eau, elles peuvent augmenter leur volume jusqu'à 30%. En piégeant l'eau elles fixent aussi des cations permettant les échanges par adsorption. Elles prennent une texture de type gel, pouvant transporter des ions ou des molécules actives.

II.3.3.4 Illite:

L'illite est une autre composante importante des sols argileux, elle a une structure analogue à la montmorillonite mais il ya des ions de potassium intercalés entre les feuillets tétraédriques. Grâce à ces ions la liaison est relativement forte et les molécules d'eau ne peuvent pratiquement plus s'intercaler. Aux extrémités de la particule d'argile, il y a également des déséquilibres électriques et adsorption de cations .Ces cations dits échangeables jouent un rôle important dans le comportement des argiles .

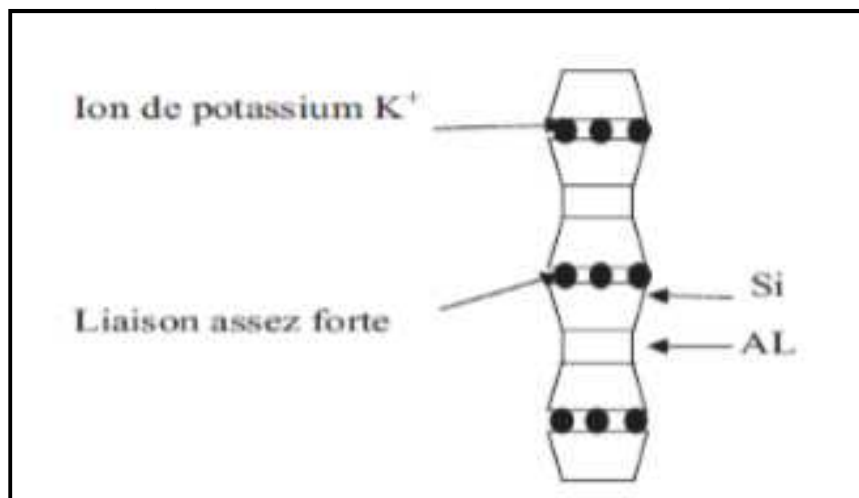


Figure. II.8 Structure d'illite (LAMBE, 1953).

II.3.3.5 Vermiculites:

Les vermiculites sont des argiles ayant une origine volcanique, riches en magnésium. (OLIVA.J et COURGEY.P.S, 2010), Elles sont formées par hydratation de minéraux basaltiques. Lorsqu'elle est chauffée, elle éprouve un phénomène de dilatation, la rendant particulièrement utile comme isolant thermique pour les constructions, ce matériau ayant une faible masse, une incapacité à bruler et étant imputrescible et inaltérable. (OLIVA.J et COURGEY. P.S, 2010).

Nom	Type	Nombre de feuillets par particule	Diamètre d'une particule (µm)	Epaisseur d'une particule (µm)	Surface spécifique en m ² /g	C.E.C. en meq/100g
Kaolinite	1:1	100 - 200	0,1 - 4	1 - 10	10 - 20	3 - 15
Illite	2:1	1 - 10	0,1 - 1	0,003 - 0,01	65 - 100	10-40
Montmorillonite (smectite)	2:1	1	0,1	0,001	700 - 840	80 - 150
Chlorite	2:1:1	1	0,1	0,005	800	10-40

Figure II.9. Caractéristiques des argiles (JASMUND et LAGALY, 1992).

II.4 : Généralités sur le changement climatique:

Au cours des trois dernières décennies du XXe siècle, de nombreux scientifiques ont affirmé que le changement climatique pourrait entraîner des changements importants menaçant l'existence même de l'homme sur la planète.

Cependant, certains prétendent que le changement climatique n'a rien de nouveau sur la planète et qu'il existe depuis des temps immémoriaux (BRYSON, 1974; SPENCEER et CHRISTY, 1990 et RALPH, 2012). D'autres pensent que le changement climatique dans la composition de l'atmosphère a atteint un danger irrévocable (SOLOMON,2009; ALLEN,2009 et CAMUFFO,2010). Entre ces points de vue extrêmes, de nombreuses hypothèses ont été émises et qui diffèrent dans leurs concepts et leurs conclusions.

Peut-être que la raison principale de ces différences serait liée à la nature complexe de la question du changement climatique et à l'absence de données suffisantes pour formuler une théorie avec suffisamment de précision, l'importance du problème n'a été reconnue par les organisations internationales que vers 1980 et ce n'est qu'en 1988 qu'a été créé le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC/IPCC en anglais).

Selon les experts du Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), le changement climatique peut être défini comme toute modification durable (de quelques décennies à des millénaires) des paramètres du climat, qu'elle soit due à la variabilité naturelle ou à l'activité humaine (GIEC, 2007).

II.3. Climat et système climatique:

Le climat, selon la définition de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) est la synthèse des conditions météorologiques dans une région donnée, caractérisée par les statistiques à long terme des variables de l'état de l'atmosphère.

Le climat à la surface de la terre est régi par les lois du système climatique. Ce dernier est un système dynamique complexe dont les composantes interagissent entre elles en permanence. Ses différentes composantes sont principalement constituées de l'*atmosphère*, la *lithosphère* (surface terrestre), l'*hydrosphère* (lacs, mers, océans et autres plans d'eau), la *cryosphère* (les glaces du monde entier) et la *biosphère* (l'ensemble des êtres vivants, en particulier la végétation, ainsi que la matière organique des sols). Ces cinq (05) composantes sont en interaction permanente par l'intermédiaire de phénomènes physiques, chimiques et biologiques tels que le rayonnement, le cycle de l'eau, le cycle du carbone, le transfert de chaleur, de mouvement, etc (Figure II.10).

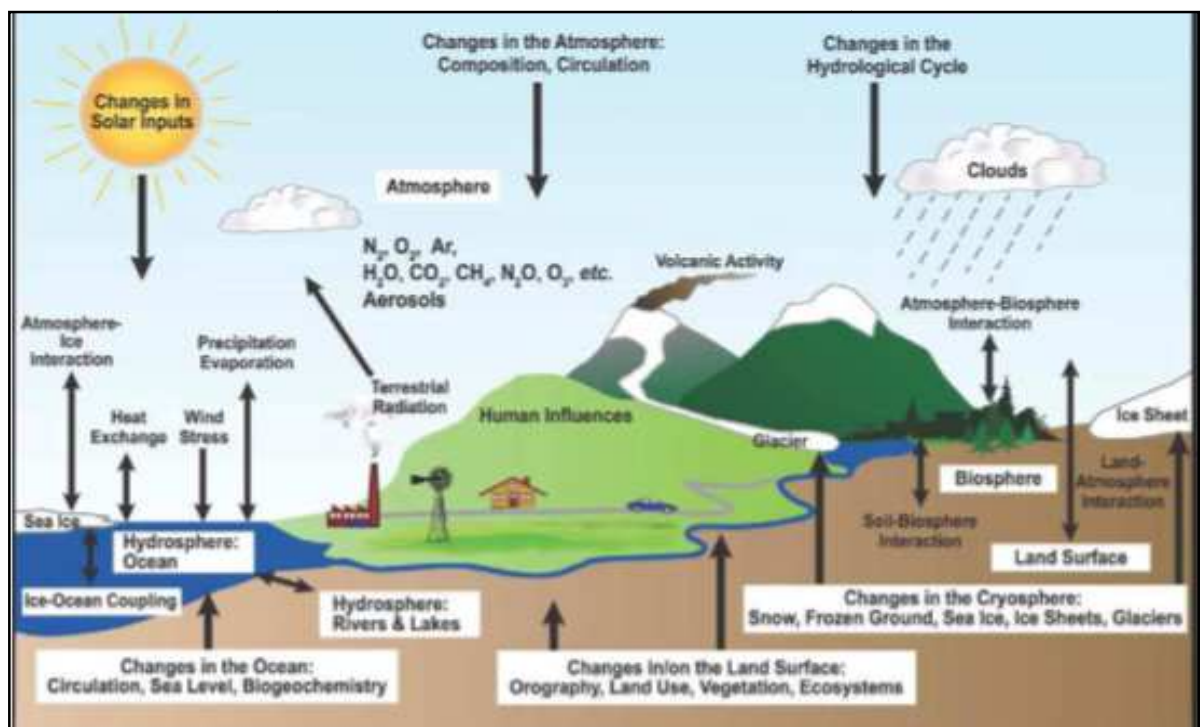


Figure II.10 Le système climatique. Description schématisée des composants du système climatique et de leurs principales interactions (GIEC, 2007).

II. 4. Climat et cycle de l'eau:

Le cycle de l'eau et le climat sont intimement liés, cette relation prend néanmoins une nouvelle importance dans le contexte du changement climatique. Prévoir l'évolution du

climat dans les prochaines décennies, nécessite une bonne compréhension des processus du cycle hydrologique. D'autre part, le changement du climat s'accompagnera certainement de modification du cycle de l'eau.

Le cycle de l'eau contribue au sein du système climatique à assurer les transferts d'énergie nécessaires au maintien de son équilibre. Ce cycle, transporte de l'eau, mais aussi de l'énergie sous forme de chaleur latente, principalement dans la vapeur d'eau

Lorsqu'elle s'évapore, l'eau absorbe de l'énergie qui est libérée ultérieurement au moment de la condensation.

En effet, la vapeur d'eau étant le principal gaz à effet de serre de l'atmosphère, elle intervient de manière importante dans le bilan radiatif terrestre, sans négliger l'importance de l'effet des nuages qui réfléchissent le rayonnement solaire incident vers l'espace, provoquant ainsi un refroidissement, mais ils piègent également le rayonnement infrarouge émis par la Terre, provoquant ainsi un réchauffement. Selon les propriétés optiques des nuages, leur altitude et leur localisation, ils peuvent contribuer à réchauffer ou à refroidir la surface de la Terre. Cette rétroaction est une des principales sources d'incertitude dans l'évaluation du climat future.

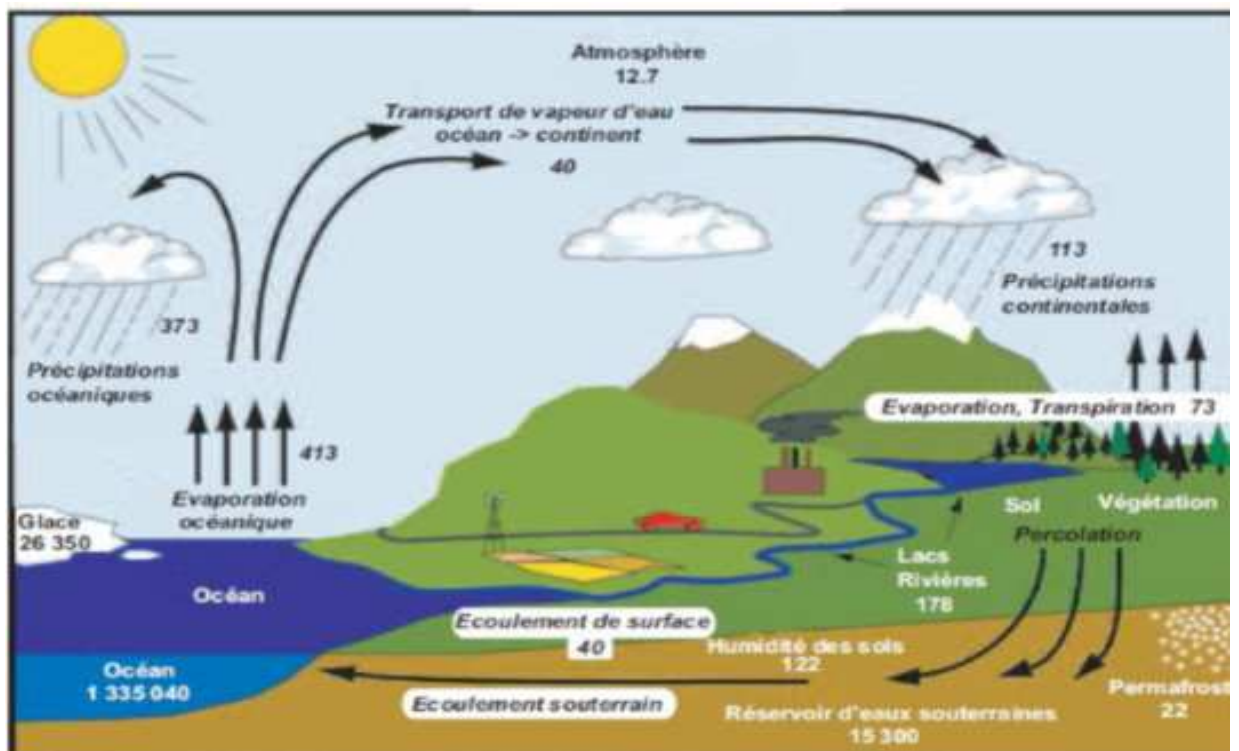


Figure II.11: Le cycle global de l'eau (TRENBERTH, 2006).

II.5. Le changement climatique dans la région méditerranéenne:

La Méditerranée sera particulièrement touchée par le changement climatique au cours du XXIème siècle (GIORGI, 2006). La température a augmenté de 0.8 °C selon les régions. La hausse est surtout sensible avant 1940 et après 1970. Elle est particulièrement sensible en Afrique du Nord avec près de 2°C. Pendant les années 1980 et 1990, le réchauffement a été plus prononcé au niveau du bassin Méditerranéen, avec une hausse plus importante en hiver, surtout en ce qui concerne les températures minimales (NICHOLSON, 2001 et COLLINS, 2011). Les précipitations ont diminué avec une baisse de 20 % dans certaines régions (CISLAGHI, 2005 et ALPERT, 2008). Au niveau de l'Afrique du Nord, la tendance est plus contrastée (BORN, 2008).

La hausse des températures et l'accentuation des périodes de sécheresses modifieront la répartition spatiale et temporelle des précipitations et, par suite, des ressources en eau. Ceci, combiné aux fortes pressions anthropiques sur l'environnement et aux demandes en eau sans cesse croissantes, rendra la satisfaction des besoins en eau pour les différents usages de plus en plus difficile à assurer. Des tendances à la diminution des précipitations ont été détectées à différentes échelles spatio-temporelles (TRIGO, 2000-2001; NORRANT et DOUGUEDROIT, 2005 et TRENBERTH, 2007), en enregistrant une baisse de l'ordre de 20 % dans certaines régions.

Dans la deuxième moitié du XXème siècle, la demande en eau a doublé et elle pourrait encore s'accroître de 20% d'ici 2025. Dès lors, les questions relatives à la gestion des ressources en eau se posent de manière accrue (MARIANNE, 2010).

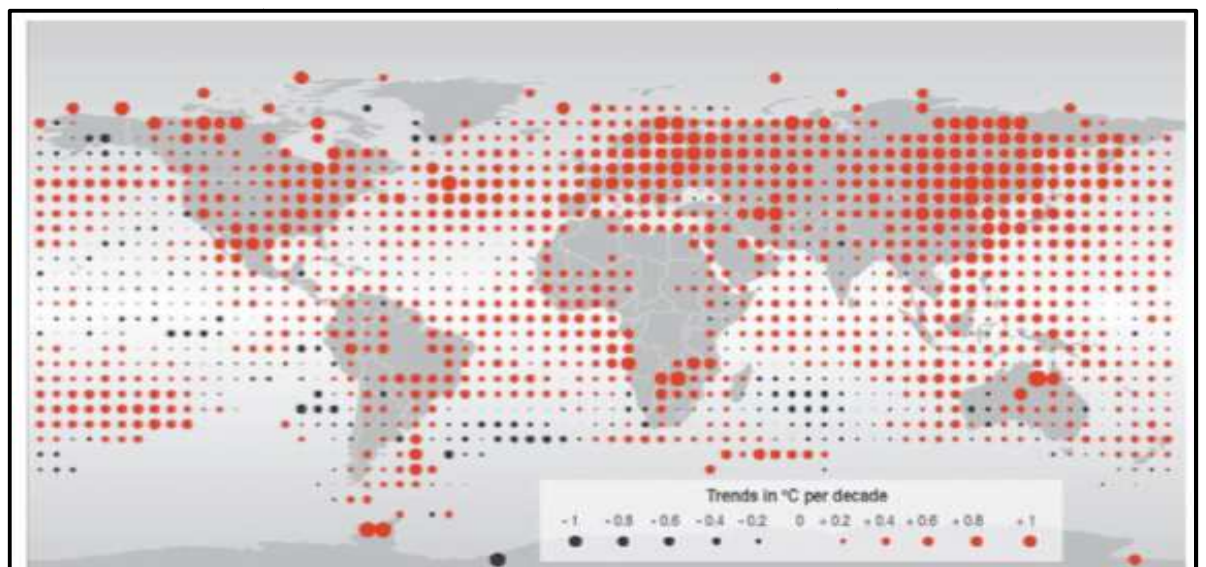


Figure II.12: Vue d'un réchauffement de la planète: une représentation du changement de température, par région, 1976-2000 (HENSON, 2008).

II.6 : Comportement des sols soumis au gel et dégel:

Les sols peuvent subir des endommagements lorsque l'eau présente dans les pores gèle et augmente de volume. Deux phénomènes doivent particulièrement être suivis; l'apparition d'eau gelée dont la masse volumique plus faible que celle de l'eau liquide peut entraîner des gonflements du milieu poreux et la migration d'eau par diffusion à travers la structure poreuse vers les zones gelées, appelée cryosuccion, le degré de saturation en eau et la vitesse de refroidissement sont des facteurs qui ont une forte influence sur la façon dont le gel va se manifester.

II.6.1 Les mécanismes se développant dans les sols fins:

Les phénomènes de gel et de dégel affectent les propriétés mécaniques des sols selon deux processus disjoints et complémentaires:

- La gélifraction.
- La cryosuccion.

❖ La gélifraction:

- La gélifraction un phénomène qui se traduit par la rupture des grains ou des liaisons inter granulaires sous l'action des contraintes thermiques et/ou des forces développées par la congélation de l'eau et son accroissement de volume.

- La notion de « gélivité » est en général associée aux essais de gélifraction des sols.

❖ La succion cryogénique

- La succion cryogénique est un phénomène de dépression et d'aspiration d'eau qui se développe au niveau de l'interface eau-glace. La dynamique du changement d'état eau liquide-glace crée un champ de pression qui entraîne l'eau vers la zone de congélation

- Le terme de « sensibilité au gel », est généralement employé pour les essais de gonflement au gel.

- Suivant les sols, le gel désorganise ou non le squelette du matériau par le phénomène de succion cryogénique.

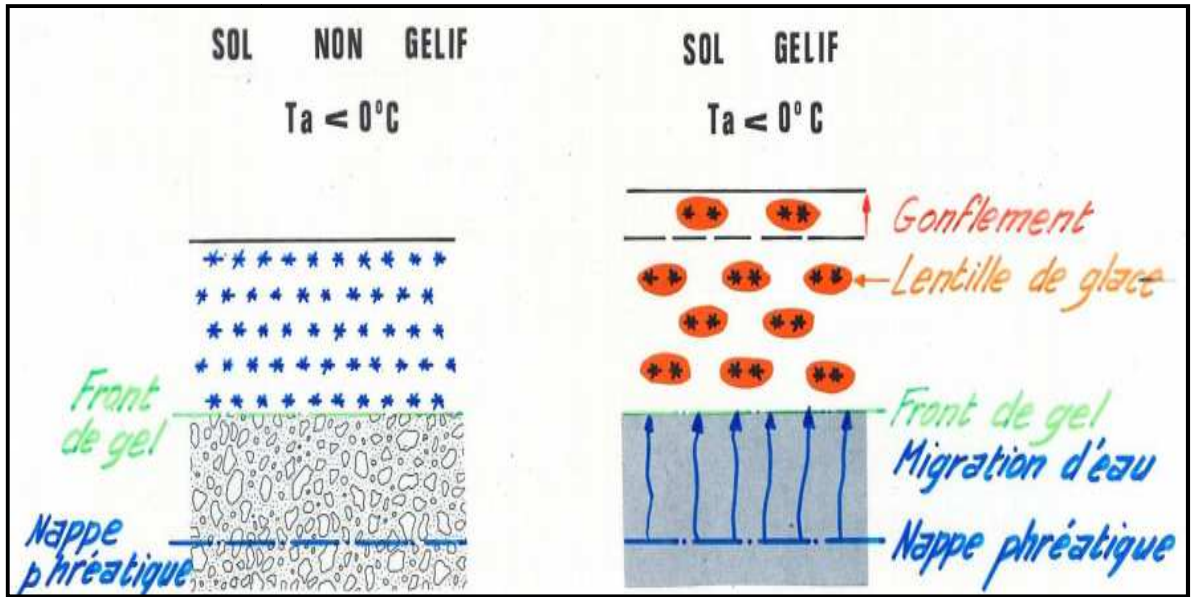
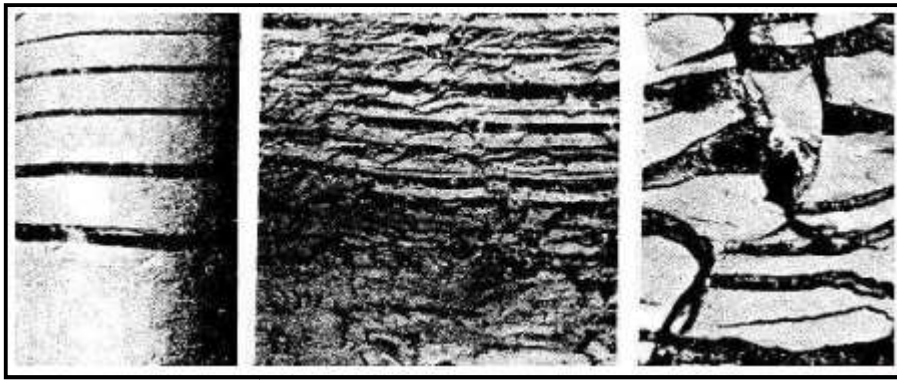


Figure.II.13. Le gel dans les deux types de sols.



Pénétration du gel dans le sol



Front de gel-lentille de
glace.

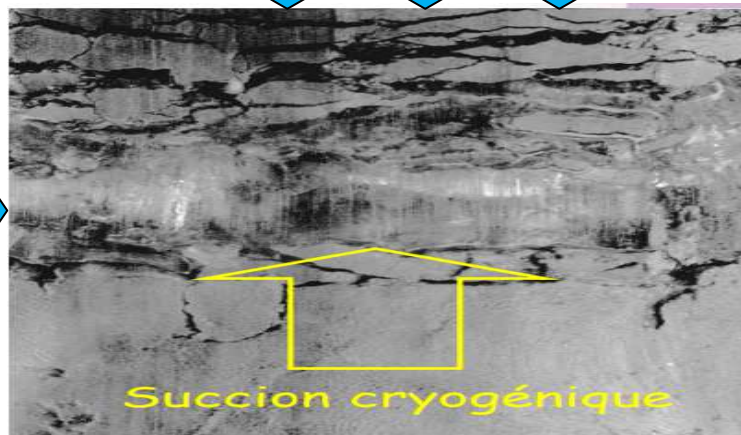


Figure II.14 Comportement des sols soumis au gel et au dégel.

II.6.2 Processus liés au gel-dégel :

Le gel se produit lorsque la température s'abaisse à 0°C ou au-dessous (aspect thermique), il se forme par transformation de l'eau en glace (aspect physique).

Cinq conséquences majeures liées à ce processus peuvent être relevées :

1. Un important transfert d'énergie sous forme de chaleur latente se produit lors du changement de phase de l'eau en glace (et vice-versa). D'énormes quantités d'énergie sont ainsi libérées lors du gel et absorbées lors du dégel. En conséquence, la température du sol se stabilise pour un certain laps de temps au point de congélation (0°C) : *c'est la phase zéro.*

Cette phase est détectable au printemps lors de la fonte du manteau neigeux et parfois en automne lorsque le sol commence à geler. La température du sol ne pourra s'abaisser/s'élever au-dessous du point de congélation qu'une fois toute l'eau transformée en glace (et vice-versa notamment à la fonte des neiges). En l'absence d'humidité dans le sol, il n'y a pas de phase de stabilisation à 0°C. Ce cas de figure est observé par exemple dans un matériau rocheux poreux à l'intérieur duquel les eaux ne peuvent stagner.

2. Lors du gel, on assiste à une augmentation du volume de l'eau (+ 9%) et parfois du matériel gelé (soulèvement gélival, soulèvement du sol). Le sol gelé a tendance à se soulever parallèlement à la progression du front du gel. Inversement, il s'affaisse lors du dégel. D'un cycle gel/dégel à l'autre, un bloc peut ainsi migrer vers la surface.

3. La cryosuccion (ou cryo-osmose) est un processus de succion survenant lors de la congélation. Lorsqu'un sol est en train de geler, l'eau interstitielle des terrains avoisinants (par ex. d'une nappe phréatique) va être aspirée vers les cristaux de glace en voie de croissance. Ce processus explique notamment la ségrégation des lentilles de glace.

Lors du gel, des processus contradictoires peuvent agir en même temps :

4. D'une part, on peut assister à une augmentation de la cohésion (cimentation) de l'ensemble du matériel gelé. De la glace remplit l'ensemble des interstices (sans glace, le matériel est meuble)

5. En parallèle, une désolidarisation (altération mécanique) des matériaux lithologiques ou pédologiques peut avoir lieu (ex : gélifraction, aiguilles de glace...).



Figure II.15 – Relief acéré caractéristique de la prédominance des processus de gélifraction (SALEINAZ, VS).



Figure II.16 – Désagrégation d'une paroi rocheuse sous l'effet de la gélifraction (SAASTAL, VS)

II.7 Action du gel et dégel sur une chaussée routière :

Les figures I.17 et I.18 résument bien le processus de gel et dégel dans une chaussée routière. En conditions hivernales, la température à la surface du sol est en général sous le point de congélation. La température en dessous de 0 °C entraîne le gel progressif des couches de la chaussée, du haut vers le bas.

La chaussée (fondation et sous-fondation) est composée de sols granulaires qui se drainent bien et qui ne sont pas gélifs. Lorsque le gel pénètre dans la structure de chaussée, il

n'y a pas vraiment de variations de volumes. Par contre, le sol d'infrastructure peut être touché par la propagation du gel qui se produit généralement jusqu'à 1.00 à 2.00 mètres de profondeur par rapport à la surface du sol. Les sols fins sont plus susceptibles de démontrer des problèmes face au gel, car ils permettent la formation de lentilles de glace au contact du front de gel. La formation de lentilles de glace dans les sols nécessite la coordination de ces trois conditions : *des températures sous 0 °C, une alimentation en eau et un sol gélif*.

Le développement de lentilles de glace a pour effet de soulever de façon inégale la surface de la route. Le soulèvement différentiel est aussi engendré par la pénétration inégale du gel sous une chaussée. Les amas de neige laissés par le déneigement en bordure d'une chaussée représentent un bon isolant qui a pour effet de limiter la propagation du gel en bordure de la route (Figure I.17). Le front de gel atteint ainsi une profondeur maximale au centre de la chaussée et c'est ce qui entraîne un soulèvement plus important à cet endroit.

Le revêtement bitumineux qui se retrouve courbé par l'effet du soulèvement de la chaussée est fortement sollicité en tension au centre de la chaussée. Ces déformations du revêtement peuvent provoquer des fissures longitudinales qui se retrouvent généralement au centre de la chaussée où le soulèvement est maximal (ALDALATI.R, 2014).

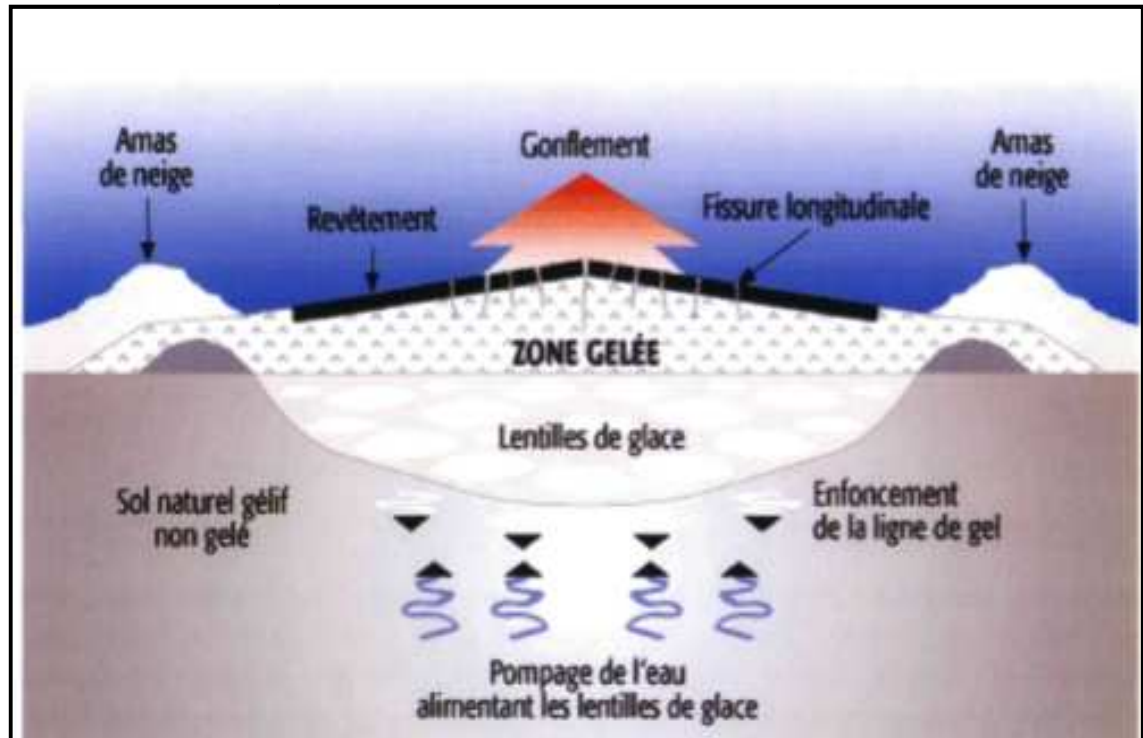


Figure II.17 : Action du gel sur une chaussée routière (ALDALATI.R, 2014).

L'action du dégel sur la chaussée entraîne aussi divers problèmes en ce qui concerne la qualité de la surface de roulement. Lorsque la température de l'air monte au-dessus de 0 °C, le dégel de la chaussée s'effectue de la surface de la chaussée vers le sol d'infrastructure. Les couches de la chaussée qui ont dégelé se retrouvent gorgées d'eau qui provient de la fonte des lentilles de glace. Cet apport d'eau, qui ne peut être drainé par les couches sous-jacentes gelées, fait en sorte d'augmenter le risque de pressions interstitielles en excès sous la chaussée. Les pressions interstitielles réduisent la contrainte effective, la rigidité et la résistance du sol. C'est à ce moment que la chaussée devient très susceptible au développement d'ornières structurales et de fissures de fatigue (Figure II.18).

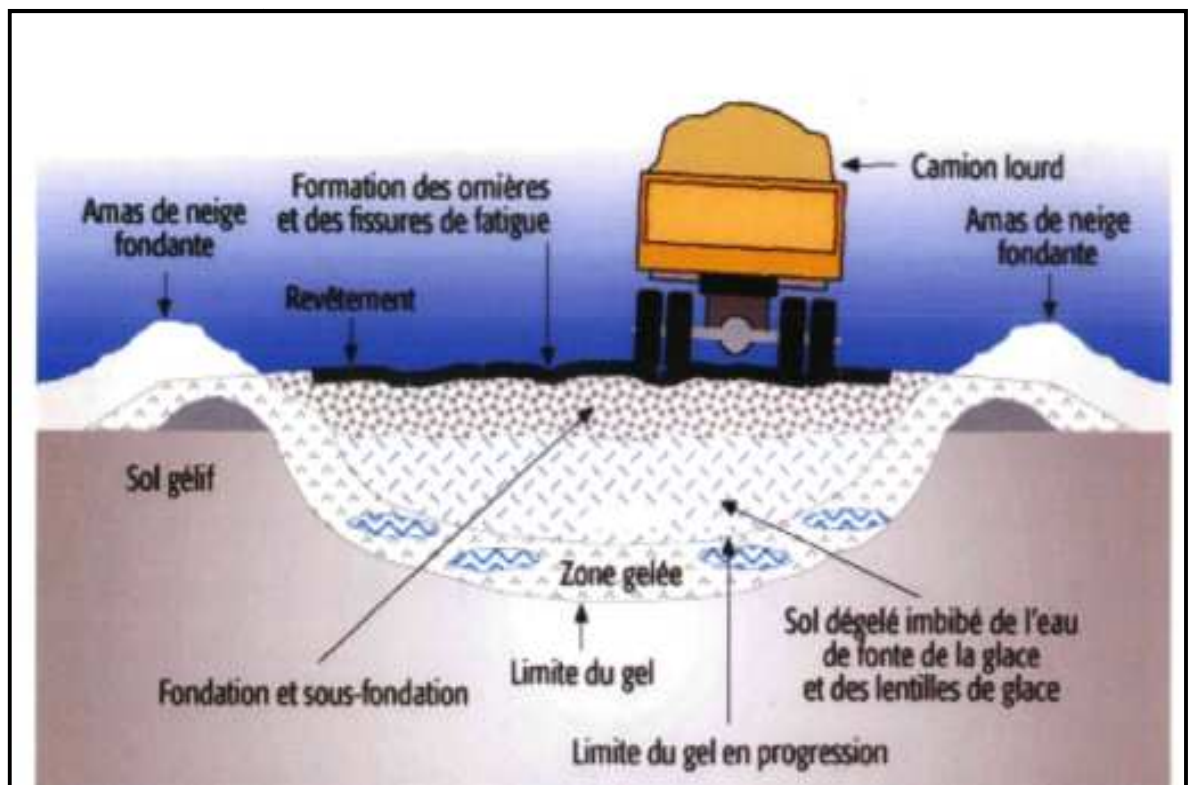


Figure II.18: Action du dégel sur une chaussée routière (ALDALATIR, 2014)

II.8 Phénomène de gonflement :

Ce phénomène est lié au changement d'humidité de certains sols très argileux ou tourbeux qui sont capables de fixer l'eau disponible mais aussi de la perdre en se rétractant en cas de sécheresse. Le retrait-gonflement est un mouvement de tassement différentiel du sol spécifique aux terrains argileux (les argiles sont gonflantes et varient en fonction de leur teneur en eau) ; la variation de volume d'un terrain est consécutive à l'alternance des sécheresse (déshydratation superficielle) et des périodes pluvieuses (réhydratation), et elle provoque des désordres dans les constructions (fissuration, décollement d'élément jointifs).

II.8.1 : Pourquoi les sols gonflent-ils et se rétractent-ils ?

Le matériau argileux présente la particularité de voir 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 se 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 phénomènes de capillarité, sont à l'origine de ce comportement. Les variations de volume des sols argileux répondent donc à des variations de teneur en eau (on notera que des variations de contraintes extérieures telles que les surcharges peuvent, par ailleurs, également générer des variations de volume). Tous les sols présentent la particularité de contenir de l'eau en quantité plus ou moins importante :

- De l'eau de constitution, faisant partie intégrante de l'organisation moléculaire des grains formant le sol
- De l'eau liée (ou adsorbée), résultant de l'attraction entre les grains et l'eau (pression de succion). On peut se représenter cette couche adsorbée comme un film visqueux entourant le grain
- Une eau interstitielle, remplissant les vides entre les grains du sol (lorsque ceux-ci sont entièrement remplis, le sol est dit saturé).

La part respective entre ces différents « types » d'eau, très variable, dépend de la nature du sol et de son état hydrique. En fonction de cette répartition, les sols auront une réponse différente vis-à-vis des variations de teneur en eau. Plus la quantité d'eau adsorbée contenue dans un sol est grande, plus celui-ci est susceptible de « faire » du retrait.

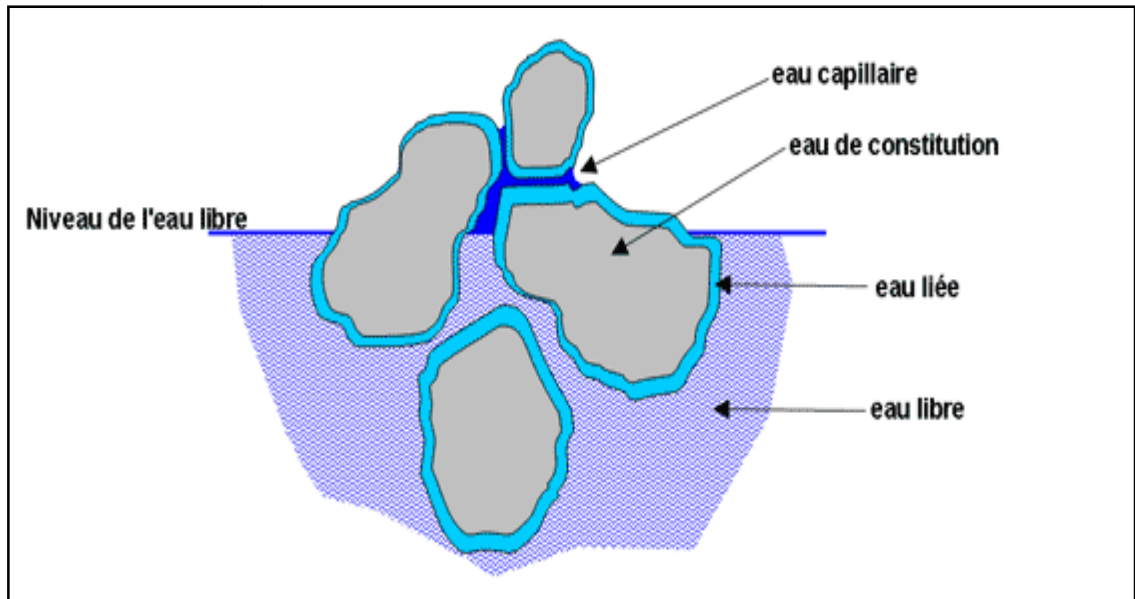


Figure II.19: Les formes de l'eau dans le sol. Une vue schématique.

II.8.2 Pourquoi spécifiquement les sols argileux ?

Les caractéristiques de la structure interne des minéraux argileux expliquent leur comportement face aux variations de teneur en eau :

- Ils présentent en effet une structure minéralogique « en feuillets », à la surface desquels les molécules d'eau peuvent s'adsorber sous l'effet de différents phénomènes physico-chimiques, et ce de façon d'autant plus marquée que les grains du sol, fins et aplatis, ont des surfaces développées très grandes. Il en résulte un gonflement, plus ou moins réversible, du matériau. L'eau adsorbée assure les liaisons entre les grains et permet les modifications de structure du sol lors des variations de teneur en eau ;

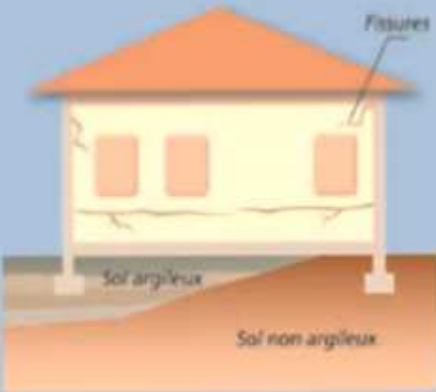
- Certains grains argileux peuvent eux-mêmes voir leur volume changer, par variation de la distance entre les feuillets argileux élémentaires, du fait d'échanges d'ions entre l'eau interstitielle et l'eau adsorbée ;

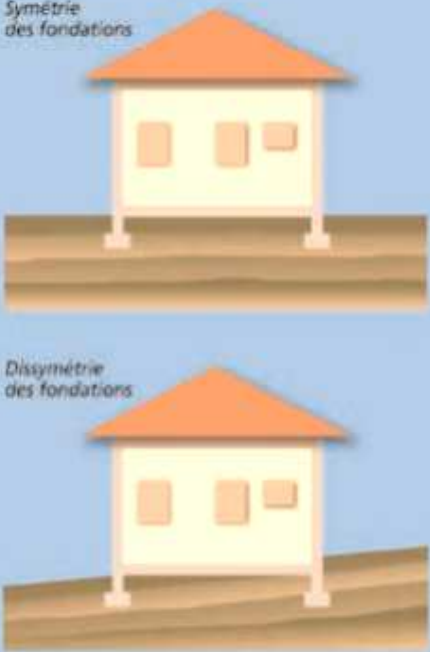
- Les pores du sol sont très fins et accentuent les phénomènes de capillarité.

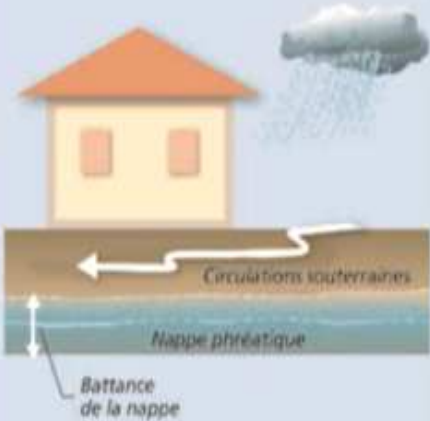
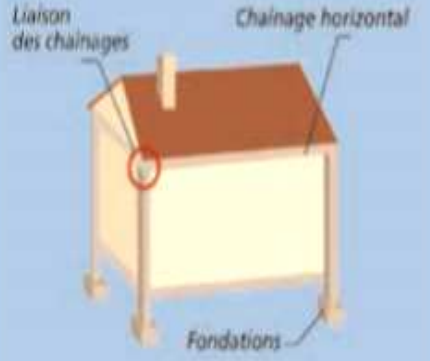
Toutes les familles de minéraux argileux ne présentent pas la même prédisposition au phénomène de retrait-gonflement. L'analyse de leur structure minéralogique permet d'identifier les plus sensibles.

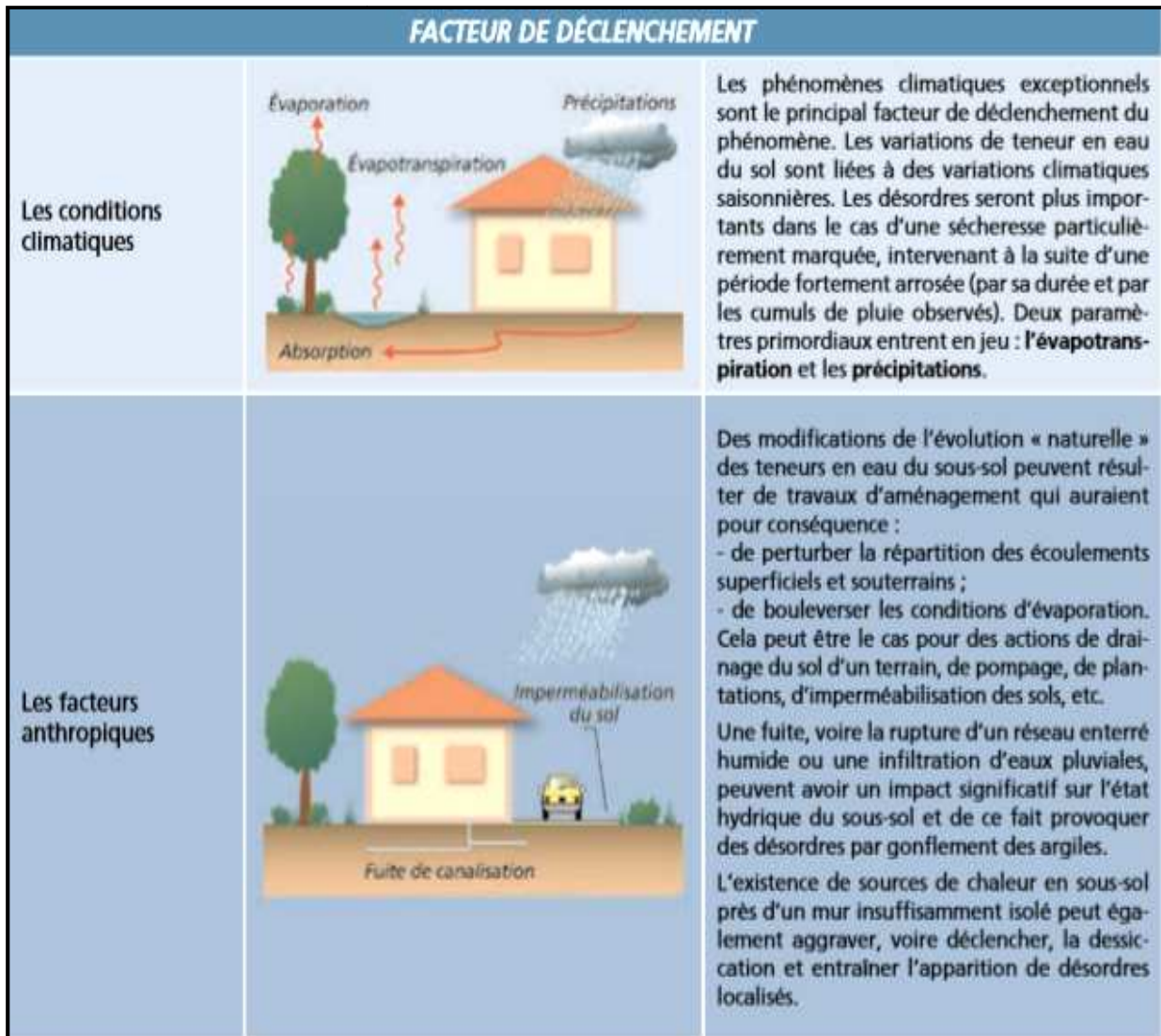
II.8.3 : Facteurs intervenant dans le phénomène de retrait – gonflement des argiles :

Les facteurs intervenant dans ce phénomène sont classiquement regroupés en 2 catégories :

TYPE DE FACTEUR	SCHEMA EXPLICATIF	COMMENTAIRE
FACTEUR DE PRÉDISPOSITION		
<p>La nature du sol</p>	 <p>Fissures</p> <p>Sol argileux</p> <p>Sol non argileux</p>	<p>Facteur de prédisposition prépondérant : seules les formations géologiques renfermant des minéraux argileux sont a priori concernées.</p> <p>La susceptibilité est fonction, en premier lieu :</p> <ul style="list-style-type: none"> - de la lithologie (importance de la proportion de matériaux argileux au sein de la formation) ; - de la composition minéralogique : les minéraux argileux ne sont pas tous « gonflants » et une formation argileuse sera d'autant plus réactive que la proportion de minéraux argileux « favorables » au phénomène (smectites, etc.) sera forte ; - de la géométrie de l'horizon argileux (profondeur, épaisseur) ; - de l'éventuelle continuité des niveaux argileux. <p>L'hétérogénéité de constitution du sous-sol constitue une configuration défavorable. C'est le cas par exemple avec une alternance entre niveaux argileux sensibles et niveaux plus grossiers propices aux circulations d'eau : ces derniers favorisent les variations de teneur en eau des niveaux argileux se trouvant à leur contact.</p>

<p>La géomorphologie</p>	 <p>Symétrie des fondations</p> <p>Dissymétrie des fondations</p>	<p>Elle conditionne la répartition spatiale du phénomène :</p> <ul style="list-style-type: none"> - un terrain en pente entraîne souvent une dissymétrie des fondations d'une construction, favorisant une aggravation des désordres sur le bâti. En effet, les fondations reposant le plus souvent à une cote homogène, les fondations amont sont alors plus enterrées et donc moins exposées aux variations de teneur en eau que les fondations aval. - cet effet peut être renforcé par une différence de nature de sol à la base des fondations amont et aval (les couches superficielles du sol étant généralement parallèles à la topographie, les fondations amont reposent donc sur des terrains moins altérés et remaniés que les fondations aval). - alors qu'une pente favorise le drainage par gravité, sur terrains plats les eaux de ruissellement ont tendance à stagner et à s'infiltrer, et ainsi à ralentir la dessiccation du sol. - l'orientation constitue également un paramètre non négligeable. Sur une pente orientée au Sud, les sols à l'aval d'une construction sont soumis à un ensoleillement plus important que ceux situés en amont, à l'ombre de la bâtisse. La dessiccation y sera donc plus marquée.
--------------------------	--	---

<p>Le contexte hydrogéologique</p>		<p>C'est l'un des facteurs environnementaux essentiels. Les deux principaux facteurs néfastes sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> - la présence éventuelle d'une nappe phréatique à profondeur limitée ; - l'existence de circulations souterraines temporaires, à profondeur relativement faible. Elles peuvent être à l'origine de fréquentes variations de teneur en eau des niveaux argileux, favorisant ainsi le phénomène de retrait-gonflement. <p>Les conditions hydrauliques in situ peuvent varier dans le temps en fonction :</p> <ul style="list-style-type: none"> - de l'évapotranspiration, dont les effets sont perceptibles à faible profondeur (jusqu'à 2 m environ) ; - de la battance de la nappe éventuelle (avec une action prépondérante à plus grande profondeur). <p>La présence d'un aquifère à faible profondeur permet le plus souvent d'éviter la dessiccation de la tranche superficielle du sol. Mais en période de sécheresse, la dessiccation par l'évaporation peut être aggravée par l'abaissement du niveau de la nappe (ou encore par un tarissement naturel et saisonnier des circulations d'eau superficielles). Ce phénomène peut en outre être accentué par une augmentation des prélèvements par pompage.</p>
<p>Les défauts de construction</p>		<p>Ce facteur de prédisposition, souvent mis en lumière à l'occasion d'une sécheresse exceptionnelle, se traduit par la survenance ou l'aggravation des désordres.</p> <p>L'examen de dossiers d'expertise indique que les maisons touchées présentent souvent des défauts de conception ou de fondation, ou encore une insuffisance de chaînage (horizontal, vertical, mauvaise liaison entre chaînages). Le respect des règles de l'art « élémentaires » permettrait de minimiser, voire d'éviter, une large partie de ces désordres.</p>



II.9 Conclusion :

Dans ce chapitre on a pu décrire les argiles, leurs origines, et les différents minéraux qui les constituent, l'influence du facteur climat (réchauffement climatique, sollicitations saisonnières) sur les sols argileux mais aussi sur une chaussée routière et les mécanismes qui se développent dans les sols fins.

On peu constater alors que les déformations, gonflement et retrait, des sols argileux sont déclenché par des facteurs qui sont des facteurs (de prédisposition et de déclanchement) qui se produisent dans le massif de sols au cours du temps.

III.1 Introduction :

La question du changement climatique s'est installée durablement au premier plan de l'actualité et des préoccupations des opinions publiques. Longtemps confinée aux milieux scientifiques et aux groupes écologiques, elle a émergé depuis quelques années au niveau gouvernemental. Mais ce sont surtout les dérèglements météorologiques récents (canicules à répétition, cyclones dévastateurs...) qui en ont fait, depuis peu, un sujet d'actualité quasi permanent, bien que leurs liens avec le changement climatique ne soient pas, à ce jour, établis de façon certaine.

Le Nombre de cas pathologiques liés au gonflement des sols argileux est en augmentation à cause du réchauffement planétaire et des changements climatiques, que la terre ait connu ces dernières années. La prévision de la caractérisation des argiles gonflantes peuvent se faire en rassemblant le maximum de données à partir des études géologiques, minéralogique et géotechniques et en étudiant le facteur climat.

III.2. Le problème du changement climatique :

Le changement climatique est le résultat de l'accroissement de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. La modification de la teneur en gaz dans le réservoir atmosphérique contribue à l'intensification de l'effet de serre. Ces gaz sont quasi transparents aux rayonnements solaires mais absorbent l'infrarouge et irradient à nouveau vers la terre, contribuant à maintenir une température favorable à la surface de la terre.

La plupart des gaz à effet de serre sont identifiés. Leur rôle dans la régulation du climat ne suscite pas de débats. Cependant, l'estimation de la réponse du climat à l'accroissement de la concentration de ces gaz est complexe. Elle nécessite de modéliser l'interaction de cette augmentation avec les phénomènes présents à l'intérieur du réservoir atmosphérique.

Plusieurs modèles numériques ont été mis au point par la communauté scientifique afin d'établir les estimations détaillées de l'ensemble des réponses possibles du système climatique. Intégrant les échanges océan atmosphère, le rôle des glaces, des différents types de sols, de la végétation et tenant compte des comportements socio-économiques du futur ; ces modèles parviennent à reconstruire les grandes tendances du climat actuel et à fournir les traits dominants de son évolution. Ces modèles s'accordent sur le fait que l'accroissement des gaz à effet de serre provoquera un changement du climat qui va se traduire principalement par un

réchauffement moyen de 1,5 à 6 degrés en 2100. Le réchauffement augmentera l'évaporation et les précipitations, surtout dans les régions tropicales et équatoriales. Les pluies seront plus fortes dans les régions où elles sont abondantes, tandis que les zones peu arrosées connaîtront des sécheresses plus sévères. Aussi, les modèles prévoient une forte augmentation des événements extrêmes, inondations, sécheresses, fortes chaleurs, vents élevés. (NEFZIA .2012)

La menace du changement climatique est le centre d'inquiétude de la communauté internationale. Afin de comprendre cet intérêt international, il faudrait connaître la signification du terme « changement climatique ». Le sens du terme « changement climatique » est assez simple à comprendre et ne suscite plus de controverses. Cependant, ses causes, sa magnitude ainsi que les impacts de ces changements sur le bien-être humain et l'environnement sont très discutés.

III.3 : Relations entre caractéristiques du sol et les propriétés thermiques :

La température du sol est influencée à l'échelle locale par des échanges avec l'atmosphère (flux radiatif avec le ciel, convection due au vent, degré hygrométrique de l'air), Ces éléments varient dans le temps et dans l'espace, Cependant le sol a une grande inertie thermique de par sa masse et son volume. Si la surface du sol se réchauffe et se refroidit presque instantanément, les couches plus profondes mettent plus de temps à se modifier, mais en général, l'amplitude thermique saisonnière ou journalière diminue avec la profondeur.

Si le changement de température des couches superficielles est pratiquement instantané, celui des couches profondes se fera avec un décalage dans le temps qui dépend de la texture de la porosité et d'humidité du sol.

La réaction physique du sol à la sécheresse et aux canicules concerne essentiellement les paramètres suivants:

- La dynamique du profil hydrique
- La dynamique du profil salin
- La réorganisation structurale du sol.
- Le flux thermique du sol vers l'atmosphère

Ces paramètres sont en relation avec les caractéristiques du sol (texture, type d'argile, humidité, structure, salinité, gypse, qualité et doses d'irrigation, couleur du sol, recouvrement du sol), l'intensité du réchauffement, et le degré hygrométrique de l'air. Ils entraînent des

changements au niveau du comportement et du fonctionnement du sol et de la couverture végétale ainsi qu'une augmentation anormale de la température de l'air.

Les actions à mener pour s'adapter à ces phénomènes naturels que sont la sécheresse et les canicules est d'agir sur les différents paramètres cités précédemment.

Le sol est le siège d'un stockage et d'un transport de chaleur qui sont déterminés par ses propriétés thermiques qui sont la capacité et la conductivité thermiques (CALVET, 2003).

III.3.1 : La capacité thermique des sols :

La température du sol dépend de la quantité de chaleur reçue et de la quantité de chaleur perdue. L'énergie solaire est le principal facteur. La capacité thermique caractérise l'aptitude d'un matériau à stocker la chaleur, les sols riches en MO peuvent stocker plus de chaleur que les sols pauvres.

De même du point de vue du comportement thermique les sols très hydratés et les sols riches en MO mettront plus de temps à se réchauffer que les sols secs et pauvres en MO pour un même apport d'énergie (CALVET.2003).

III.3.2 : Conductivité thermique du sol :

Le transfert de chaleur dans le sol a lieu par convection et par conduction. et se traduit par un transport la chaleur. Il se révèle que les Sols riches en MO conduisent mal la chaleur. Ils se réchauffent et se refroidissent lentement. La conductivité est une fonction croissante de la teneur en eau, mais différente selon les constituants. Un sol saturé en eau se réchauffe et se refroidit plus vite et plus pour les sols sableux que pour les sols riches en MO.(CALVET,2003)

- **. Le profil hydrique**

L'assèchement du sol a lieu par évaporation ou évapotranspiration.

Pour ce faire les facteurs suivants doivent intervenir (Figure III.2) :

- Un flux de chaleur
- Un gradient d'humidité hygrométrique entre la surface du sol et l'atmosphère.
- Une remontée capillaire d'eau à travers le sol vers la surface d'évaporation.

Une absorption d'eau par les racines.

Si les deux premières conditions dépendent des paramètres climatologiques

(T° , hygrométrie de l'air, vent,), les deux dernières conditions dépendent des propriétés du sol et de son hydratation et de la densité racinaire.

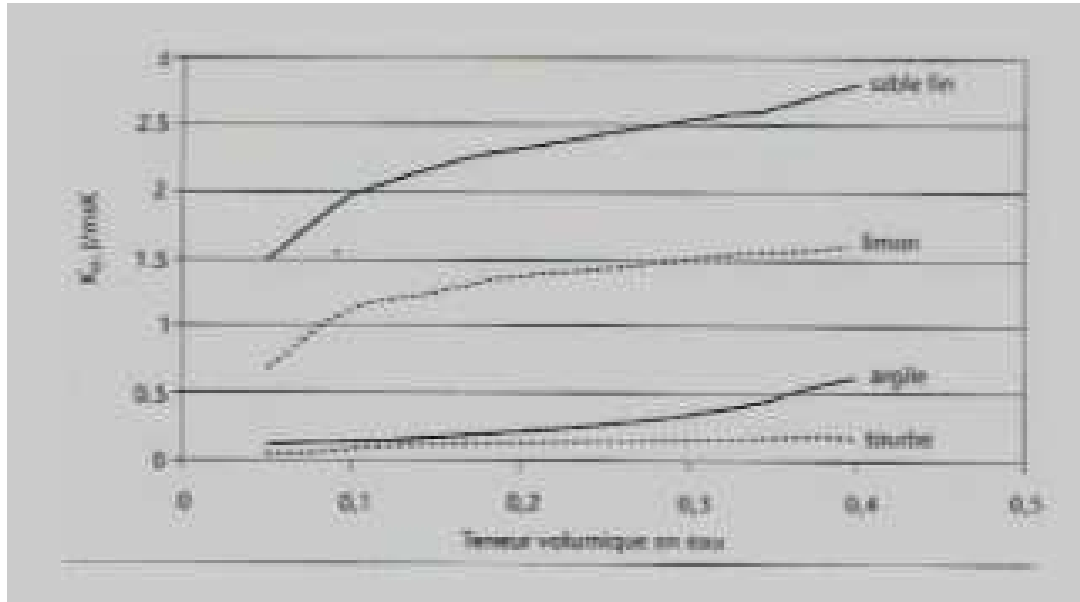


Figure III.1 Conductivité thermique de constituants du sol en fonction de la teneur en eau (MUSY ET SOUTTER, 1991)

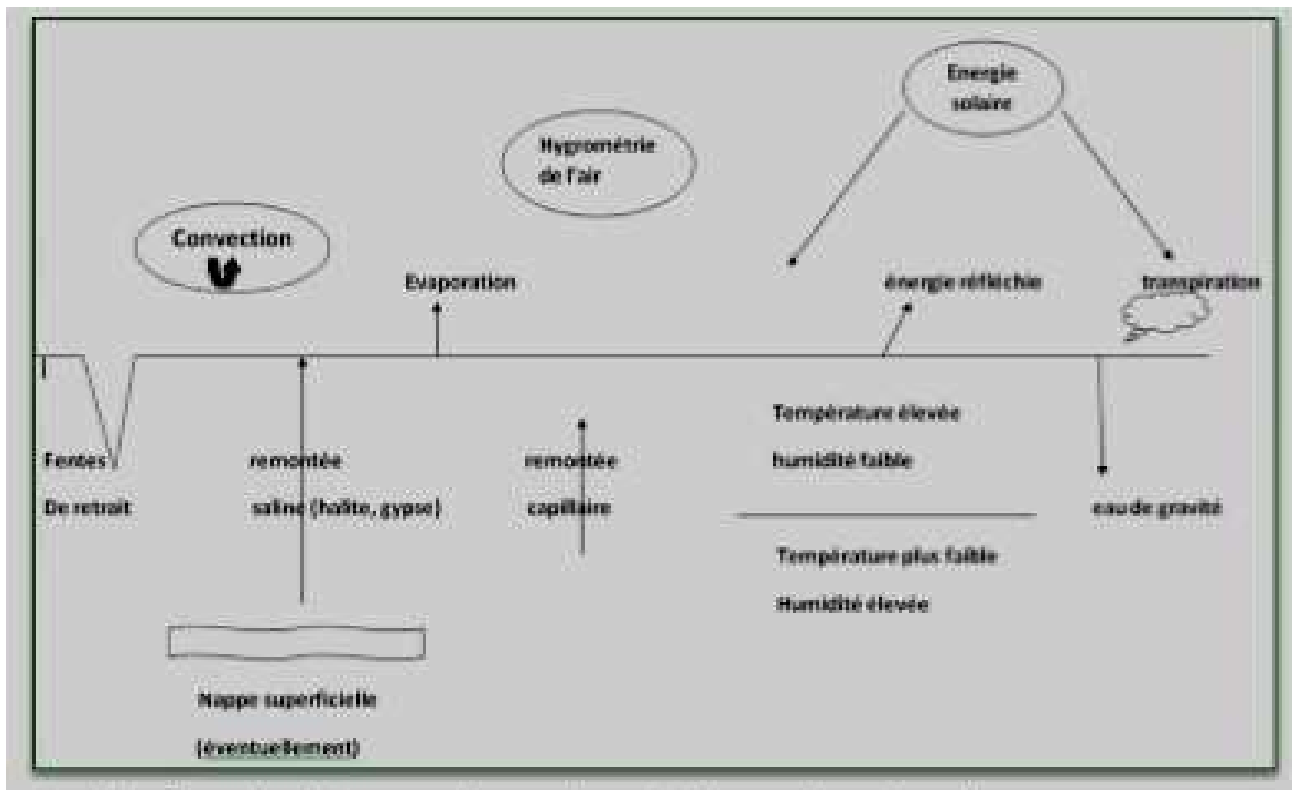


Figure. III.2 : flux de chaleur et dynamique de l'eau dans le sol. (MUSY ET SOUTTER, 1991)

III.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.5 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 on va tenter de mieux comprendre la relation complexe qui lie « le sol » et le « climat ».

Et pour notre cas on va étudier deux zones côte à côte situées au nord de l'Algérie plus spécialement la région de **Tizi Ouzou** et la région de **Boumerdes**

III.5.1. Le changement climatique en Algérie

L'Algérie, premier plus grand pays d'Afrique, situé au Sud de la Méditerranée, se compose d'ensembles géographiques contrastés et subit sur le plan climatique une double influence des systèmes tempérés et tropicaux. Sa situation particulière l'expose à une grande vulnérabilité aux impacts du changement climatique global.

Le climat a varié au cours du 20^{ème} siècle et le signal du changement climatique apparaît dans les ruptures des séries pluviométriques. Les scénarios climatiques pour le siècle actuel indiquent un risque de réduction des pluies pouvant atteindre 20% (MATE, 2001 ;GIORGI et LIONELLO, 2008). Malgré les incertitudes qui subsistent, ces projections risquent d'affecter des secteurs stratégiques, tel que l'agriculture. Le risque climatique s'ajoute à d'autres facteurs de vulnérabilité liés au mode de développement économique et social dans un environnement naturel fragile et parfois à la limite d'une dégradation avancée.

L'augmentation de la variabilité suit l'accroissement de la longitude et la diminution de la latitude. L'altitude atténue cet accroissement. En Algérie, environ 13% seulement des terres ont un climat méditerranéen, le reste étant dominé par un climat semi-aride à désertique. La

figure.III.3 montre que les données de la station d'Oran durant la période 1926-2006 indiquent une augmentation de température comprise entre 0,65 et 1,45 °C (Tabet-Aoul, 2008).,le climat algérien est caractérisé par une variabilité annuelle et inter- annuelle, avec des années très sèches, sèches, normales ou rarement humides, responsables d'une diminution importante de la production agricoles. Les précipitations se produisent principalement d'octobre à avril, et les pluies sont souvent concentrées sur quelques jours ou quelques heures. Les températures sont relativement élevées, ce qui cause une évapotranspiration importante.

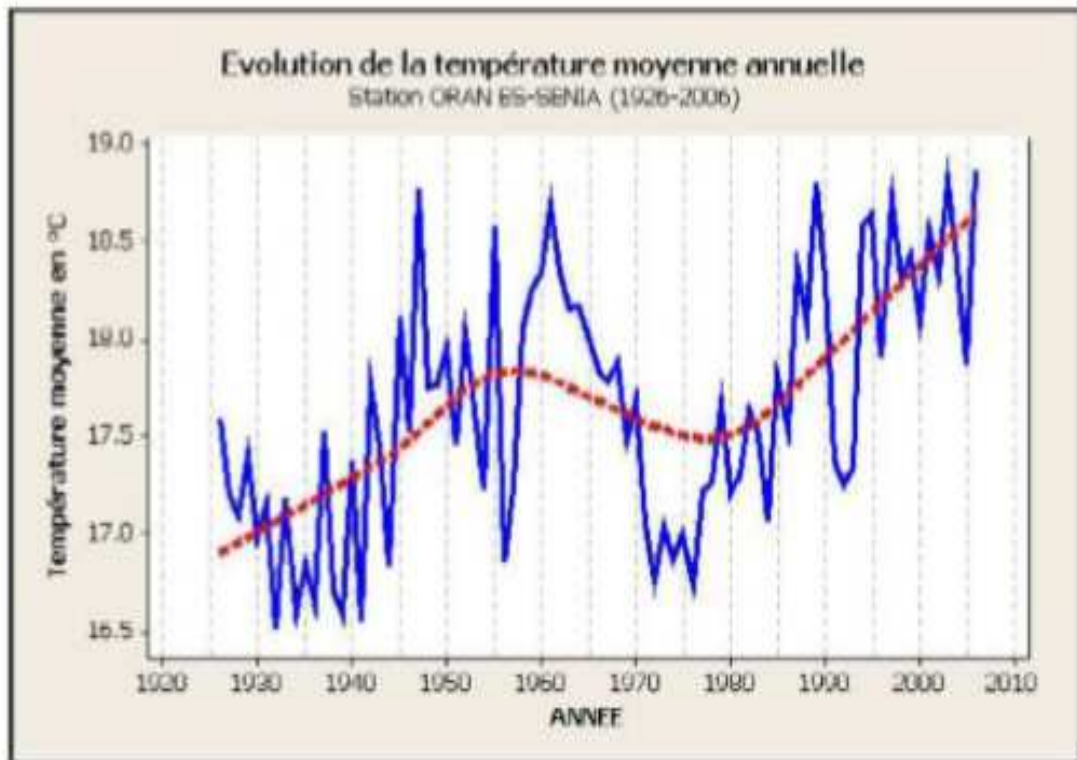


Figure III.3 : Evolution de la température moyenne annuelle à Oran en °C (1926-2006)
(Tabet-Aoul, 2008)

II.5.2 Situation géographique :

Tizi Ouzou :

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

La Wilaya de Tizi Ouzou est limitée par :

- La mer méditerranéenne au Nord
- La wilaya de Bouira au sud
- la wilaya de Boumerdes a l'ouest
- la wilaya de Bejaia a l'est.

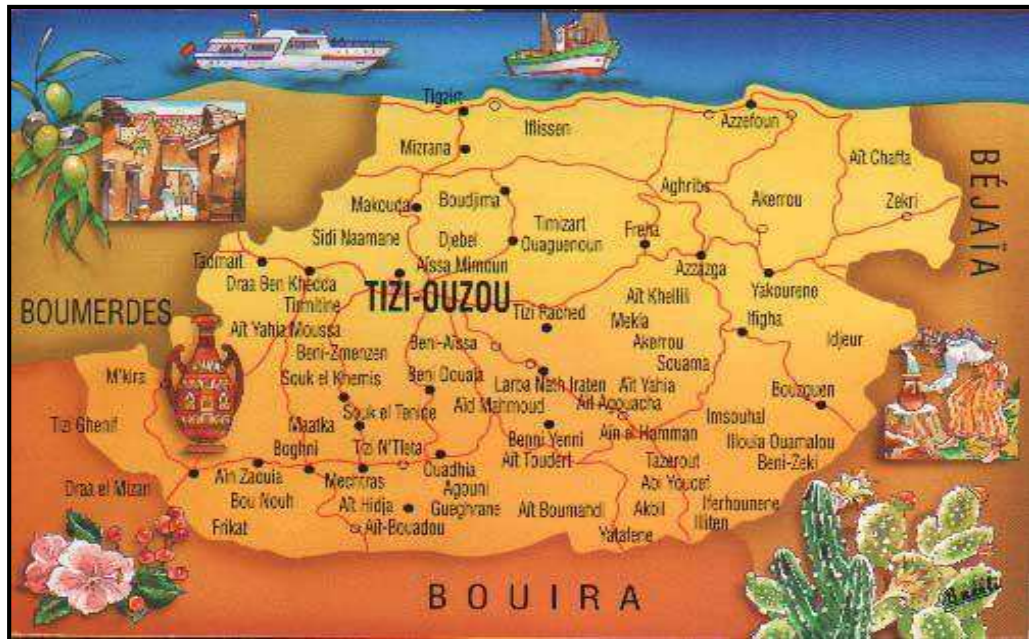


Figure III.4 wilaya de Tizi-Ouzou.

Boumerdes :

La wilaya de Boumerdes est une wilaya côtière du centre du pays qui s'étale sur une superficie de 19,08 km². Elle comprend une chaîne composée des Daïras de Dellys, Djinet, Boudouaou El Bahri, La Wilaya de Boumerdes est limitée par :

- La mer méditerranéenne au Nord
- La wilaya de Bouira au sud
- la wilaya d'Alger a l'ouest
- la wilaya de Tizi-Ouzou a l'est.

températures sont de 5 °C au minimum. L'hiver à Tizi-Ouzou dans les années précédentes sont marquées 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.

La ville de 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 Koppen-Geiger, le climat est de type Csa. Tizi Ouzou affiche une température annuelle moyenne de 17.9 °C. La moyenne des précipitations annuelles atteints 896 mm.

Tableau III.1 Climatologie de Tizi-Ouzou (2010-2015)

Année 2010-2015	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Jui.	Aout	Sept.	Octob.	Nov.	Dec.	Moyen Annuelle
T°Moy/mensu en°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
T°Moy/mensu mini	7.2	7.5	9	11.2	14.2	18.2	21.6	21.9	19	16.2	11.4	8.1	13.9
T°Moy/mensu MAX	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

Tableau III.2 Climatologie de Tizi-Ouzou (2016)

Année 2016	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Jui.	Aout	Sept	Octob.	Nov.	Dec.	Moyen Annuelle
T°Moy/mensu en°C	12,8	12,6	12,5	16,1	19,0	24,3	27,9	27,1	24,3	22,5	15,7	12,6	19,0
T°Moy/mensu mini	8,6	8,5	7,8	11,2	13,6	17,1	20,7	20,4	18,0	16,9	11,4	9,3	13,6
T°Moy/mensu MAX	18,4	18,0	17,6	22,1	25,0	32,0	35,7	34,6	31,7	29,6	21,3	17,6	25,3

Tableau III.3 Climatologie de Tizi-Ouzou (2017)

Année													Moyen
2017	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Jui.	Aout	Sept.	Octob.	Nov.	Dec.	Annuelle
T°Moy/mensu en°C	8,9	12,7	14,5	16,4	21,8	26,4	29,4	29,7	23,9	19,5	13,7	10,4	18,9
T°Moy/mensu mini	5,2	8,6	8,8	10,5	15,2	19,8	22,3	25,1	18,1	13,5	9,8	7,5	13,7
T°Moy/mensu MAX	13,7	18,2	21,2	23	29,6	34,6	37,5	37,4	30,0	26,7	19,4	14,3	25,5

III.7 climat de Boumerdes :

Boumerdes comme Alger possède un climat méditerranéen tempéré, la pluviométrie est relativement élevée, les précipitations les plus marquantes tombent entre janvier et novembre, le cumul mensuel durant cette période représente 50% des précipitations annuelles qui ont une valeur d'ordre de 770 mm, mais leur répartition est irrégulière. La saison pluvieuse n'est pas trop froide, la plus faible température enregistré durant la période 1995-2009 est de 10C°, la période sèche s'étant de juin a aout, l'été est chaud la température mensuelle est de 27C° en Aout figure III.6. Pendant la majeure partie de temps le temps est doux et l'aire est humide vue la position de la wilaya. la valeur de l'humidité est élevée durant toute la période de l'année.

Le diagramme ombrothermique est tracé a partir des données prélevées des stations météorologique de Dellys. Il montre l'existence d'un cycle d'humidification séchage qui se produit chaque année, la période sèche s'étale de juin a septembre et la période très humide est enregistré entre novembre est janvier.

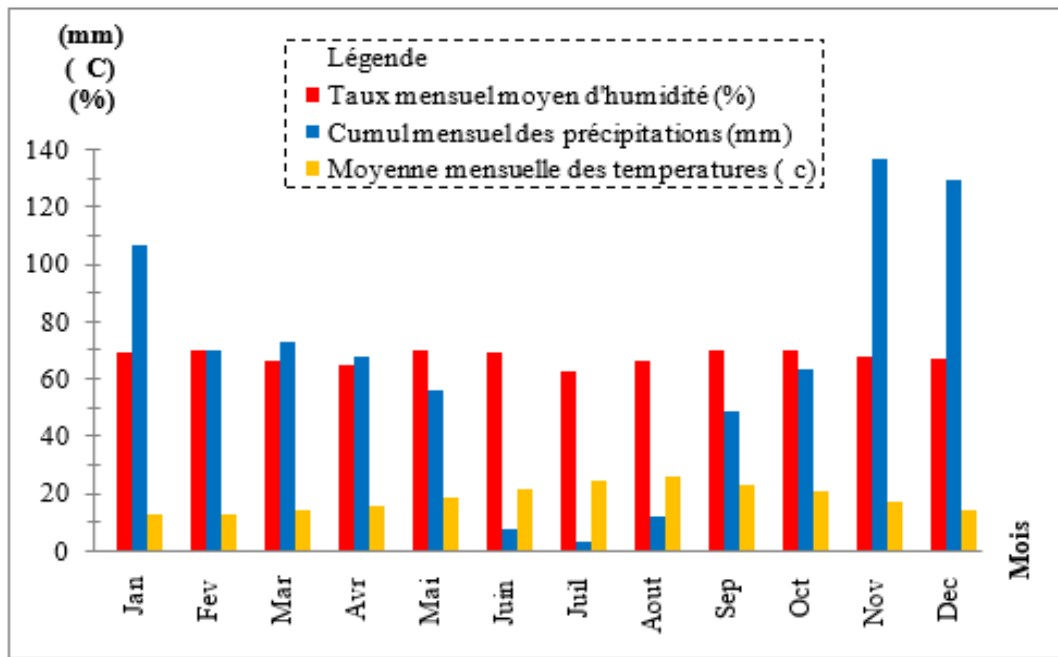


Figure.III.7. Variations mensuelle des précipitations humidité et températures dans la région de Boumerdes durant la période 1995-2009 (données de l'office national météorologique de dar el baida, Alger, Algérie)

III.8. L'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 arides et semi-arides, 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 influencent sur le comportement des sols fins (argiles), parmi ces influences le retrait – gonflement, les fissurations et les transformations des minéraux.

III.9 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 inter-foliaire 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 inter-foliaire, 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 inter-granulaires 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.

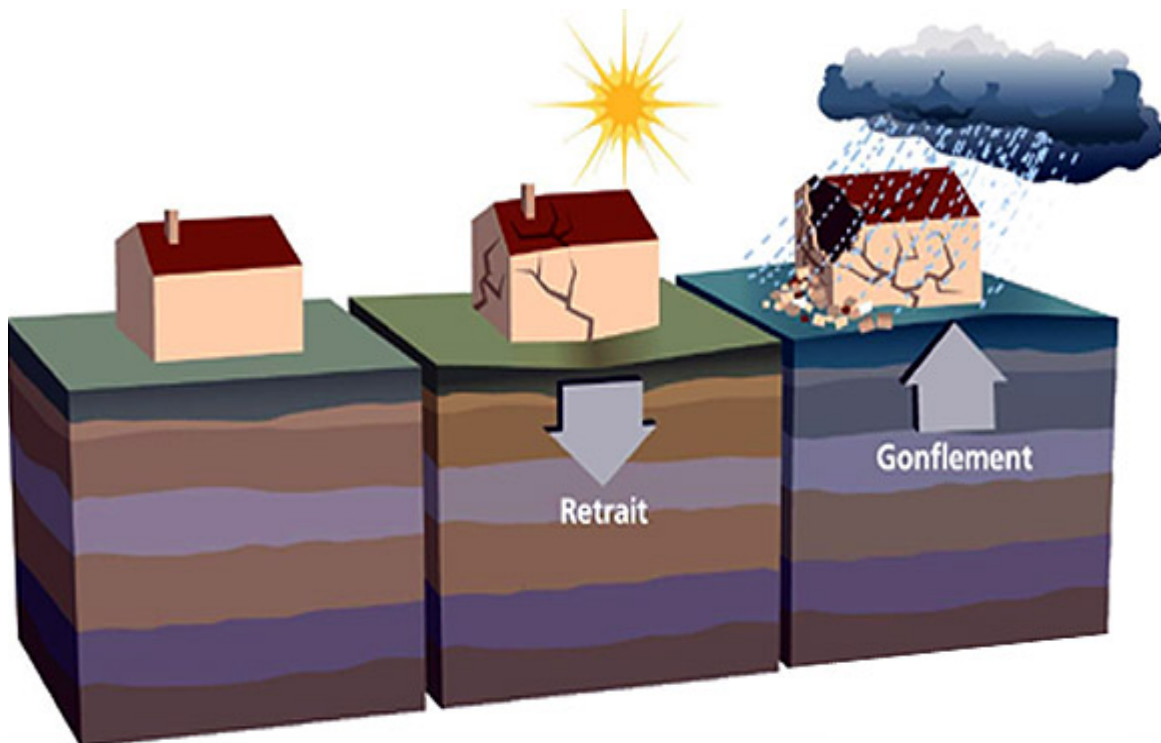


Figure III.8 : Effet du retrait-gonflement sur une construction.

III.9.1 Les fissure :

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.

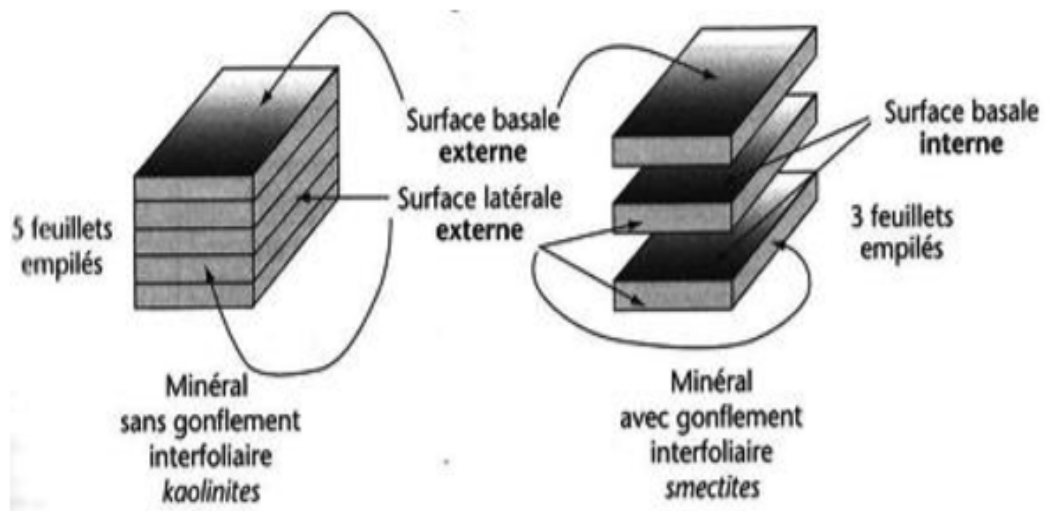


Figure III.9: Schéma de mécanisme de gonflement - retrait des argiles (CALVET. R, 2009)

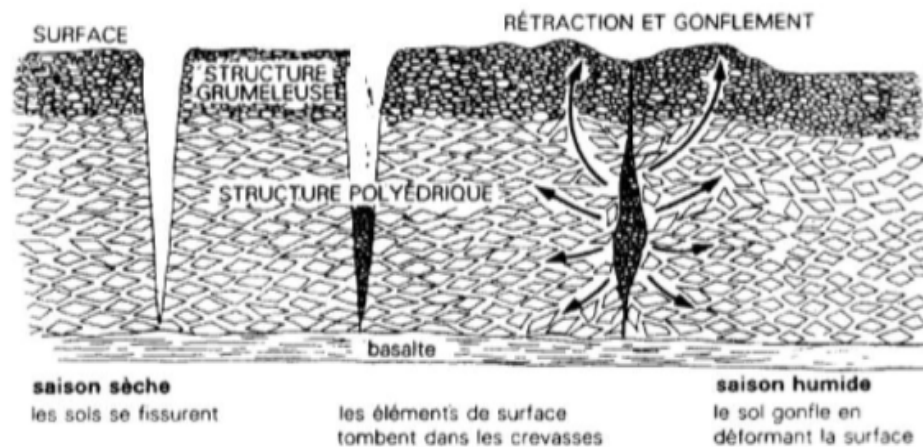


Figure III.10: Conséquence du gonflement des argiles dans la déstructuration d'un sol (FAGEL.N, 2005).

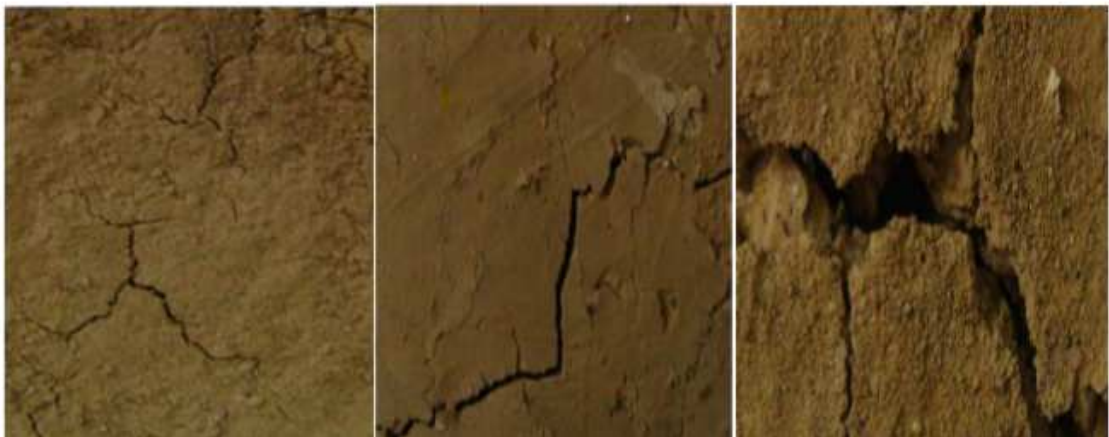


Figure III.11: développement des fissures.

III.9.2 Transformations des minéraux:

Les minéraux argileux résultant de la destruction des roches, peuvent soit resté 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.10 Conclusion :

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, et de températures appliqué au sol. Les cycles d'humectation-dessiccation sont cause 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.

On peu constater qu'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 aussi 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.

IV.1 Introduction

Les différents essais d'identification vont permettre la qualification du sol étudié par un nom plus précis (argile, sable, limon argileux...). Ces essais d'identification permettent non seulement de classer les sols mais aussi de cerner leurs comportements mécaniques par la détermination des leurs caractéristiques mécaniques et physiques, qui donnent une idée sur les possibilités d'utilisation en construction de ces matériaux. Que ce soit dans le domaine des travaux routiers ou dans l'industrie de fabrication des matériaux de construction.

Dans le domaine de la géotechnique, l'identification du matériau a utilisé est la première étape à suivre. Dans notre travail les essais d'identification physique effectuée sur les différents types de sol étudiés sont :

- La teneur en eau
- Densité sèche,
- Analyse granulométrique par sédimentation,
- Limites d'Atterberg,
- Valeur du bleu méthylène,

Ainsi Qu'une Analyse minéralogique.

IV.2 Origine des matériaux utilisés :

Les matériaux utilisés dans ce travail sont des matériaux locaux qui constituent généralement les différents sols de la région du nord Algérien.

- L'échantillon N°01 est prélevé d'un site à « Tigzirt » (LCTP Tizi-Ouzou) pour un projet de réalisation d'une usine industrielle, la profondeur de sondage est entre 8.00 m et 8.20 m.
- L'échantillon N°02 prélevé d'un site à « Azazga » (LNHC Tizi-Ouzou) pour une réalisation d'un bâtiment à usage d'habitation et commerce, etc., la profondeur de sondage est entre 9.30 m e 9.70 m
- L'échantillon N°03 prélevé d'un site à « Cap Djinet» (LNHC Tizi-Ouzou) pour un projet de réalisation d'un établissement scolaire, la profondeur de sondage est entre 5.00 m et 5.50 m.
- L'échantillon N°04 réalisé par compactage à l'essai Proctor (NF P 94-093), le sol est prélevé d'un chantier en travaux de terrassement à proximité de l'université

mouloud Mammeri (faculté des sciences de gestion) à la nouvelle ville de Tizi-Ouzou, pour un projet de réalisation d'un bâtiment à usage d'habitation et de commerce.

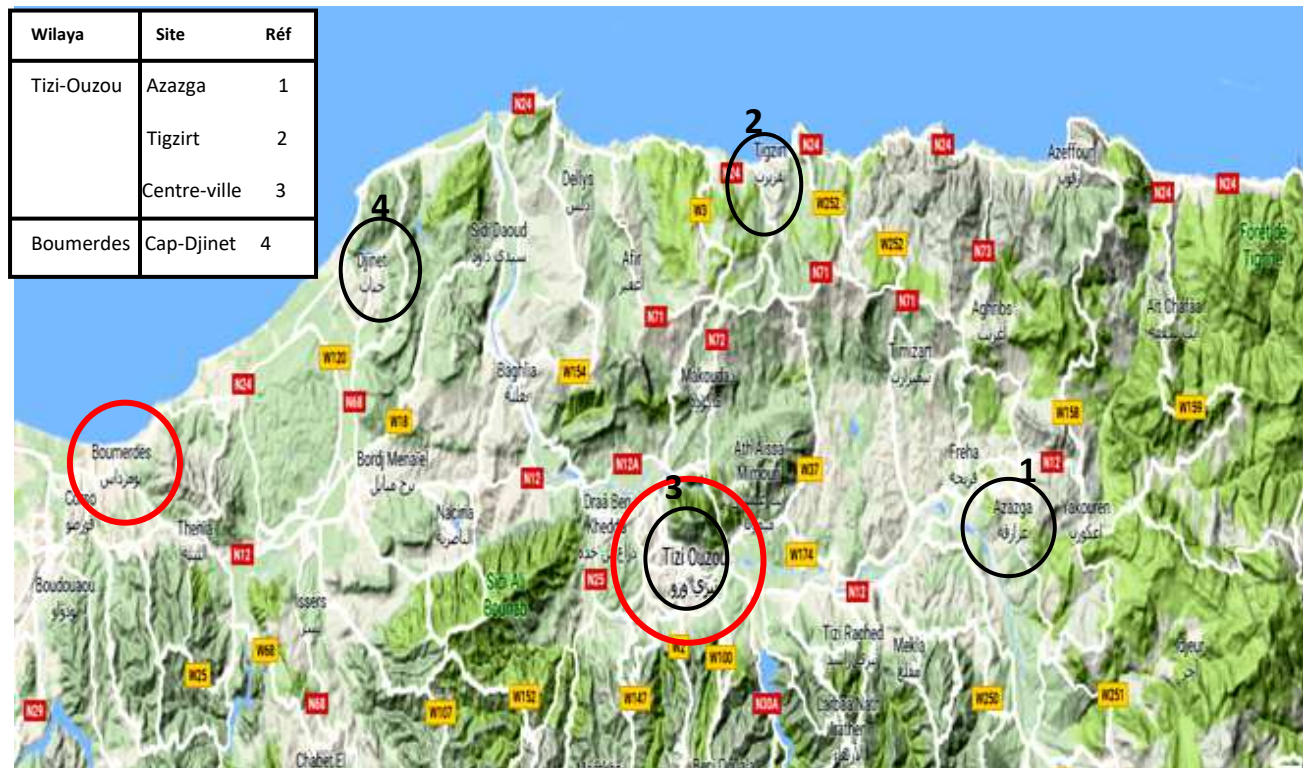


Figure. IV.1 : Situation Géographique des Sites étudiés.

VI.3 : Géologie des sites :

Le nord algérien est constitué de plusieurs formations géologiques, la majorité est constituée d'une formation de nature argileuse, soit d'une formation de nature marneuse, et parfois argilo-marneuse, Cette formation est mélangée dans certains endroits avec un ou plusieurs matériaux, à l'exemple du sable, limons, cailloux, calcaire...Etc.

IV.4 Caractéristiques physiques et minéralogiques :

IV.4.1 Caractéristiques physiques :

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

IV.4.1.1 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 dessèchement à l'étuve à 105 °C (60 °C dans le cas des sols contenant de la matière organique).

$$W = (W_w / W_s) * 100$$

La connaissance de la teneur en eau naturelle d'un sol est très importante car elle permet d'apprécier dans quel état 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.

L'origine de prélèvement des échantillons	W%
Azazga	32.101
Tigzirt	14.925
Cap-Djinet	21.670
Centre Ville (Ech.Compacté)	22,140

• **Interprétation des résultats :**

On remarque de suite que le sol de Azazga a une teneur en eau élevée comparant aux Sols de Cap-Djinet, Tigzirt et Centre ville, Ceci peut expliquer par le fait que le sol de Azazga a été prélevé d'une profondeur élevée, et aussi le sondage de Azazga été récent qui est le contraire de celui de Tigzirt. Le sol de Cap Djinet et celui du Centre Ville représente une perméabilité moyenne.

IV.4.1.2 Masse volumique des sols :

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

La masse des particules solide est obtenue par pesage et exprimé en gramme les quantités de sol utilisé pour l'essai sont 50 g prélevé sur le tamisât de l'échantillon de sol au tamis 2mm. La masse volumique ρ des particules solides de sol est calculé comme suit :

$$\rho_s = (m_3 - m_1) \rho_w / [(m_2 - m_1) - (m_4 - m_3)]$$

Avec :

m_1 : masse du pycnomètre vide (gramme) ;

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

m_3 : masse du pycnomètre avec le sol (gramme) ;

m_4 : masse du pycnomètre + sol + eau (gramme) ;

ρ_w : masse volumique de l'eau 1 (gramme/cm³).

$\rho_s = m_s / V_s$

Tableau IV.2 : masse volumique des grains solides.

Sites	ρ_s (g/cm ³)
Azazga	2.70
Tigzirt	2.55
Cap-Djinet	2.68
Centre Ville (Ech.compacté)	2.80

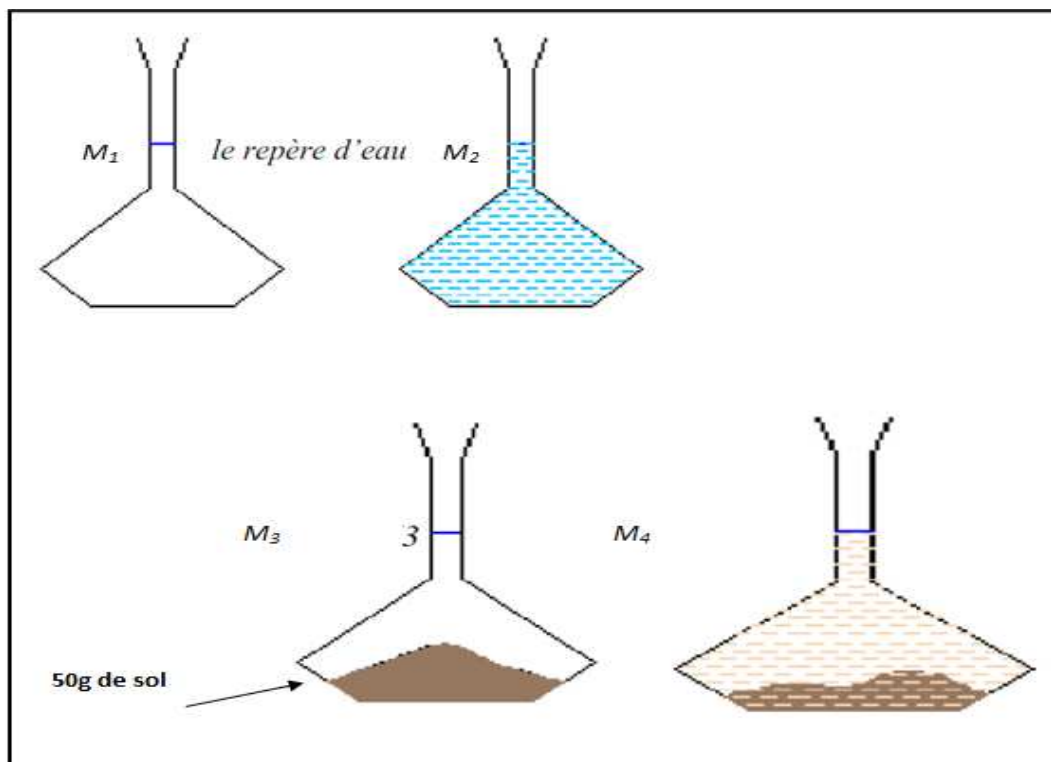


Figure VI.2 les différentes mesure de l'essai.

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 libre tandis que le volume est obtenu par la méthode de immersion dans l'eau).

La même masse de l'échantillon dans l'air est paraffiné et ensuite pesé dans l'air. A l'aide d'une balance hydrostatique, on pèse notre échantillon paraffiné dans l'eau.

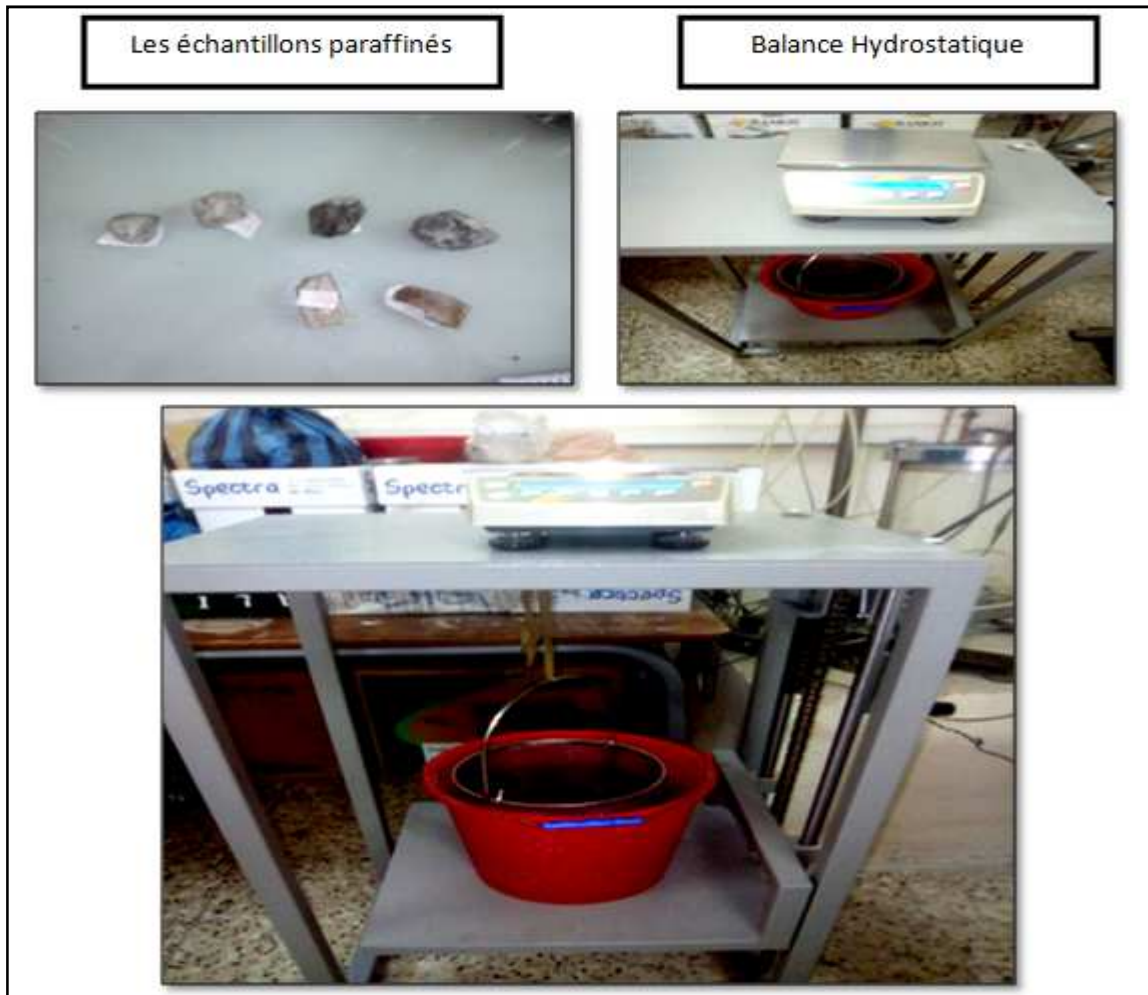


Figure VI.3 : Matériels Utilisé

Tableau IV.3 : Masse volumique des grains

Sites	ρ_h (g/cm ³)
Azazga	2.130
Tigzirt	2.044
Cap-Djinet	2.067
Centre Ville (Ech.Compacté)	2.40

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 on a :

$$\rho_d = \rho_h / (1 + w)$$

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.

Sites	ρ_d (g/cm ³)	Appréciation
Azazga	1.61	Moyenne
Tigzirt	1.78	Moyenne
Cap-Djinet	1.69	Moyenne
Centre-ville(Ech.Compacté)	1.96	Dende

IV.4.1.3 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.

$$e = V_v / V_s \text{ avec } e = (\rho_s / \rho_d) - 1.$$

Tableau IV.6 Indices des vides des sites.

Sites	e
Azazga	0.677
Tigzirt	0.432
Cap-Djinet	0.585
Centre Ville (Ech Compacté)	0.418

- **Interprétation des résultats :**

Les résultats des indices des vides pour les quatre sites (voir le tableau IV.6) varient de 0.677 à 0.418 ce qui nous permet de connaître la proportion des vides, et de conclure que le sol de Cap Djinet ,Tigzirt et Azazga sont moins compactes comparant au sol de Centre Ville qui représente un indice de vide petit ce qui nous permet de reconnaître l'effet du compactage à diminuer les vides existants dans le sol.

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 la relation existante entre le différent paramètre on a :

$$S_r = (\rho_s / \rho_w) * (W / e)$$

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

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

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

Sites	Sr (%)	Appréciations
Azazga	39.442	Humide
Tigzirt	15.769	Légèrement Humide
Cap-Djinet	17.198	Légèrement humide
Centre-ville(Ech.Compacté)	37.366	Humide

- **Interprétation des résultats :**

Le degré de saturation des échantillons est inférieur à 40 %, ce qui permet de dire qu'on est en présence de sols non saturés.

IV.4.1.4 L'analyse granulométrique par 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 80μ

b) Le déroulement de l'essai :

L'analyse granulométrique par sédimentométrie permet de déterminer la distribution en poids des particules fines (de diamètre inférieur à 80μ) d'un sol en fonction de leurs dimensions donc elle complète l'analyse par tamisage.

La séparation par décantation consiste à déterminer les diamètres équivalents des particules sphériques en fonction de leur vitesse de chute dans un environnement visqueux afin d'obtenir le tracé d'une courbe Granulométrique pour des particules inférieure à $0,08 \text{ mm}$.

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 solide γ_s tombant sous l'action de la pesanteur dans un liquide visqueux de poids spécifique γ_w et de la viscosité η . En réalité cet essai se fait en dispersant les particules de sol dans l'eau avec un mouvement d'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.

En premier lieu, on prépare un mélange d'eau distillé additionné d'un dé-floculant.

Ce dernier a pour but de décoller les grains les uns des autres et ainsi permettre leur mouvement dans l'eau. Cette solution est constituée à partir de 440 cm^3 d'eau distillé et de 60 cm^3 d'une solution à 5% d'héxamétaphosphate de sodium. Ensuite, on prend 70 g du tamisât de 0.08 mm qu'on imbibe dans 500 cm^3 de la solution préparé pendant au moins 15 heures, à température ambiante.

au moyen de l'agitateur mécanique (Figure IV-3) , la prise d'essai est dispersée dans la solution pendant 3 minutes au minimum , à $10\,000 \text{ tr/min}$. la suspension est immédiatement versée dans une éprouvette d'essai , en complétant par de l'eau distillé a la température ambiante jusqu'à 1000 cm^3 . À côté, une éprouvette-témoin est également remplie d'eau distillé ou 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 ou on retire l'agitateur et on plonge de densimètre (figure IV.4) avec précaution après déclenchement du chronomètre. La densité est lue au sommet du

ménisque a 0.0001 près pour les temps suivant en minute : 0.5 ; 1 ; 2 ; 5 ; 10 ; 20 ; 40 ; 80 ; 1440.

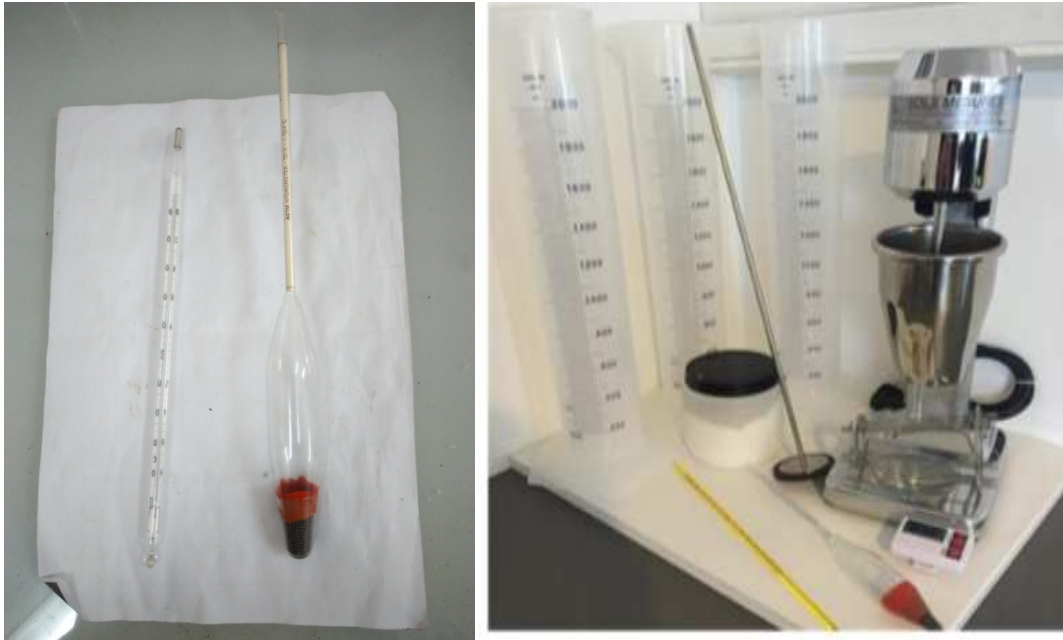


Figure IV.4: Matériel d'essai d'Analyse granulométrique par sédimentométrie.

c) les résultats de l'analyse granulométrique par sédimentométrie

Tableau IV.9: Résultats des analyses granulométriques par sédimentométrie pour le site d'Azazga.

Temps (min)	T°	T° (témoin)	R	R'	ρ_w (g/cm ³)	D	Passant
0,5	22,5	23,5	1,024	0,994	0,998	23,60	98,63
1	22,5	23,5	1,022	0,992	0,998	17,15	90,41
2	22,5	23,5	1,021	0,991	0,998	12,27	86,30
5	22,5	23,5	1,02	0,990	0,998	7,85	82,20
10	22,5	23,5	1,017	0,987	0,998	5,75	69,80
20	23	24	1,015	0,985	0,998	4,13	61,64
40	23	24	1,0135	0,9835	0,998	2,95	55,48
80	24	24,5	1,013	0,983	0,997	2,08	53,33
240	24,5	24,5	1,009	0,979	0,997	1,24	36,93
1140	24,5	24,5	1,011	0,981	0,997	0,58	27,78

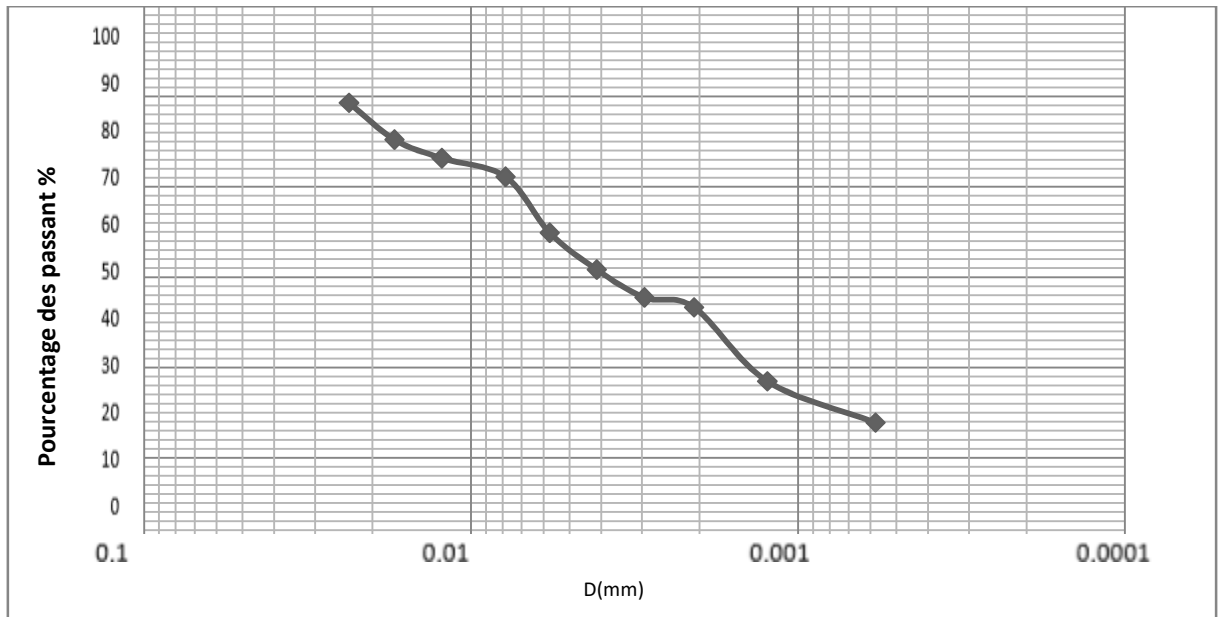


Figure IV.5 : Analyse granulométrique par sédimentation de l'échantillon d'Azazga.

Tableau IV.9: Résultats des analyses granulométriques par sédimentométrie pour le site De Tizirt

Temps (min)	T°	T° (témoin)	R	R'	ρ_w (g/cm ³)	Passant	D
0,5	22,5	22,5	1,020	0,994	0,998	78,53	25,02
1	23,5	22,5	1,0185	0,992	0,998	74,54	18,14
2	23,5	22,5	1,018	0,991	0,998	72,25	14,25
5	23,5	22,5	1,017	0,990	0,998	64,65	9,86
10	23,5	22,5	1,015	0,987	0,998	58,43	7,56
20	24	23,5	1,0145	0,985	0,998	56,45	4,94
40	23	23	1,013	0,9835	0,998	52,45	3,83
80	23	23	1,013	0,983	0,997	43,365	2,99
240	23	23	1,011	0,979	0,997	41,56	1,165
1140	24,5	24,5	1,011	0,981	0,997	41,56	0,5368

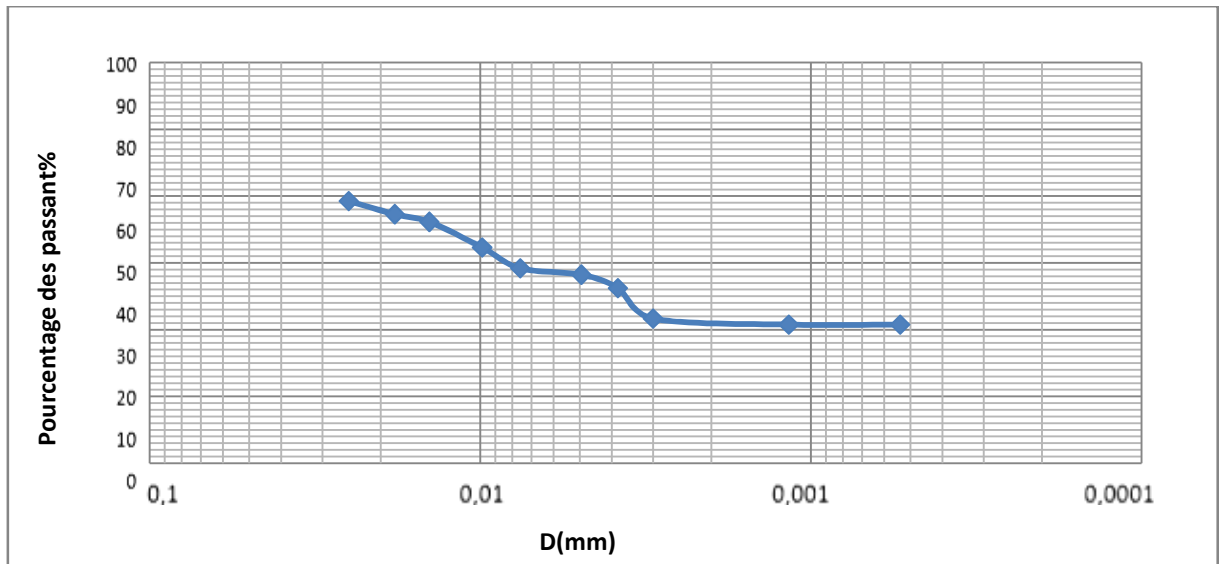


Figure IV.6 : Analyse granulométrique par sédimentation de l'échantillon de Tizirt.

Tableau IV.9: Résultats des analyses granulométriques par sédimentométrie pour le site De Cap Djinet.

Temps (min)	T°	T° (témoin)	R	R'	ρ_w (g/cm ³)	Passant	D
0,5	22,5	22,5	1,0185	0,994	0,998	72,536	24,023
1	23,5	22,5	1,0175	0,992	0,998	71,548	17,14
2	23,5	22,5	1,016	0,991	0,998	68,256	12,25
5	23,5	22,5	1,0155	0,990	0,998	62,653	7,86
10	23,5	22,5	1,147	0,987	0,998	57,434	5,569
20	24	23,5	1,013	0,985	0,998	55,456	3,9458
40	23	23	1,013	0,9835	0,998	55,456	2,8356
80	23	23	1,0125	0,983	0,997	44,365	1,998
240	23	23	1,011	0,979	0,997	43,56	1,1658
1140	24,5	24,5	1,011	0,981	0,997	43,56	0,5368

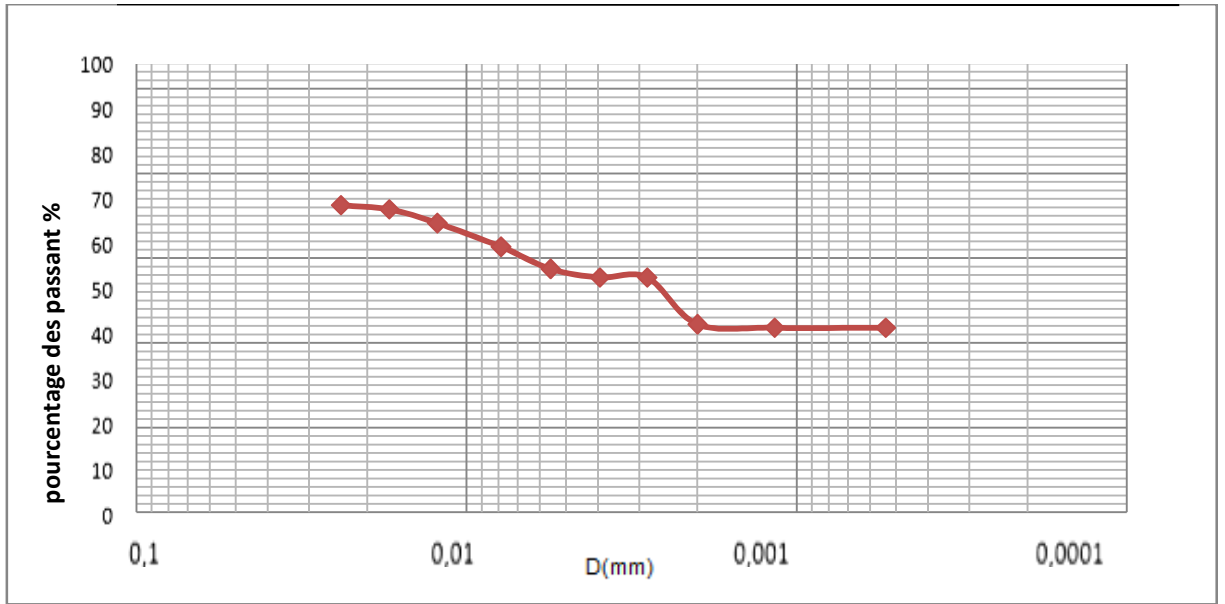


Figure IV.7 : Analyse granulométrique par sédimentation de l'échantillon de Cap Djinet.

Tableau IV.9: Résultats des analyses granulométriques par sédimentométrie pour le site De Centre Ville(Ech.Compacté)

Temps (min)	T°	T° (témoin)	R	R'	ρ_w (g/cm ³)	Passant	D
0,5	22,5	22,5	1,0185	0,994	0,998	73,536	24,023
1	23,5	22,5	1,0175	0,992	0,998	72,548	17,14
2	23,5	22,5	1,016	0,991	0,998	69,256	12,25
5	23,5	22,5	1,0155	0,990	0,998	65,653	7,86
10	23,5	22,5	1,147	0,987	0,998	59,434	5,569
20	24	23,5	1,013	0,985	0,998	57,456	3,9458
40	23	23	1,013	0,9835	0,998	57,456	2,8356
80	23	23	1,0125	0,983	0,997	44,365	1,998
240	23	23	1,011	0,979	0,997	43,56	1,1658
1140	24,5	24,5	1,011	0,981	0,997	43,56	0,5368

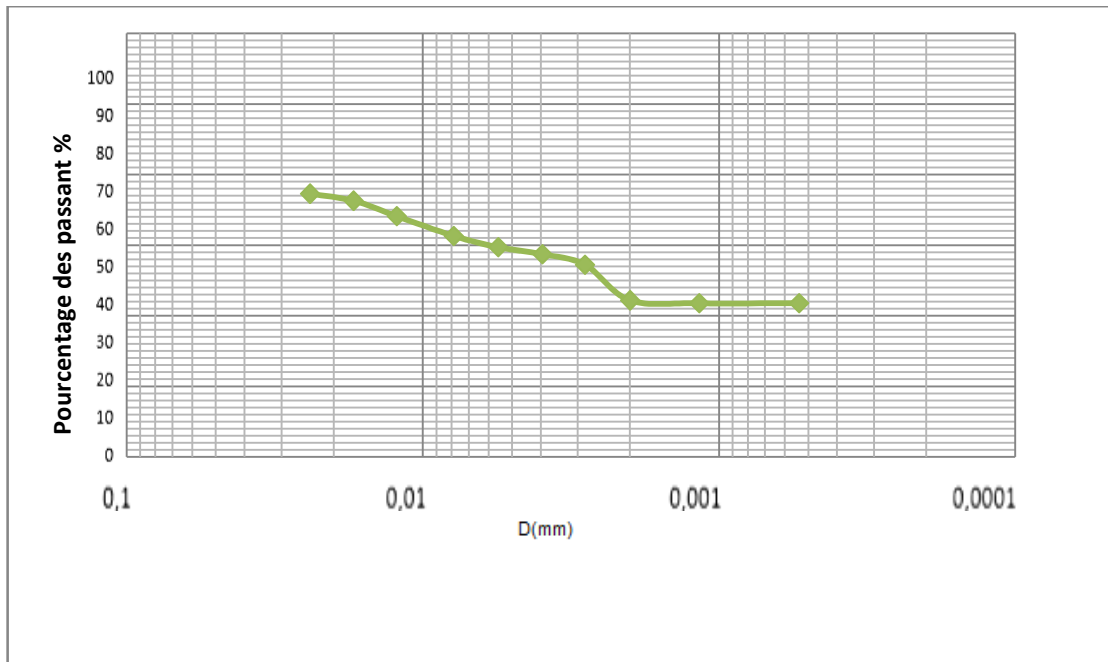


Figure IV.8 : Analyse granulométrique par sédimentation de l'échantillon de Centre Ville(Ech.Compacté)

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.4.1.5 Les limites d'ATTERBERG [NF P 94 – 051] :

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

La limite de liquidité est une teneur en eau qui sépare l'état liquide de l'état plastique. Elle est fixée conventionnellement comme la valeur de la teneur en eau, exprimée en %, pour laquelle une rainure de dimensions normalisées se ferme sur une longueur de 1 cm sous l'effet de 25 chocs appliqués au moyen de l'appareil de Casagrande.

La limite de plasticité est la teneur en eau qui sépare l'état plastique de l'état solide .cette limite est fixée conventionnellement comme la valeur de la teneur en eau, exprimée en %, pour laquelle un rouleau de sol confectionné manuellement, à dimensions fixées, se fissure.



Figure VI.10. Préparation de l'échantillon de sol.

a) la détermination de la limite de liquidité (w_L) :

L'essai se fait avec 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 creusé 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 inférieur à 2,2 mm, tout en réglant la hauteur de chute de la coupelle, on malaxe la totalité du tamisât afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide.

Avec une spatule, on étend une masse de pâte sur la coupelle qui doit être propre et sèche. Cette dernière est étalée en plusieurs couches pour éviter emprisonnement des bulles d'air, présentant à la fin de l'opération un aspect symétrique.

Par la suite, on trace une rainure à l'aide de l'outil à rainurer en forme de V, comme indiqué dans la figure.

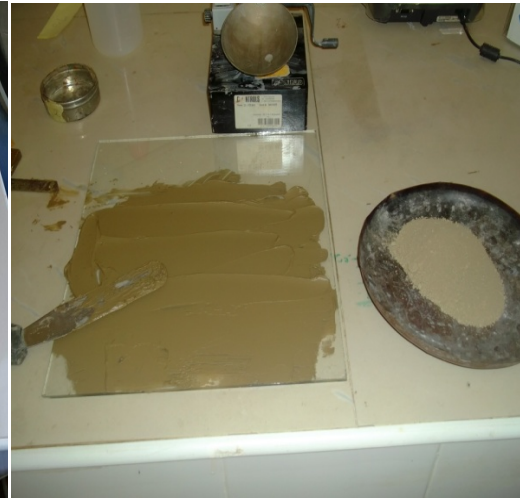


Figure VI.11. Matériels utilisés

Figure VI.12. La manipulation du Matériau

On applique à la coupelle une série de chocs, nécessaires pour que les lèvres de la rainure se rejoignent sur une longueur d'environ 1Cm. (le nombre de chocs doit être compris entre 15 et 35).

Des que la rainure se ferme, on prélève une quantité de mortier de chaque cotés des lèvres de la rainure et au voisinage de l'endroit ou elles se sont refermées, a fin de déterminer la teneur en eau, l'essai est renouvelé 4 Fois pour différentes teneur en eau obtenues soit par assèchement, soit par ajout d'eau, de façon a respecter le nombre de coups.

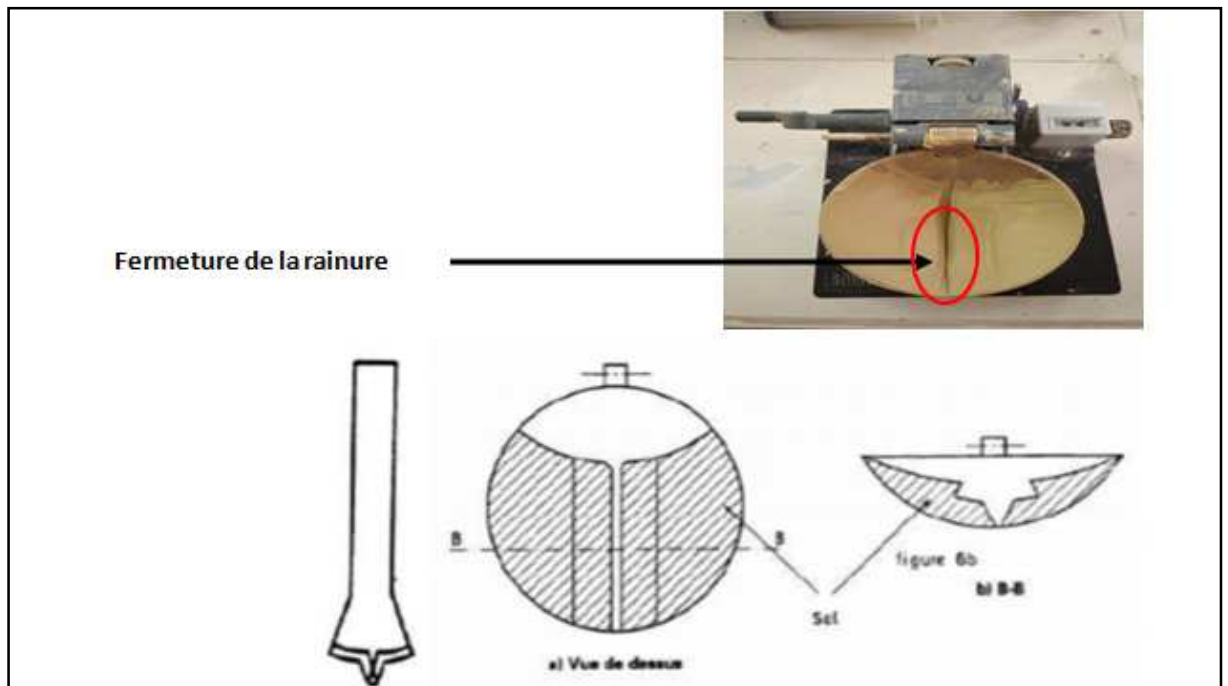


Figure IV.13 : La fermeture de la rainure.

b) la détermination de la limite de plasticité :

Afin de déterminer la limite de plasticité, on procède à la formulation de boulettes a partir de la pate préparée. À l'aide de la paume des mains, on roule cette dernière sur une plaque

lisse de façon à former un rouleau, on amincit progressivement en manipulant jusqu'à ce qu'il atteigne 3 mm d'épaisseur et une longueur de 10 cm (Figure VI.14)



Figure IV.14 Confection de boules.

Lorsque le cylindre se brise en de segments en le soulevant du milieu sur une hauteur variant de 15 à 20 mm, on estime alors arbitrairement que le sol a atteint sa limite de plasticité (Figure IV.15).



Figure IV.15. Cassure du Cylindre

On pèse alors ces derniers et on mesure la teneur en eau. L'essai est refait 4 fois pour chacun des échantillons. La limite de plasticité W_p , exprimé en pourcentage, correspond à la moyenne arithmétique des Teneur en eau obtenues.

c) l'indice de plasticité :

L'indice de plasticité mesure l'étendue du domaine de plasticité du sol. Il à un but fondamental.il est exprimé par la différence existante entre la limite de liquidité et la limite de plasticité.

$$I_p = W_L - W_p$$

d) Résultats des limites d'Atterberg :

d.1 limite de plasticité :

Après la finalisation des essais pour chaque échantillon de sol, on calcule la teneur en eau comme indiqué précédemment, on fait la moyenne des quatre résultats obtenus comme suit :

Tableau. IV-9 : Résultats des limites de plasticité.d' Azazga

N°	Sol d'Azazaga			W (%)
	Mh	Ms	Mw	
1	0.520	0.432	0.088	20.300
2	0.525	0.439	0.086	19.560
3	0.512	0.412	0.100	24.320
4	0.480	0.383	0.097	25.300
W Moyenne				22.370

Tableau. IV-10 : Résultats des limites de plasticité.de Tizirt

N°	Sol de Cap Djinet			W (%)
	Mh	Ms	Mw	
1	1.558	1.308	0.25	19.11
2	1.334	1.014	0.32	31.56
3	1.323	1.019	0.304	29.83
4	1.083	0.821	0.262	31.91
W Moyenne				20,2

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

N°	Sol de TIGZIRT			W (%)
	Mh	Ms	Mw	
1	0.527	0.421	0.106	25.17
2	0.703	0.537	0.166	30.91
3	0.867	0.682	0.185	27.12
4	0.857	0.681	0.176	25.84
W Moyenne				27.26

Tableau. IV-12 : Résultats des limites de plasticité.de C.V.Compacté

N°	Sol de Centre ville			W (%)
	Mh	Ms	Mw	
1	0.518	0.433	0.102	19.52
2	0.535	0.432	0.106	23.71
3	0.635	0.525	0.132	20.24
4	0.427	0.360	0.078	18.49
W Moyenne				20.49

d.2 la limite de liquidité :

Les valeurs trouvées des limites de liquidité des quatre échantillons sont inscrites aux tableaux suivants :

Tableau IV.13 : Limite de liquidité de sol d’Azazga

N	M.Humide	M. sèche	M.eau	Nombre de coups	WL (%)
1	5,192	3.196	1.996	35	62.44
2	5.391	3.394	1.997	26	58.8
3	6.987	4.456	2.531	20	56.75
4	6.389	4.100	2.289	17	55.8

Tableau IV.14 : Limite de liquidité du sol de TIGZIRT

N	M.Humide	M. sèche	M.eau	Nombre de coups	WL (%)
1	5.083	3.307	1.776	22	53.679
2	4.944	3.232	1.712	20	52.965
3	5.685	3.761	1.924	27	51.144
4	4.887	3.249	1.638	30	50.239

Tableau IV.15. : Limite de liquidité du sol de Cap Djinet.

N	M.Humide	M. sèche	M.eau	Nombre de coups	WL (%)
1	4.323	2.989	1.334	34	44.614
2	4.582	3.209	1.373	30	42.762
3	4.815	3.425	1.390	23	40.559
4	4.715	3.391	1.324	20	39.021

Tableau IV.16 Limite de liquidité du sol de Centre ville(Ech.Compacté)

N	M. Humide	M. sèche	M.eau	Nombre de coups	WL (%)
1	5.618	3.790	1.818	16	48.23
2	6.638	4.662	2.018	20	42.36
3	5.360	3.751	1.609	28	42.89
4	5.191	3.746	1.445	30	38.57

Sur un graphe, on représente les teneurs en eau W obtenues en ordonnée et le logarithme du nombre de coup N appliqués en abscisse. La relation entre les paramètres permet de tracer une droite d'où la limite de liquidité W_L est déterminée. Elle correspond à une teneur en eau obtenue pour une valeur $N = 25$ coups. Les résultats sont comme suit :

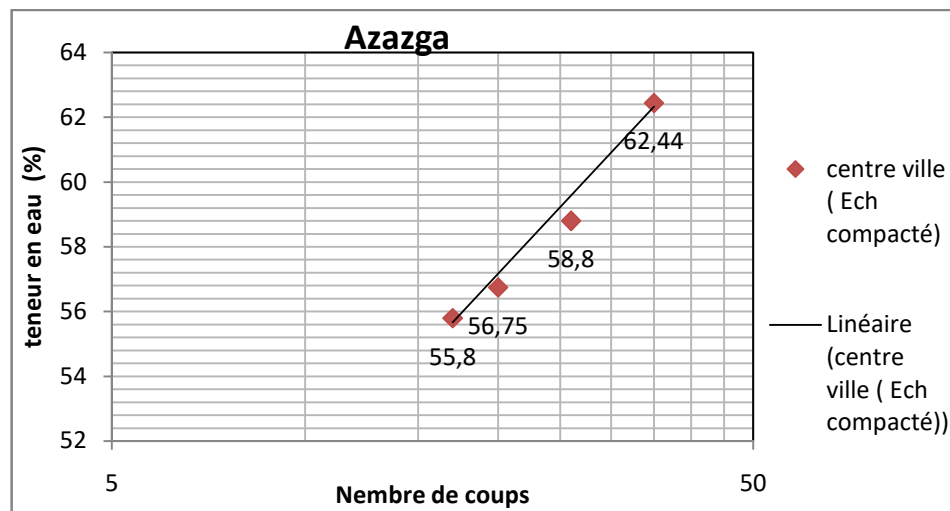


Figure IV.16: Courbe de limite de liquidité de l'argile d'Azazga

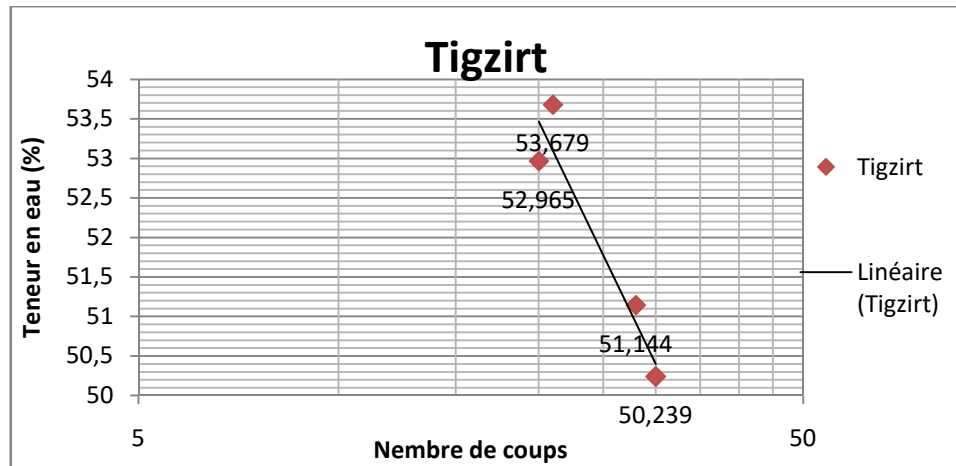


Figure IV.17 : Courbe de limite de liquidité de l'argile de Tizirt.

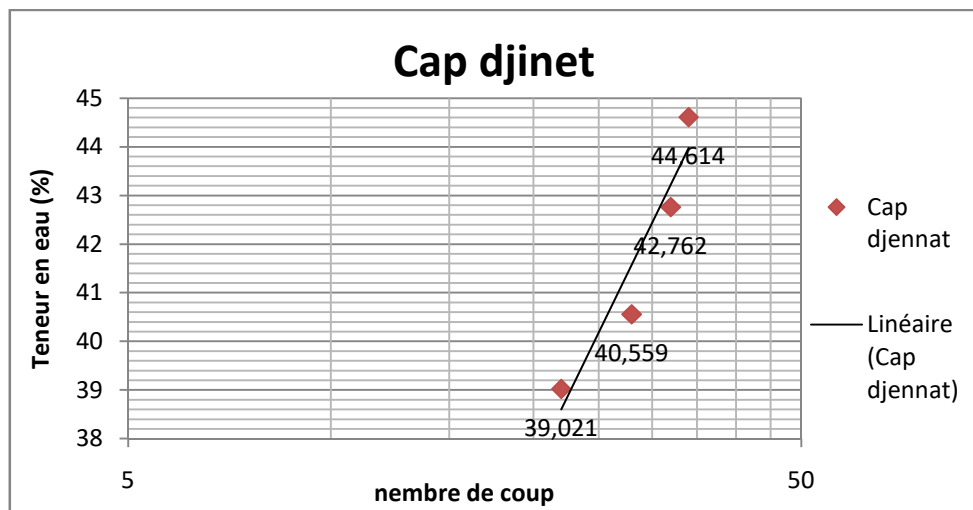


Figure IV.18 : Courbe de limite de liquidité de l'argile de Cap Djinet.

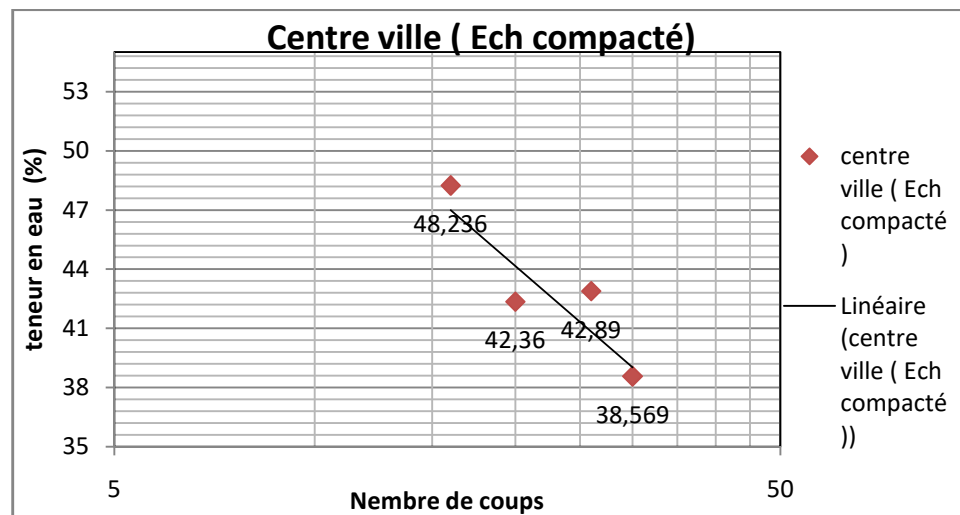


Figure IV.19 : Courbe de limite de liquidité de l'argile de Centre Ville.(Ech Compacté)

Chapitre IV : Identification Des Sol Etudiés

Tableau IV.17. : Tableau récapitulatif des limites de liquidité des sols étudiés.

Le Site	AZAZGA	TIGZIRT	CAP.DJINET	CENTRE.VILLE (Ech Compacté)
WL (à25coups)	59.35	49.7	40.2	47.03

Tableau IV.18 Classification des sols selon leur indice de plasticité (MOURoux.P et al, 1988)

Valeurs D'indice de Plasticité	Désignation
$0 < I_p < 5$	Non Plastique
$5 < I_p < 30$	Peu Plastique
$30 < I_p < 50$	Plastique
$50 < I_p$	Très Plastique

Tableau IV-19: Les résultats et les appréciations.

Le Site	AZAZGA	TIGZIRT	CAP DJINET	CENTRE VILLE (Ech.Compacté)
WL	59.35	49.7	40.2	41.75
WP	22.37	27.26	20.2	20.49
IP	36.96	22.440	20	24.26
Résultat	Plastique	Peu plastique	Peu plastique	Peu 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 relation suivante : $I_c = (WL - W) / I_p$

Tableau IV-20: L'indice de consistance.

Ic	Appréciation
0 – 0.25	Pâteux
0.25 – 0.5	Mou
0.5 – 0.75	Ferme
0.75 - 1	Mi -dur
> 1	Dur

Tableau IV-21 : Résultats de l'indice de consistance

Site	Ic	Appréciation
Azazga	0.737	Ferme
Tigzirt	1.549	Dur
Cap Djinet	0.926	Mi-Dur
Centre. Ville (Ech Compacté)	0.876	Mi-Dur

e) interprétation des résultats :

Les résultats des limites de liquidités et de plasticités montrent les sols de Tigzirt, Cap Djinet Centre ville (Ech Compacté) ont un comportement peu plastique, mais l'argile de Azazga a un comportement plastique. Pour les résultats de l'indice de consistance Ic, on a conclu que l'argile d'Azazga est Ferme, Tigzirt est Dur, par contre le sol de Cap Djinet et Centre ville ont une consistance de sol Mi-Dure.

IV.4.1.6 L'activité AC :

La Granulométrie, caractérisé par le pourcentage des grains dont la dimension est inférieure a 2 µm (proportion d'argile F2 :% < 2µm) nous aide à calculer l'activité de SKEMPTON selon la norme NF P94-056 en utilisant l'équation suivante : $AC = I_p / F2$

Tableau IV-22 : Classes de l'activité A_c .

Classes d'activité	
Activité A_c	Dénomination
$0 < A_c < 0,5$	inactif
$0,5 < A_c < 0,75$	peu actif
$0,75 < A_c < 1,25$	normal
$1,25 < A_c < 2$	actif
$2 < A_c$	très actif

Tableau IV-23 : Activité (AC) de SKEMPTEN pour les sols

site	Activité (AC)	Résultats
Azazga	1.41	actif
Tigzirt	0.609	peu actif
Cap Djinet	0.880	normale
Centre ville (EchCompacté)	0.594	actif

IV.4.1.7 Mesure du potentiel de gonflement :

Les méthodes indirectes basées sur l'évaluation des caractéristiques physiques (teneur en eau, densité sèche, limites d'Atterberg, valeur du 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 les 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.24 : 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.25 : Résultats du potentiel de gonflement à partir de l'indice de plasticité pour
les sols

Site	Indice de plasticité	potentiel de gonflement
Azazga	36.96	Haut
Tigzirt	22.44	Moyen
Cap Djinet	20.00	Moyen
C.V (Ech Compacté)	24.26	Moyen

b) Combinaison de deux paramètres

Tableau IV.26 : 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.27: Résultats de Degré d'expansion en fonction de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité (SNETHEN.N et al. 1977).

Site	I _p	W _L	Classification
Azazga	36.96	59.35	Moyen
Tigzirt	22.44	49.7	Faible
Cap Djinet	20	40.2	Faible
C.V(Ech.Compacté)	24.26	41.75	Faible

IV.4.1.8 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.

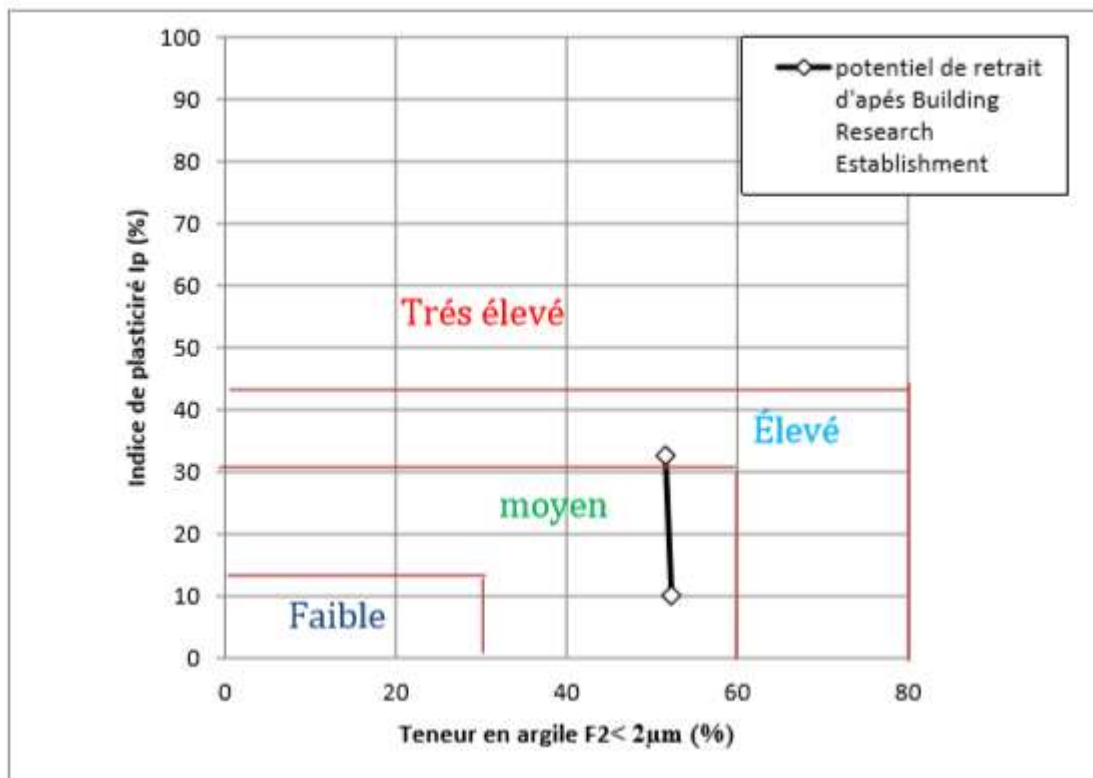


Figure IV.20. Potentiel de retrait (Building Research Establishment, 1980).

Tableau IV.28 : Evaluation du potentiel de retrait à partir de l'indice de plasticité.

Site	Ip	F2 < 2 µm (%)	Commentaire
Azazga	36.96	52,5	Elevé
Tigzirt	22.44	40,1	Moyen
Cap Djinet	20.00	40,2	Moyen
C.V(EchCompacté)	24.26	40,5	Moyens

IV.4.1.9 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 60 g de matériau trempé dans 0,5 L de l'eau distillée et maintenu 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 entourée 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:

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

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).



Figure IV.21. Matériel d'essai au bleu de méthylène (résultats de l'essai à la tâche).

Tableau IV.29: 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.30: Résultats des valeurs au bleu de méthylène.

Site	VBS	Classification
Azazga	9.96	Sol Très Argileux
Tigzirt	4.08	Sol Limoneux -Argileux
Cap Djinet	6.33	Sol Argileux
C.V (Ech Compacté)	5.58	Sol Argileux

• **Interprétation des résultats**

Les valeurs obtenues au bleu de méthylène montrent que les deux sites de Cap Djinet et Centre ville présentent des sols Argileux. Tandis que le site de Tizgirt représente un sol limoneux – argileux, et celui d’Azazga représente un sol Très Argileux.

Tableau IV.31 : Résultats finals des expériences pour le site d’Azazga.

Site	W %	ρ_s (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_h (g/cm ³)	e	Sr %	Ip%	Ic	AC	VBS
Azazga	32.101	2.70	1.61	2.13	0.677	39.442	36.96	0.737	1.41	9.96
Appréciation	élevée	/	Moyenne	Humide	Moins Compacte	Humide	Plastique	mi-dur	Actif	Très Argileux

Tableau IV.32 : Résultats finals des expériences pour le site de Tizgirt.

Site	W %	ρ_s (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_h (g/cm ³)	e	Sr %	Ip %	Ic	Ac	VBS
Tizgirt	14.925	2.55	1.78	2.044	0.432	15.769	2.440	1.549	0.609	4.08
Appréciation	Faible	/	Moyenne	Légèrement Humide	Moins Compact	Légèrement humide	Peu Plastique	Dur	Moyennement actif	Limoneux-Argileux

Tableau IV.33 : Résultats finals des expériences pour le site de Cap Djinet.

Site	W %	ρ_s (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_h (g/cm ³)	e	Sr %	Ip%	Ic	Ac	VBS
Cap Djinet	21.670	2.68	1.69	2.067	0.582	17.195	20.00	0.926	0.880	6.33
Appréciation	Moyenne	/	Moyenne	Légèrement Humide	Moins Compacte	Légèrement Humide	Peu Plastique	Mi-Dur	Moyennement actif	Argileux

Tableau IV.34 : Résultats finals des expériences pour le site de C.V.Compacté

Site	W %	ρ_s (g/cm ³)	ρ_d (g/c ³)	ρ_h (g/c ³)	e	Sr %	Ip%	Ic	Ac	VBS
Centre. Ville (Ech Compacté)	22.140	2.80	1.96	2.70	0.418	37.366	24.26	0.876	0.594	5.58
Appréciation	Moyenne	/	Dense	Légèrement Humide	Compacte	Humide	Peu. Plastique	Mi- Dur	Moyennem ent actif	Argileux

IV.4.2 Analyse des compositions minéralogiques des échantillons étudiés :

Cette étude consiste à réaliser l'analyse minéralogique par la diffraction aux rayons X. L'étude minéralogique est effectuée au laboratoire du Centre de Recherche Et Développement CRD unité de SONATRACH située à BOUMERDES. Les essais sont réalisés sur des échantillons sous forme de poudres d'argiles d'un diamètre de 80 μm . Ces poudres sont obtenues par la méthode de broyage.

IV.4.2.1 Principe de la diffraction aux rayons X :

Les radiations X possèdent la propriété de traverser un matériau et d'être diffractées par les atomes. Le degré de diffraction dépend de l'énergie du rayonnement incident et de la distribution atomique.

Le Diffractogramme constitue l'empreinte caractéristique de la structure cristalline de la substance analysée. Ce dernier est acquis avec un diffractomètre, constitué d'un tube de rayons X (fixe) et d'un système d'échantillon - détecteur (mobile) positionné sur une unité géométrique.

Le tube de rayons X émet un rayonnement vers un échantillon placé au centre du goniomètre, lequel diffracte une partie du rayonnement incident vers un système de détection. Cette technique est principalement utilisée pour les substances cristallines et plus spécialement minérales. Elle peut parfois être utilisée pour des produits organiques, néanmoins organisés spatialement, tels que les hauts polymères naturels et synthétiques, les cires cristallines, etc. Les diagrammes peuvent être obtenus directement à partir d'un fragment solide, ou de petites quantités de poudre. Cette méthode est particulièrement utile pour l'identification des phases formant un matériau solide cristallin par comparaison à des fiches étalons.

- Domaines d'application :

- Recherche
- Industrie :
- Métallurgie /Sidérurgie
- Ciment / céramique,
- Pharmaceutique,
- Environnement.

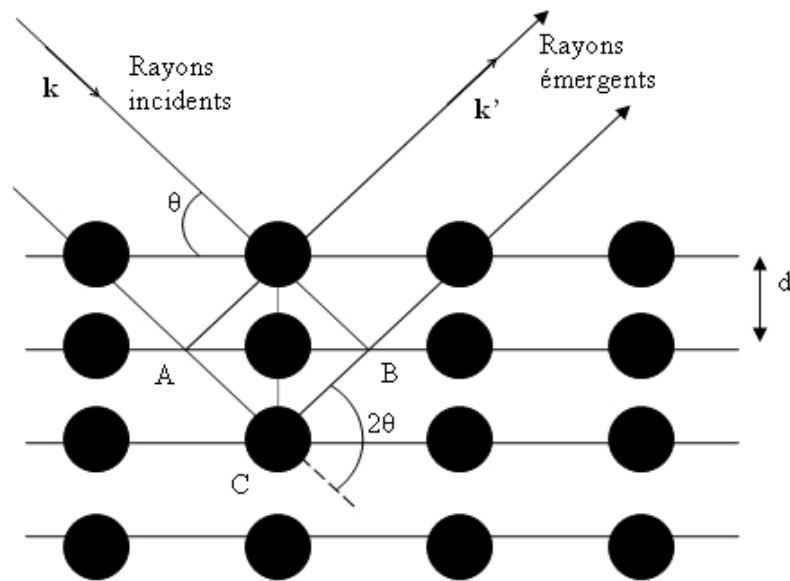


Figure IV.22 Réflexion des rayons X par une famille de plans réticulaires espacés d'une distance d .



Figure IV.23 Machine à diffraction rayon X

IV.4.2.2 Minéralogie des sols étudiés :

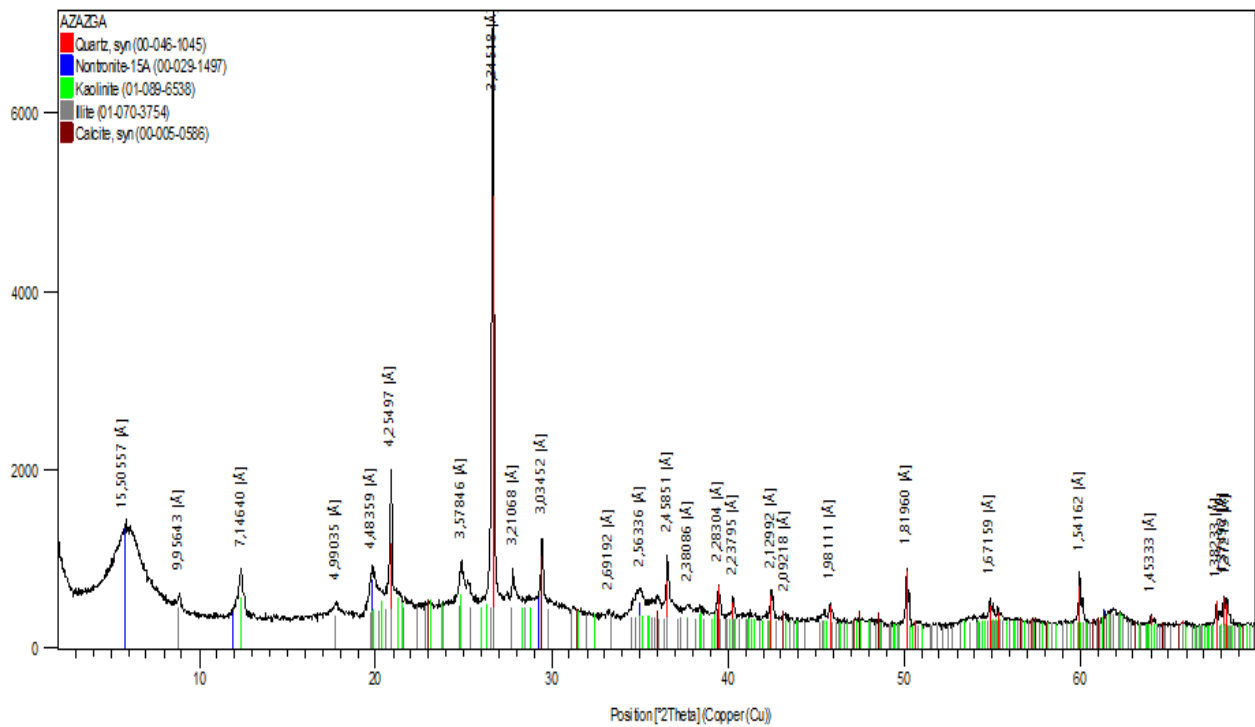


Figure IV.24. Diffractogramme aux rayons X de l'échantillon d'Azazga

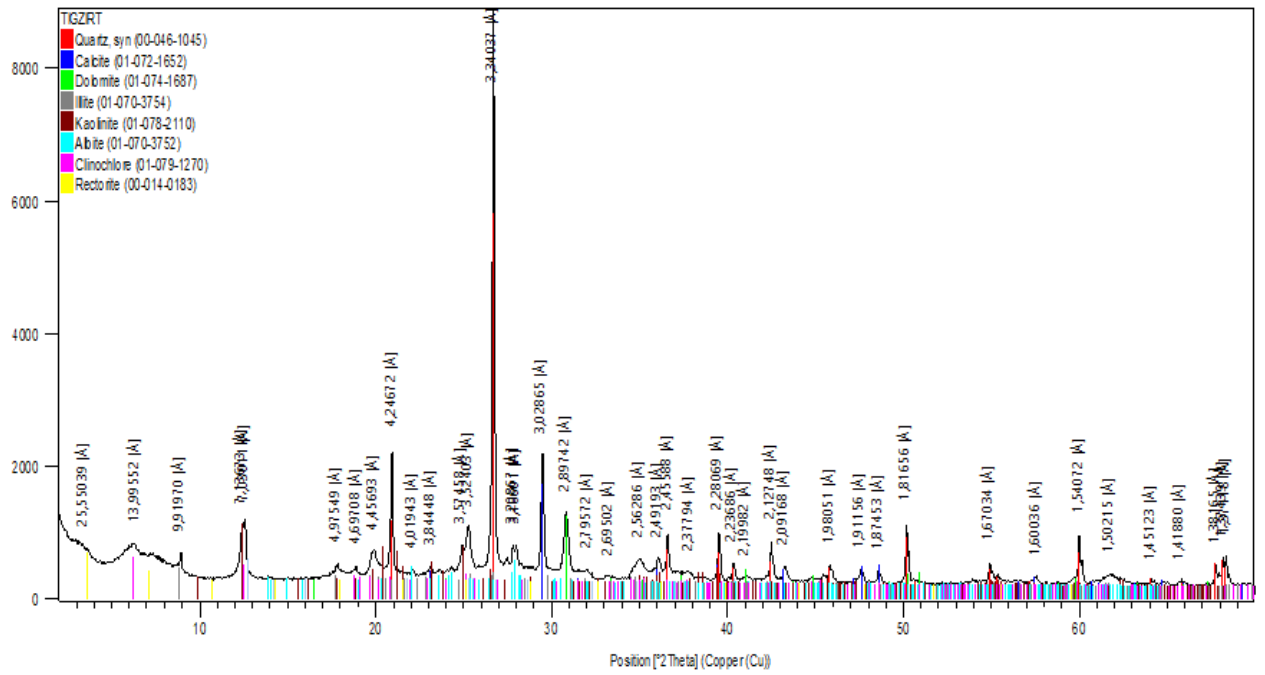


Figure IV.25. Diffractogramme aux rayons X de l'échantillon de Tizgirt.

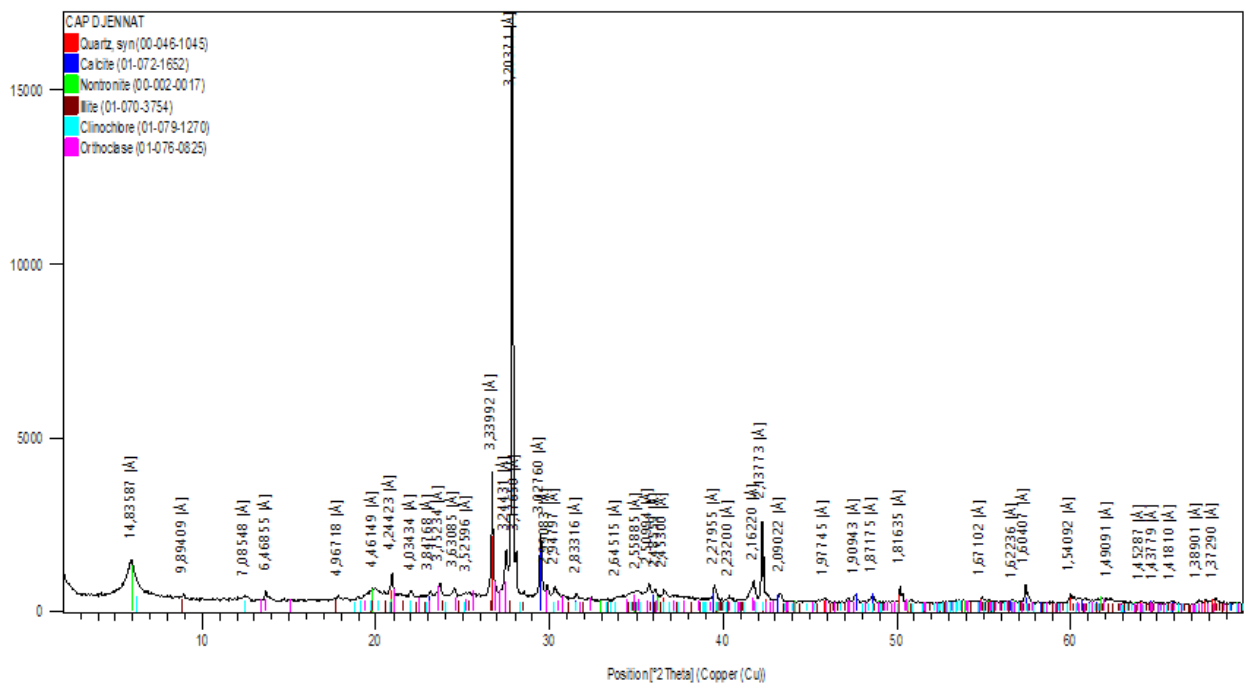


Figure IV.26 Diffractogramme aux rayons X de l'échantillon de Cap Djinet.

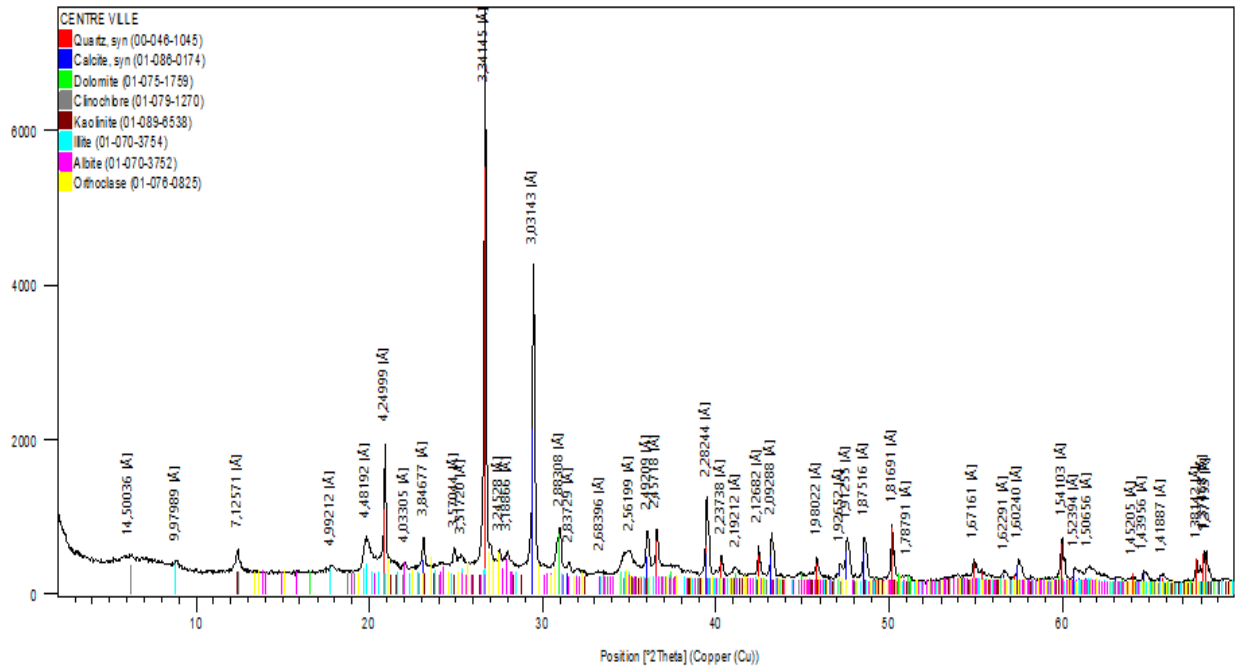


Figure IV.27 :Diffractogramme aux rayons X de l'échantillon de Centre Ville (Ech Compacté)

• **Interprétation des résultats :**

L'analyse de l'échantillon par la méthode de la diffraction aux rayons X montre la Composition minéralogique suivante:

- L'échantillon d'Azazga est principalement composé de : Quartz, Nontronite, Kaolinite Calcite et Illite.
- L'échantillon de Tizirt est principalement composés de : Quartz, Rectorite, Dolomite Illite, Kaolinite, Albite, Clinocllore et Calcite.
- L'échantillon de Cap Djinet est Principalement Composé de : Orthoclase, Clinocllore, Illite, Nontronite, Calcite et Quartz.
- L'échantillon de Centre ville est principalement composés de : Quartz, Calcite, Dolomite, Clinoclhor, Kaolinite, Illite, Orthoclase et Albite.

IV.5 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 d'identification réalisés, on constate que l'échantillon d'Azazga est un sol très Argileux, c'est la raison d'avoir un potentiel de gonflement haut (MOURoux.P et al. 1988 et SNETHEN.N et al. 1977) et un potentiel de retrait élevé (Building Research Establishment), son comportement est plastique et ferme et c'est un sol moins compacte (l'indice des vides important) et humide avec une teneur en eau élevé.

Pour l'échantillon de Tizirt: c'est un sol limoneux-argileux, son potentiel de gonflement et retrait sont moyen. Ces résultats sont dus à un comportement dur avec une saturation légèrement humide .

Pour les échantillons de Centre ville et Cap Djinet c'est des sols argileux, leur potentiel de gonflement est moyen Ces résultats sont dus à un comportement mi -dur avec saturation légèrement humide et humide et un pourcentage de teneur en eau moyen.

Les résultats obtenus de l'analyse minéralogique, montrent que toutes les argiles étudiées contiennent une différence dans les pourcentages des minéraux dominants.

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 et l'essai de Canicules) suivis par leurs interprétations.

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

V.2 Préparation des échantillons :

V.2.1 Échantillonnage :

- Les échantillons sont coupés en 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 pour les échantillons :**
- Azazga : argile d'azazga (passé par les conditions initiales de chaque essai)

- Azazga N : argile d'azazga a l'état naturel (sans passé par les conditions)
- Tizirt : argile de tizirt (passé par les conditions initiales de chaque essai)
- Tizirt N : argile de tizirt a l'état naturel (sans passé par les conditions)
- Cap Djinet : argile de Cap Djinet (passé par les conditions initiales de chaque essai)
- Cap Djinet N : argile de Cap Djinet a l'état naturel (sans passé par les conditions)
- C.V.Compactée : argile de centre ville compactée (passé par les conditions initiales de chaque essais)
 - C.V.N.Compacté : argile de centre ville compactée a l'état naturel (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 température ambiante du laboratoire, ils sont soumis à 10 Cycles de gel-dégel .Les cycles de températures choisis c'est suivant la nature du climat du nord algérien plus précisément 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) °C ;
- tares, les barques ;
- enceinte climatique ;
- balance de précision à ±0.1gr, 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.

Dés 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 d'Azazga passés par l'étuvage et imbibés (Azazga)
- 2 du site de Tigzirt passé par l'étuvage et imbibés (Tigzirt)
- 2 du site de Cap Djinet passé par l'étuvage et imbibés (Cap Djinet)
- 2 du site de Centre ville passé par l'étuvage et imbibés (C.V.Compacté)

Un échantillon de chaque site à l'état naturel (choisi comme échantillon témoin) :

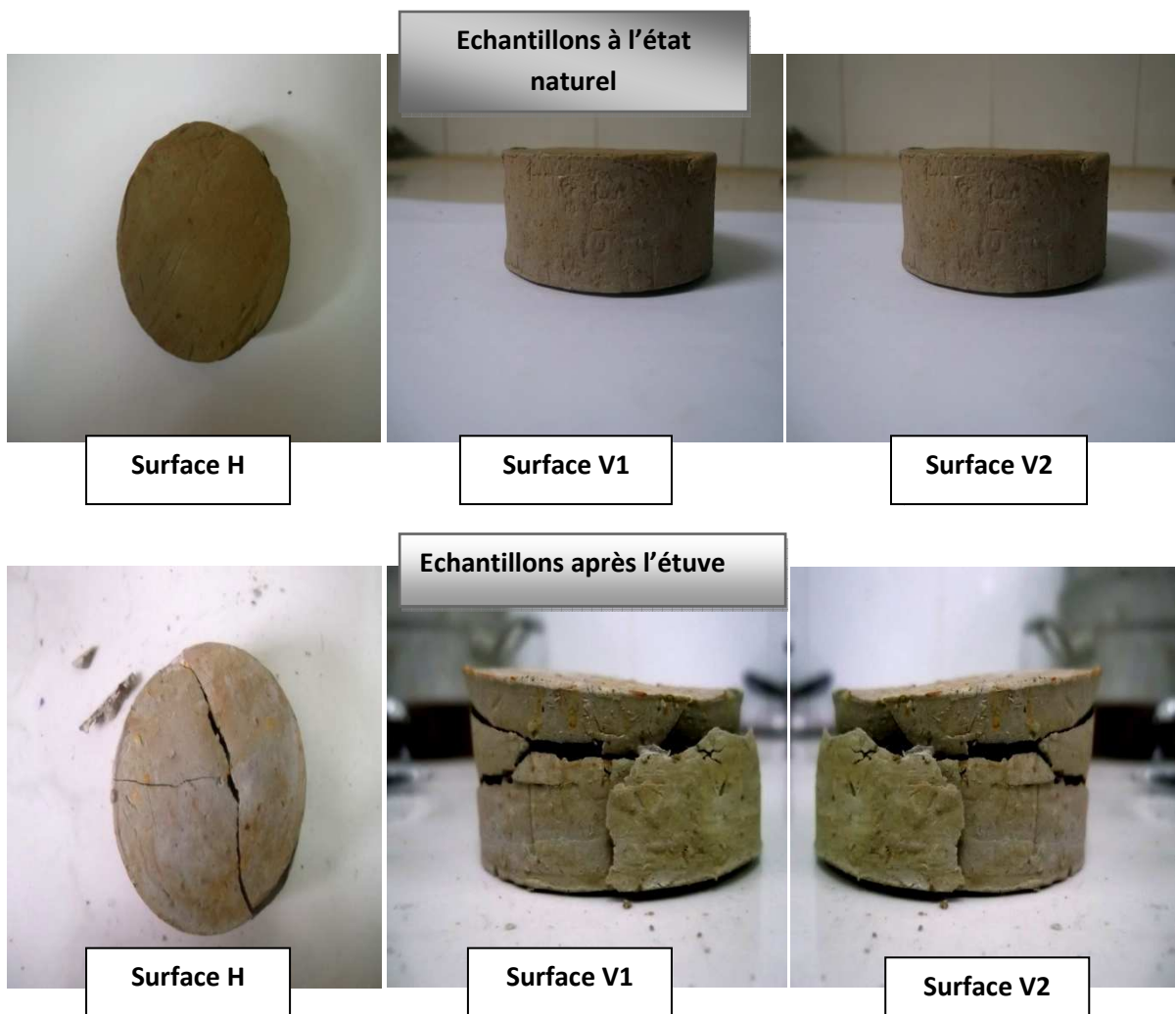
- Azazga N ;
- Tizirt N ;
- Cap Djinet N ;
- C.V.N.Compacté.

✓ Les Spécificités du cycle :

<u>Gel :</u>	<u>Dégel :</u>
Température : -2C°	Température : 45C°
Humidité : 90%	Humidité : 90%
Ventilation : 50	Ventilation 80:

V.3.1.4 Images des échantillons :

Les images des échantillons N°01 avant et après essai, de Azazga, Tizirt, Cap Djinet, C.V.Compacté retenues pour cet essai sont représentées sur les figures V.3 et V.4. Les autres images sont dans l'ANNEXE.



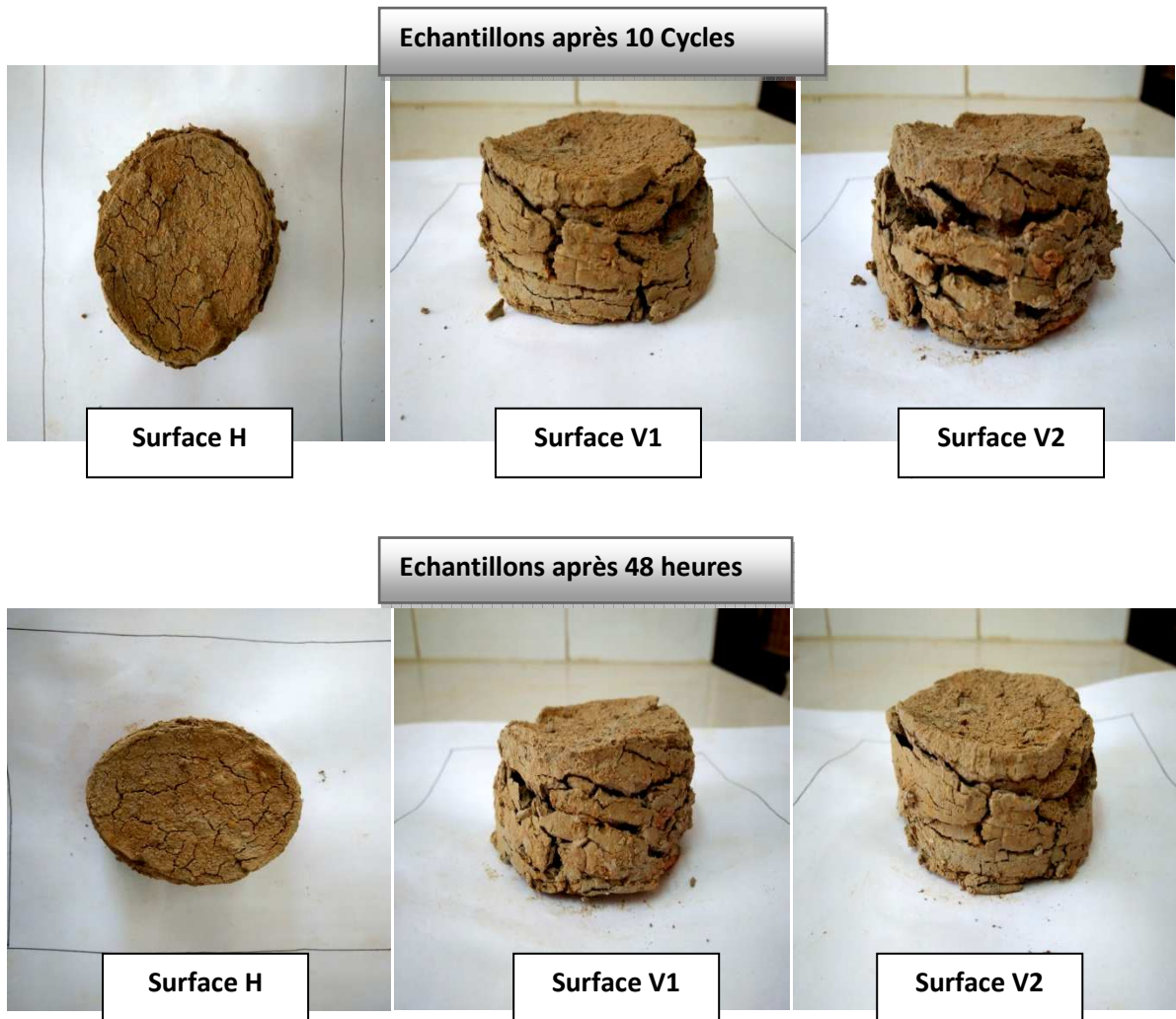
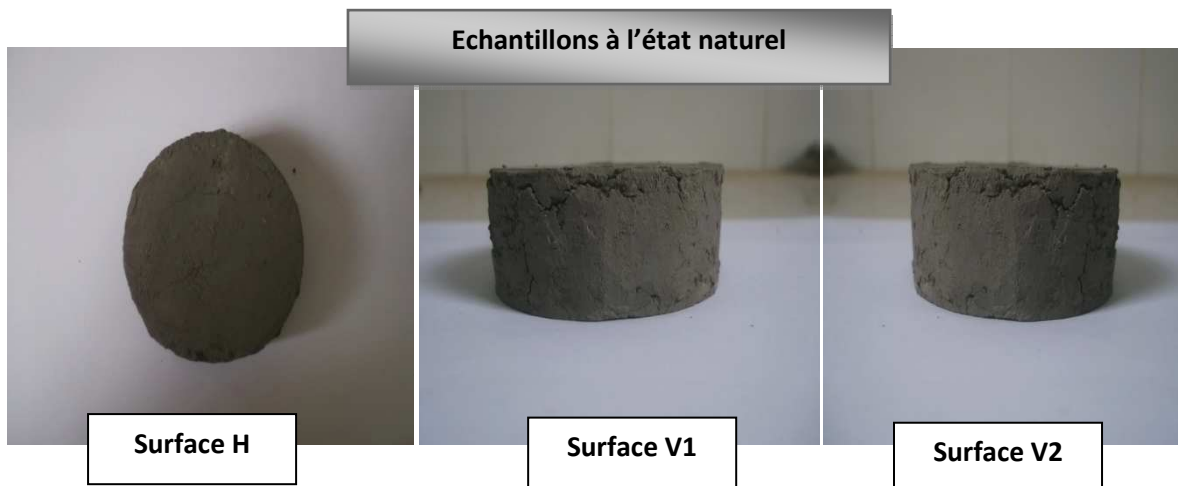


Figure V.3 : Les images de l'échantillon N°01 d'Azazga à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.



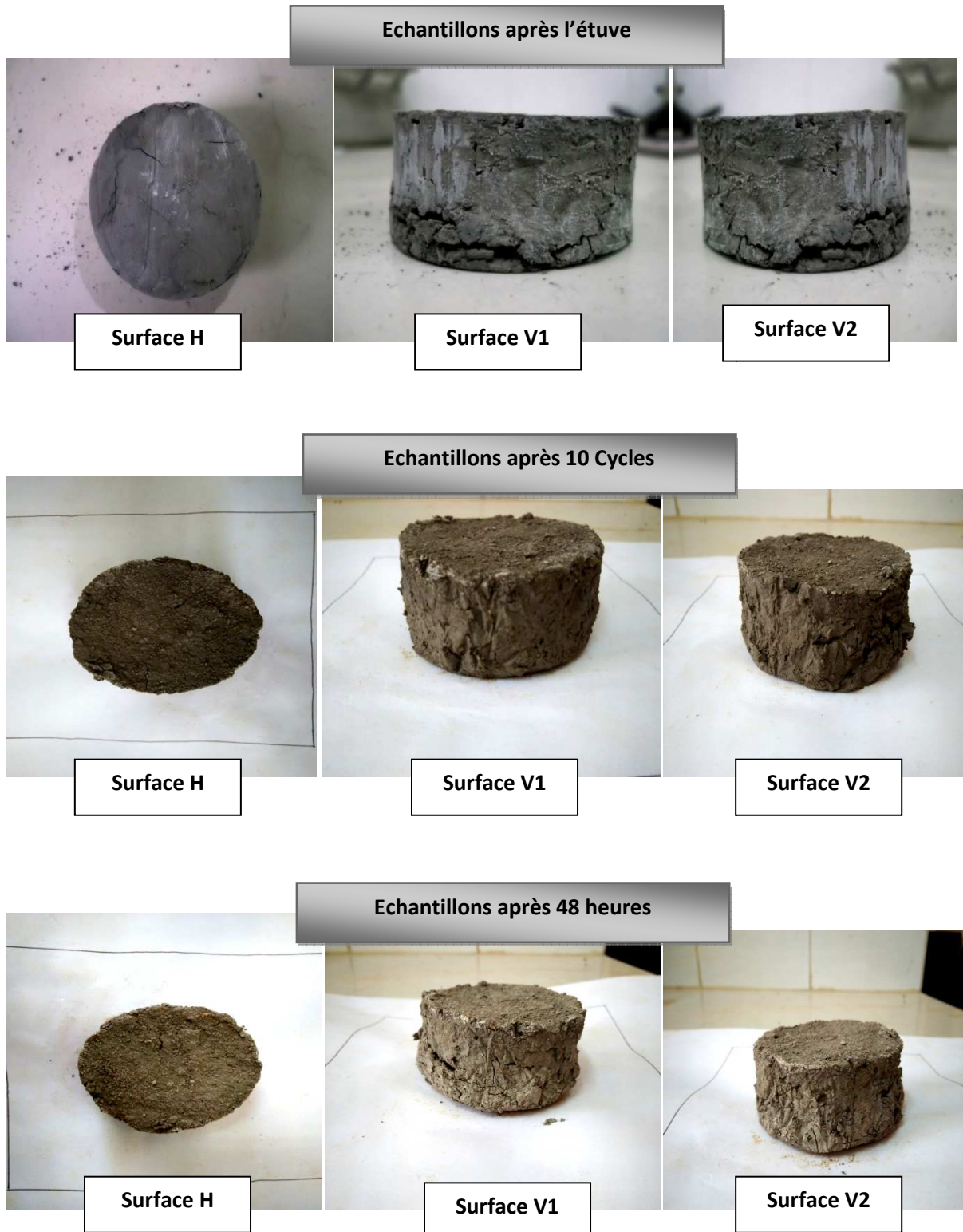
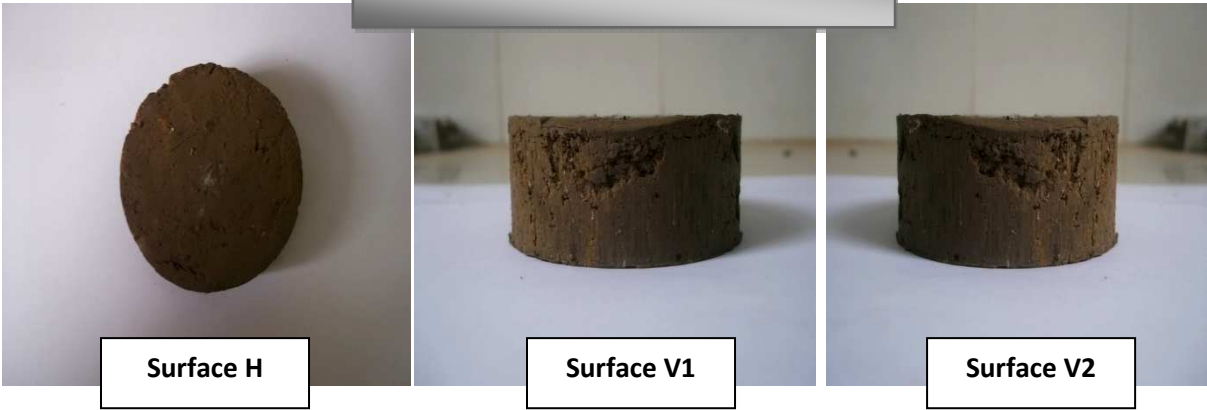
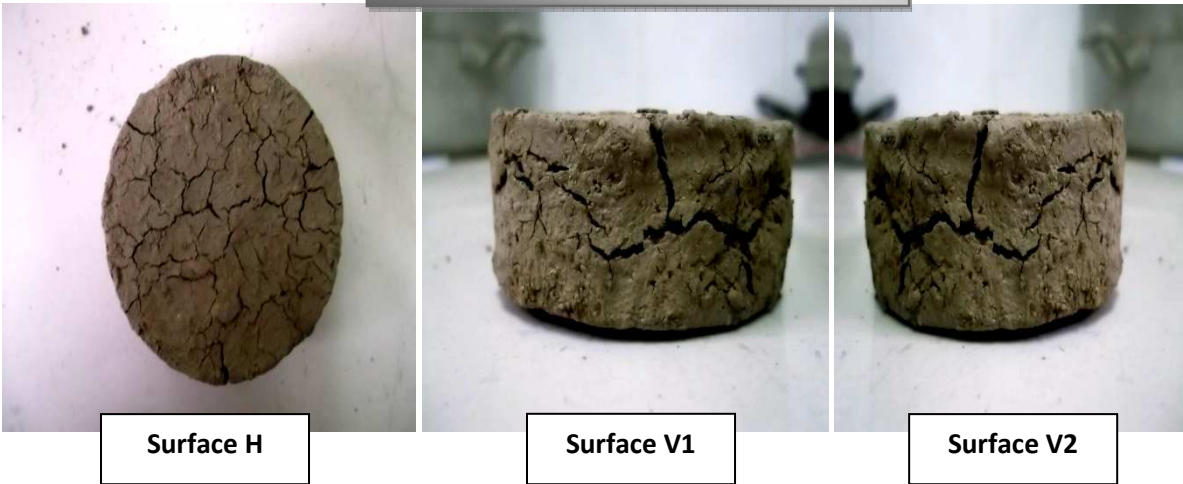


Figure V.4: Les images de l'échantillon N°01 de Tizirt à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.

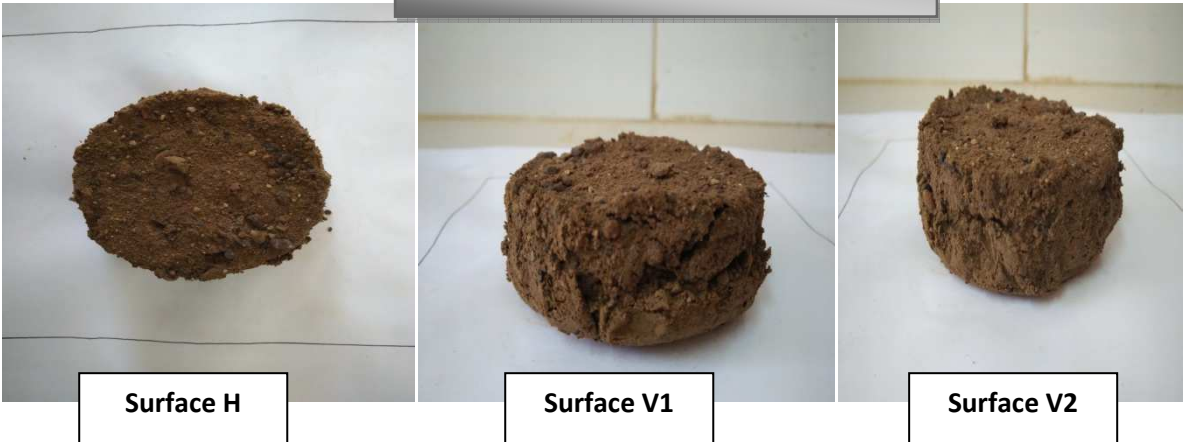
Echantillons a l'état naturel



Echantillons après l'étuve



Echantillons après 10 cycles



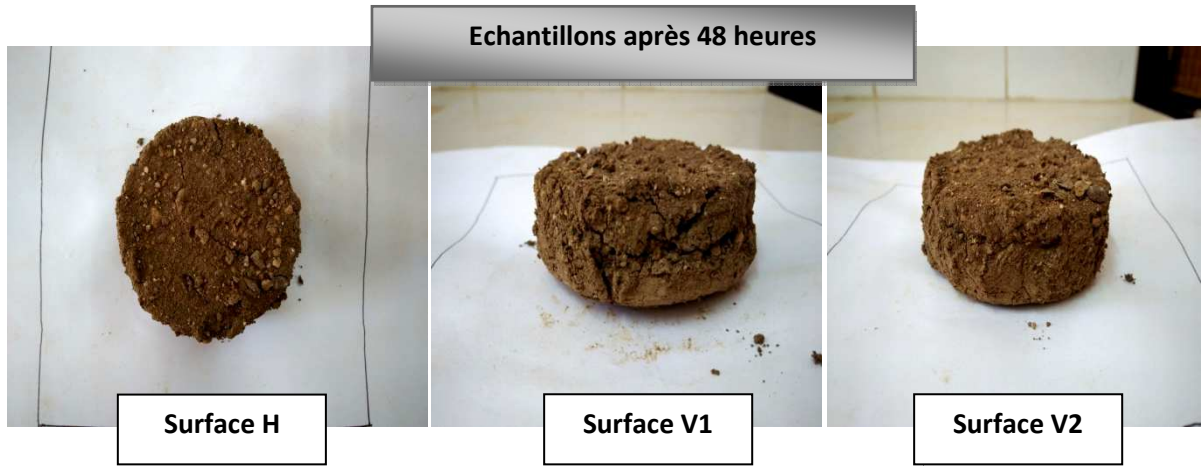
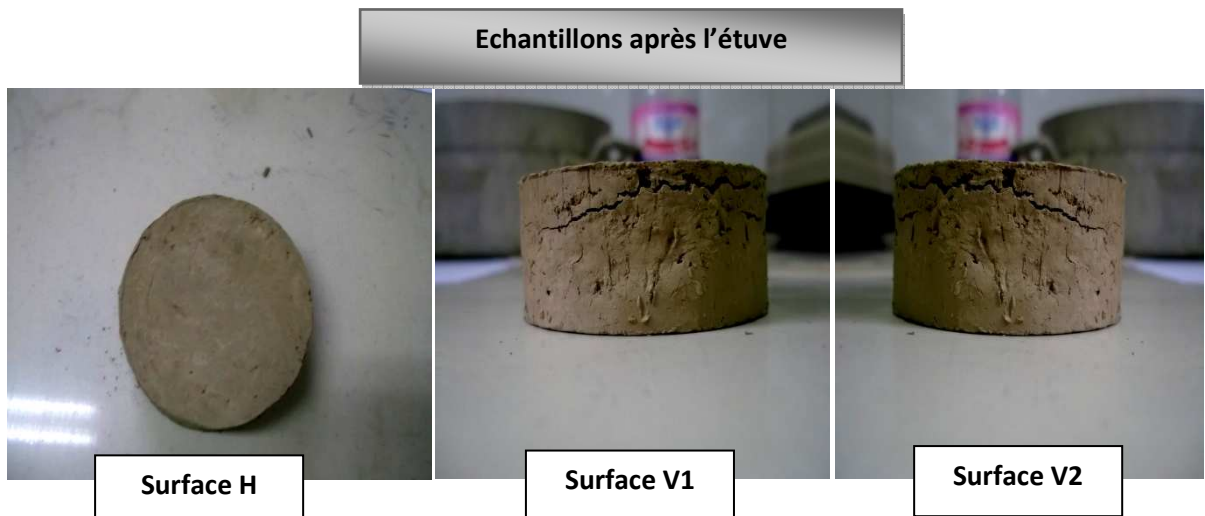
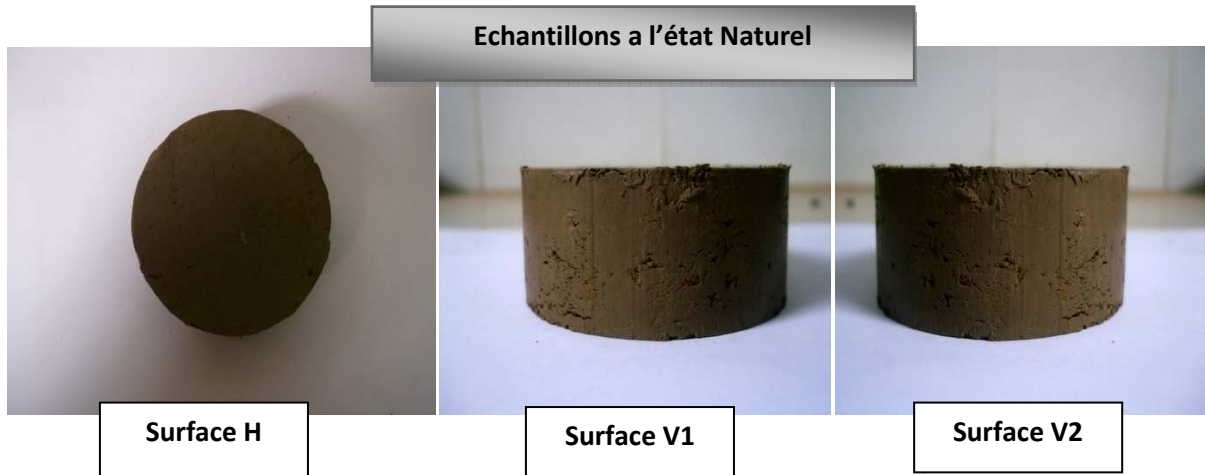


Figure V.5: Les images de l'échantillon N°01 de Cap Djinet à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique



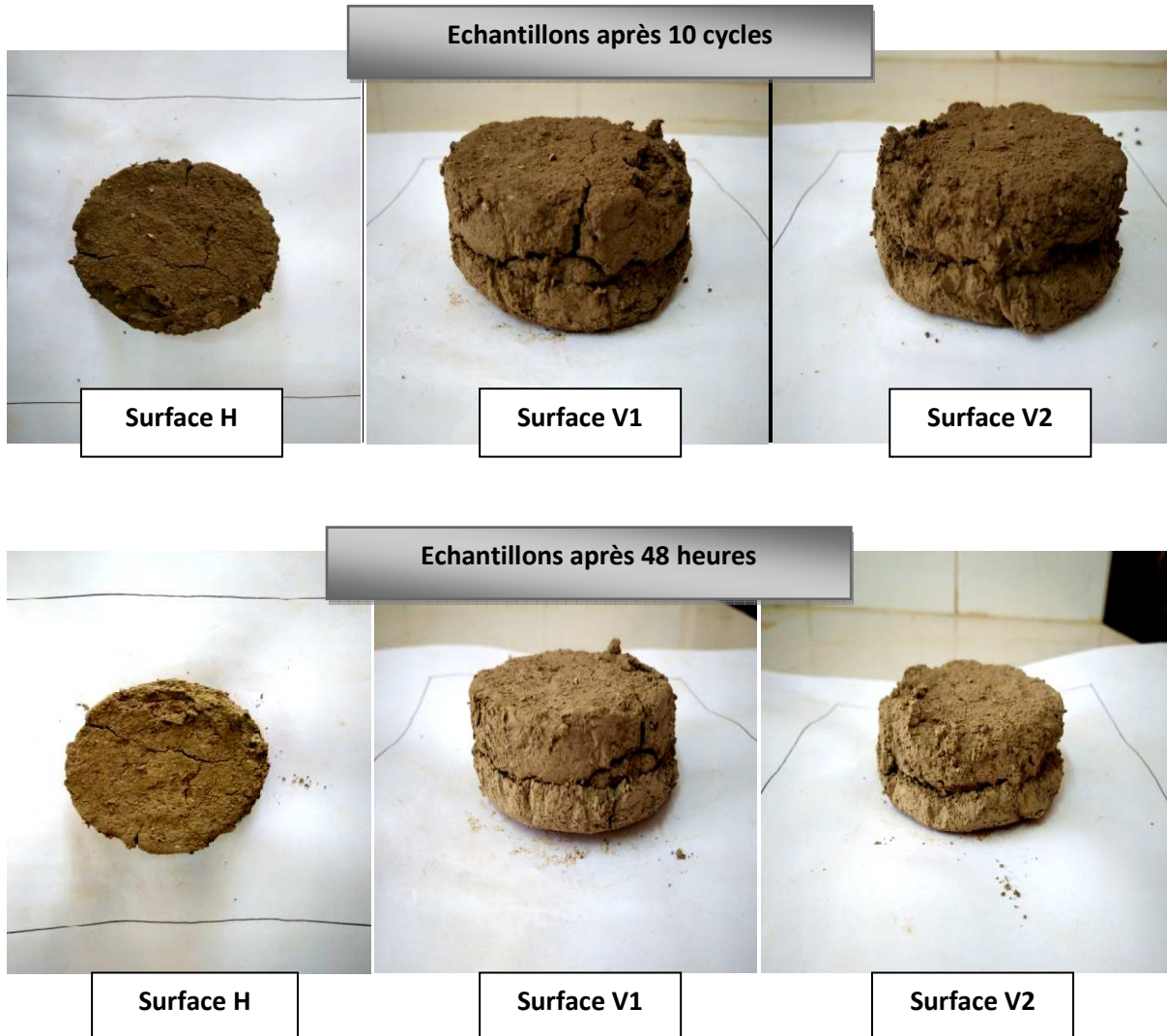


Figure V.6 : Les images de l'échantillon N°01 de C.V.Compacté à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.

- **interprétation des résultats des échantillons:**

L'étude est réalisée sur des échantillons d'argile intacte prélevée de 4 sites différents de deux wilaya différentes (Tizi-Ouzou et Boumerdes). 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, V.5, V.6 et dans l'ANNEXE aux Figures de I.1 à I.8.

Les observations ont montré une apparition de petites fissures dans les échantillons témoins (sans passage par les conditions normalisées) Azazga N, Tizirt N, Cap Djinet N et C.V.N.Compacté, après 10 cycles de Gel-Dégel.

Durant la phase de séchage dans l'étuve, une fissures très importante a été remarqué dans les 2 échantillons du site D'Azazga... des autres fissures apparaissent commencent à s'ouvrir après chaque cycle, ainsi que des modifications des surfaces verticales des échantillons étudiés.

Après le dernier cycle des fissures plus larges ont été remarquées avec une augmentation de leurs masses par rapport à leurs états initiaux. Ça peut s'expliquer par la présence de l'illite, qui est 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 Azazga à l'état naturel « Azazga » (sans passée aux conditions de l'essai) qui est un échantillon témoin, sa surface horizontale est moins modifiée par rapport à celle des échantillons 01 et 02 « Azazga », pour la surface verticale on voit des changements par rapport à sont état initial (les changements de volumes et de textures on été repérés). Sans oublier que les échantillons d'Azazga ont un potentiel de gonflement très haut et leur sol est très argileux.

Pour les échantillons de Tizirt et Cap Djinet après leur passage à l'étuve des fissures pas très importantes ont été repérées. Après le dernier cycle les fissures ne se développent pas beaucoup mais une modification de la forme des échantillons et leurs masses a été remarquée.

Pour les échantillons compactés « C.N.Compacté » des fissures apparaissent et spécialement sur le plan horizontal des échantillons, et éventuellement une modification de forme et de masse.

À la fin en peut dire que le climat affect d'une manière considérable le sol d'Azazga. Les images des échantillons ont montré une apparissions des fissures surtout sur la surface verticale, après l'étuve une modification de surface avec des grandes fissures à la fin de 10^{ém} cycle et une différence de masse par rapport à l'état initial.

Pour les échantillons de Tizirt et Centre ville(Ech Compacté) se sursissent et leur forme se rétracte, ce qui s'explique par la présence de kaolinite qui ont une sensibilité moindre à l'eau et un faible potentiel de gonflement, la faible présence des particules argileuses engendre le changement de la texture et le durcissement du sol, on peut constater aussi que ces échantillons s'ont moins gonflés par rapport aux échantillons d'Azazga.

V.3.1.5 Les résultats obtenus :

Les résultats de la peser des masses pour les différents échantillons ; 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) pour les différents échantillons, sont présentés ci-dessous.

Tableau V.1 : Variation de la masse de l'argile d'Azazga avant et après l'essai. Gel/Dégel

ECH (g)	ECH 01	ECH 02	ECH Témoin
Etat Naturel	144.069	143.670	142.772
Après étuve	108.525	107.911	106.242
Fin de l'essai	138.379	146.565	146.066

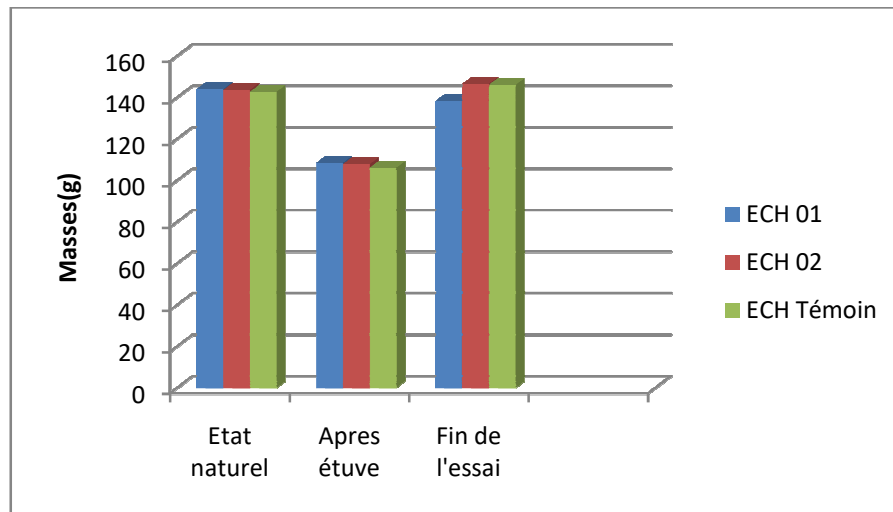


Figure V.7 : Variation de la masse d'argile d'Azazga au cours d'essai. Gel/Dégel

Tableau V.2 : Variation de la masse de l'argile de Tizgirt avant et après l'essai Gel/Dégel.

ECH (g)	ECH 01	ECH 02	ECH Témoin
Etat Naturel	157.947	161.242	171.326
Après étuve	142.526	146.052	156.236
Fin de l'essai	169.229	157.049	170.527

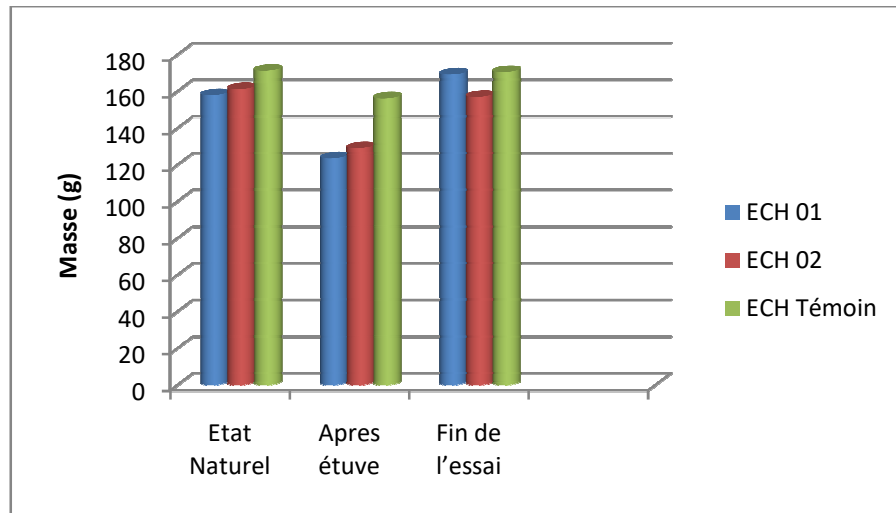


Figure V.8 : Variation de la masse d'argile de Tizirt au cours d'essai. Gel/Dégel

Tableau V.3 : Variation de la masse de l'argile de Cap Djinet avant et après l'essai. Gel/Dégel

ECH (g)	ECH 01	ECH 02	ECH Témoin
Etat Naturel	140.475	146.446	147.364
Après étuve	123.256	129.956	130.362
Fin de l'essai	139.776	138.678	150.559

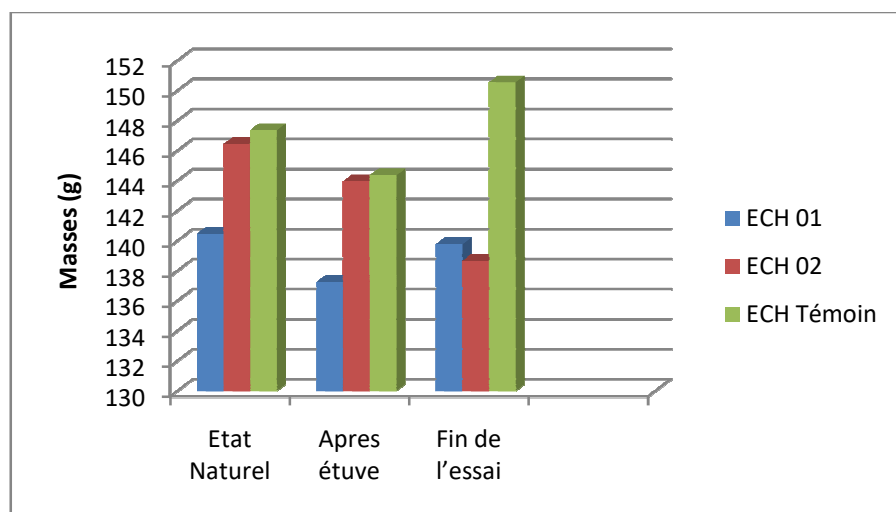


Figure V.9 : Variation de la masse d'argile de Cap Djinet au cours d'essai. Gel/Dégel

Tableau V.4 : Variation de la masse de l'argile de C.V.Compacté avant et après l'essai.

ECH (g)	ECH 01	ECH 02	ECH Témoin
Etat Naturel	151.957	153.551	156.749
Après étuve	124.526	126.586	129.589
Fin de l'essai	150.985	151.757	147.966

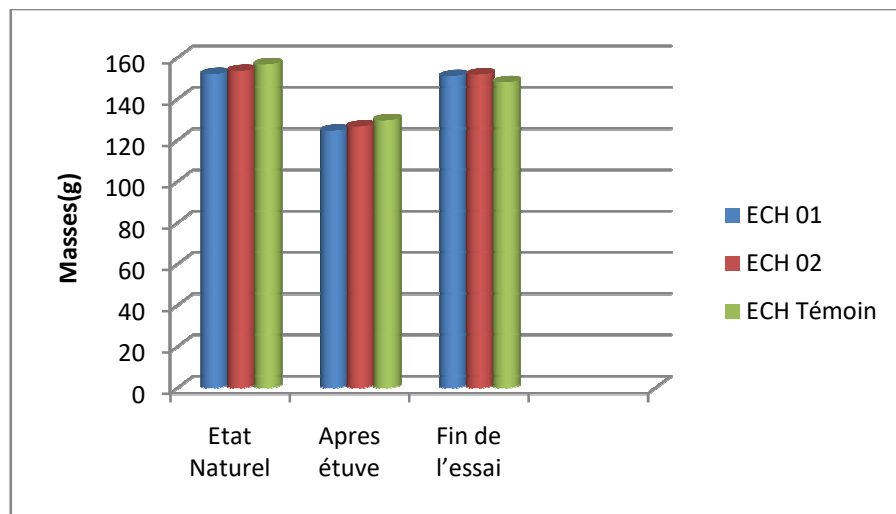


Figure V.10 : Variation de la masse d'argile de C.V.Compacté au cours d'essai. Gel/Dégel

• **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.

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 :

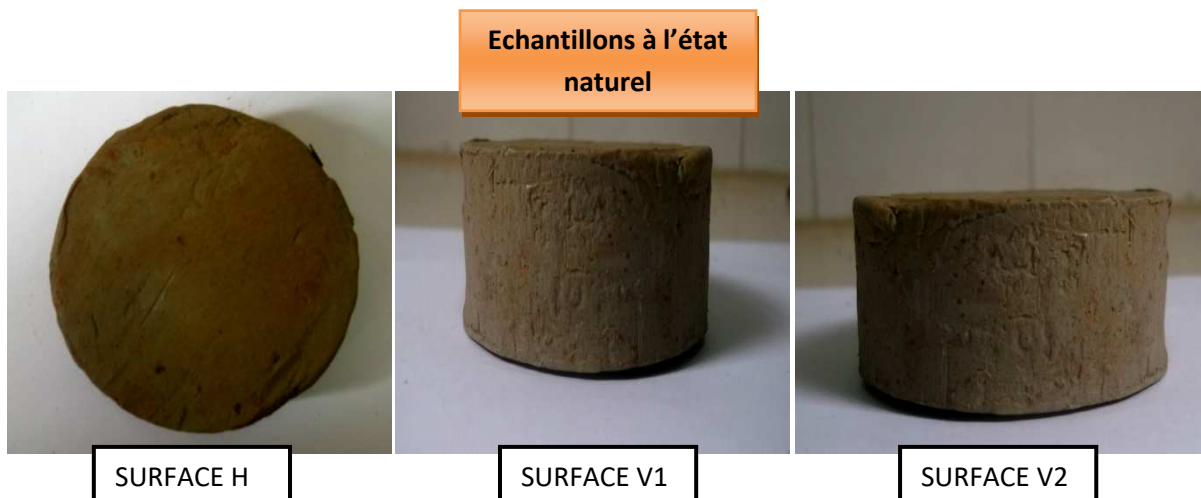
Les échantillons sont placés dans des bacs dans l'étuve et sont mis aux conditions normalisées (*suivant la norme P94-067*), après leurs préparations (voir le paragraphe V.2). Le 1er cycle débute par une mise en immersion et le 4e cycle se termine par un séchage, un cycle est réalisé comme suit :

- 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.

V.3.2.4 Les images retenues des échantillons :

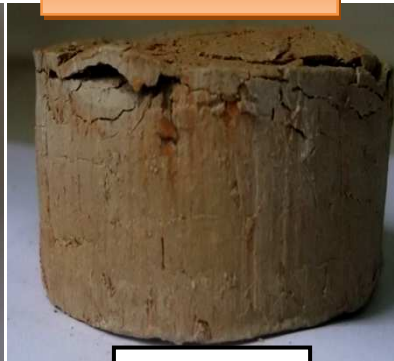
Les images des échantillons de l'argile de Azazga, Tigzirt, Cap Djinet, C.V.Compacté sont représenté sur les figures suivantes :



1^{er} Cycle



SURFACE H



SURFACE V1



SURFACE V2

2^{ème} Cycle



SURFACE H



SURFACE V1



SURFACE V2

3^{ème} Cycle



SURFACE H



SURFACE V1



SURFACE V2

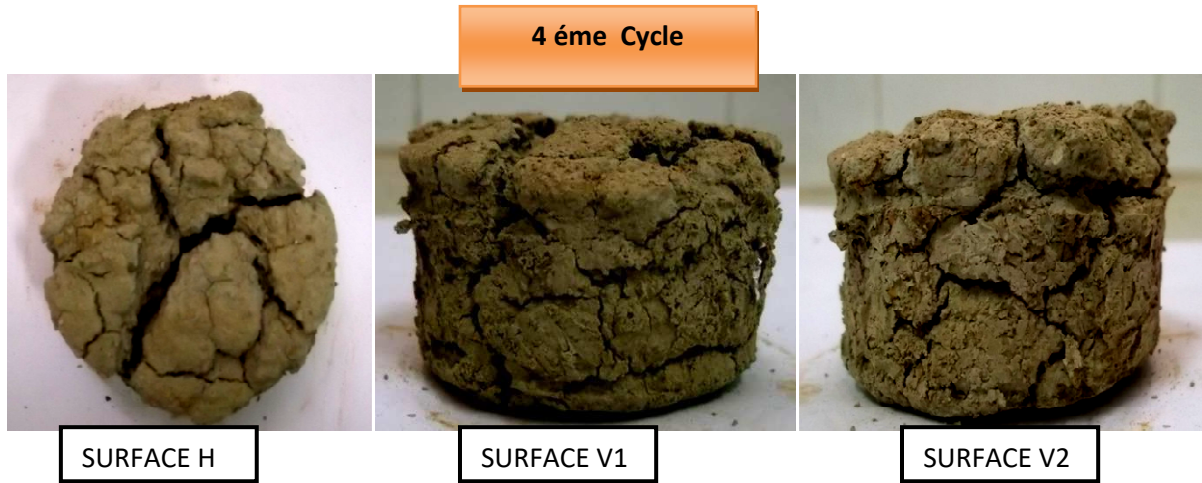
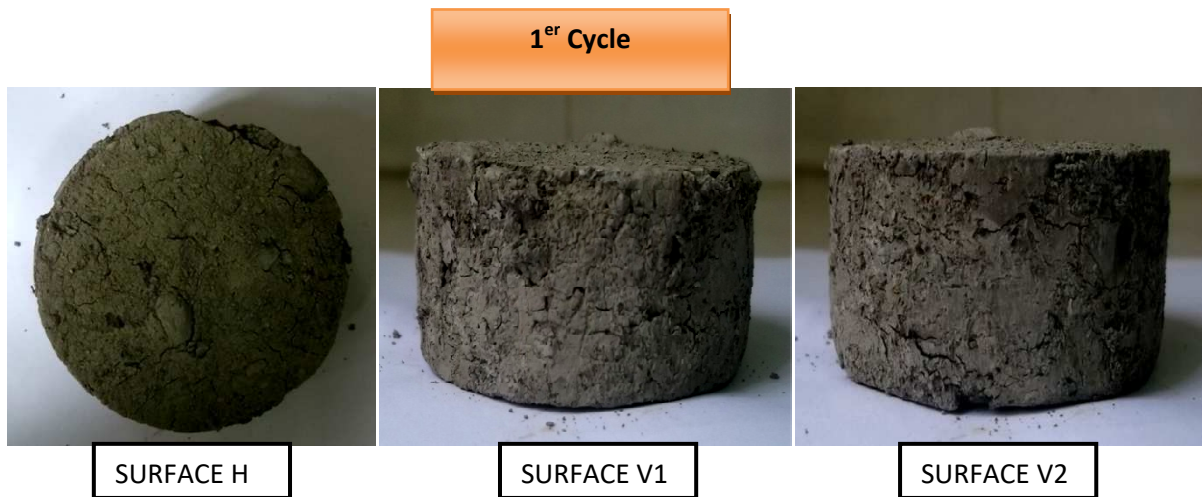
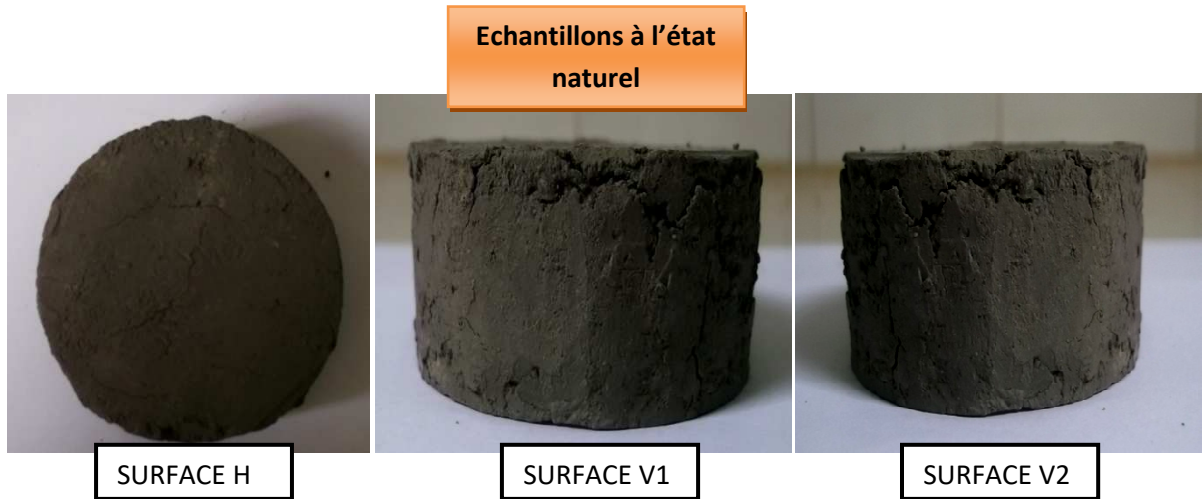


Figure V.11: Images de l'échantillon d'argile d'Azazga pendant l'essai de Dégradabilité, à l'état naturel et après chaque cycle.



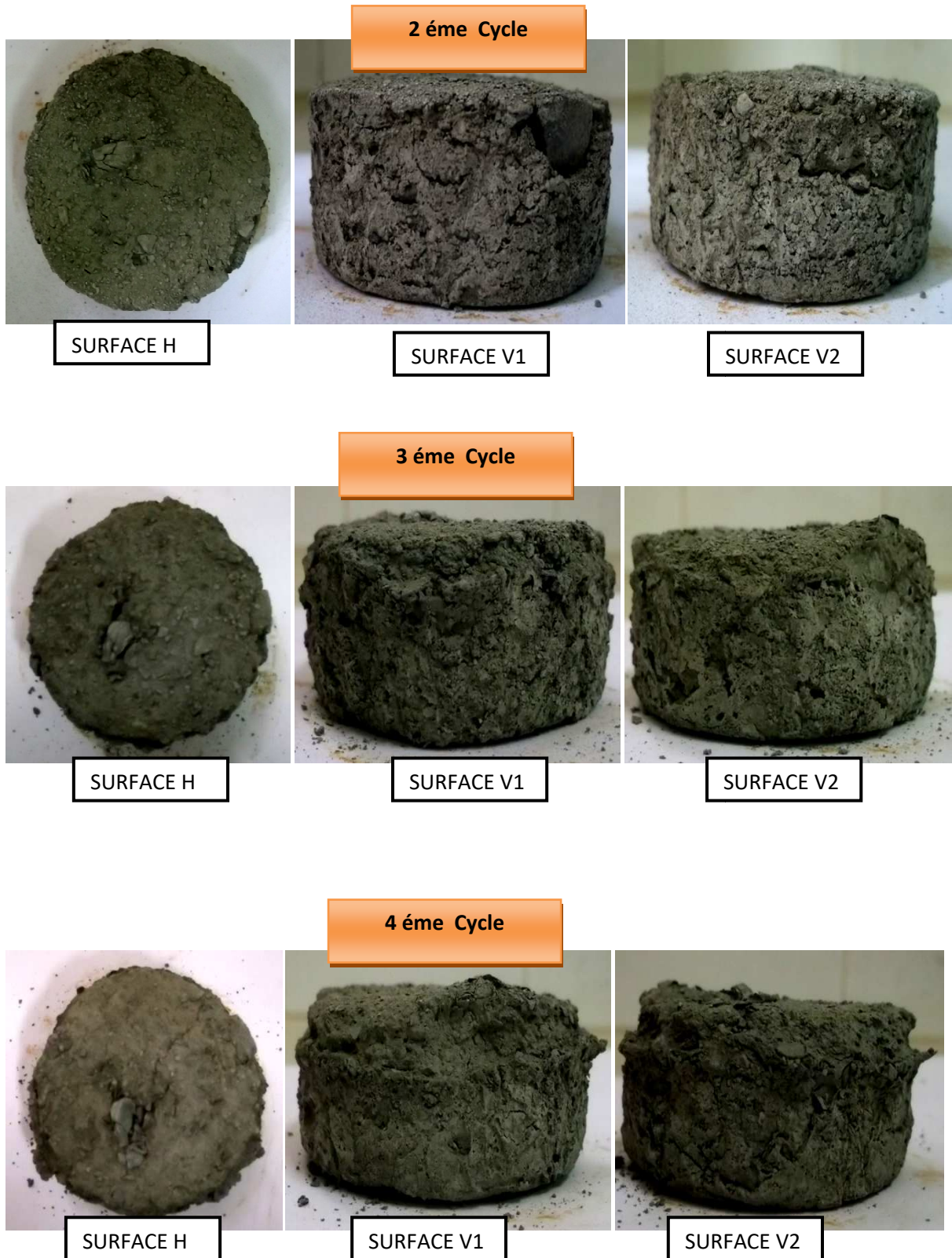


Figure V.12: Images de l'échantillon d'argile de Tigzirt pendant l'essai de Dégradabilité, à l'état naturel et après chaque cycle

Echantillons à l'état naturel



SURFACE H



SURFACE V1



SURFACE V2

1^{er} Cycle



SURFACE H



SURFACE V1



SURFACE V2

2^{ème} Cycle



SURFACE H



SURFACE V1



SURFACE V2

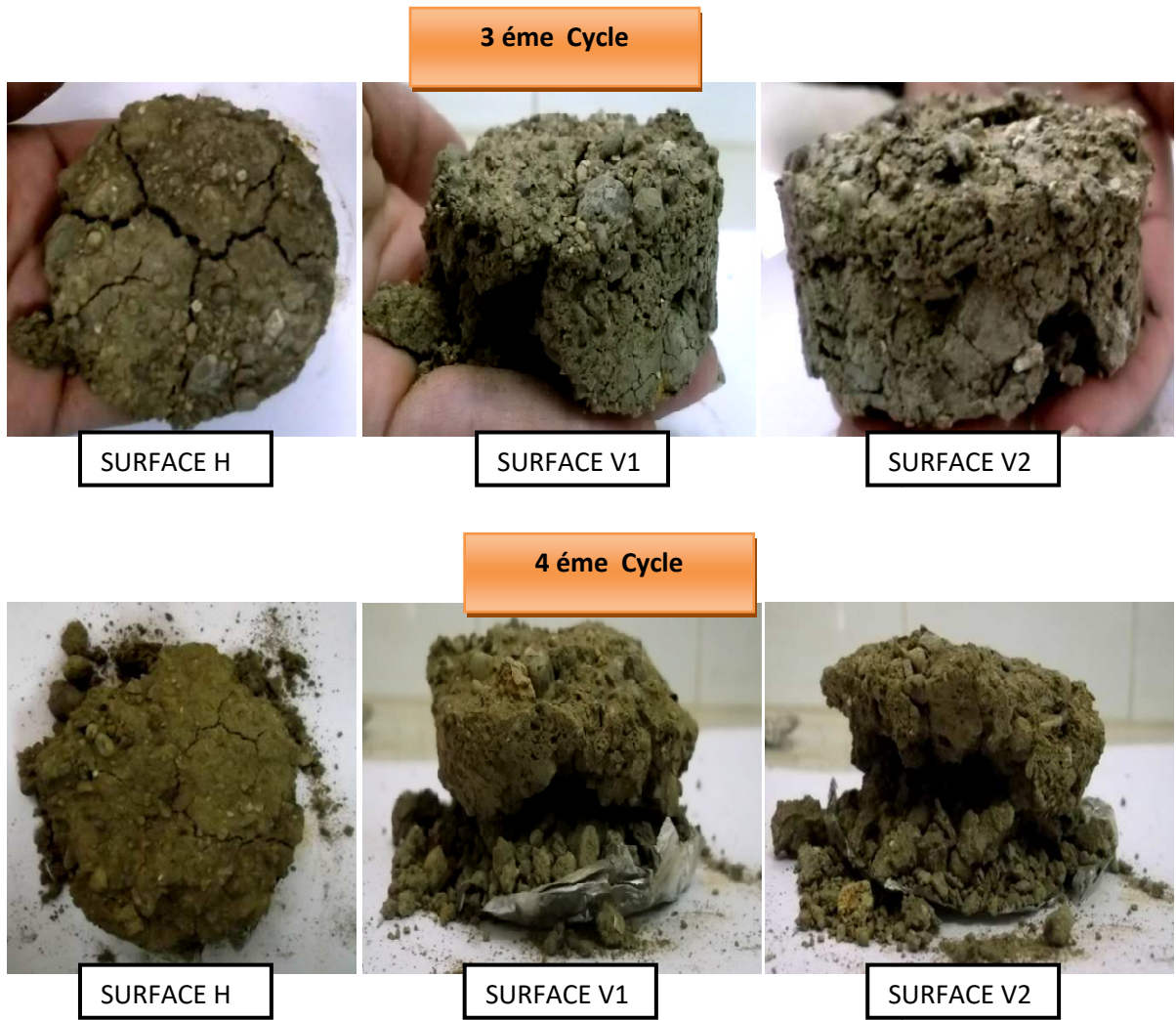
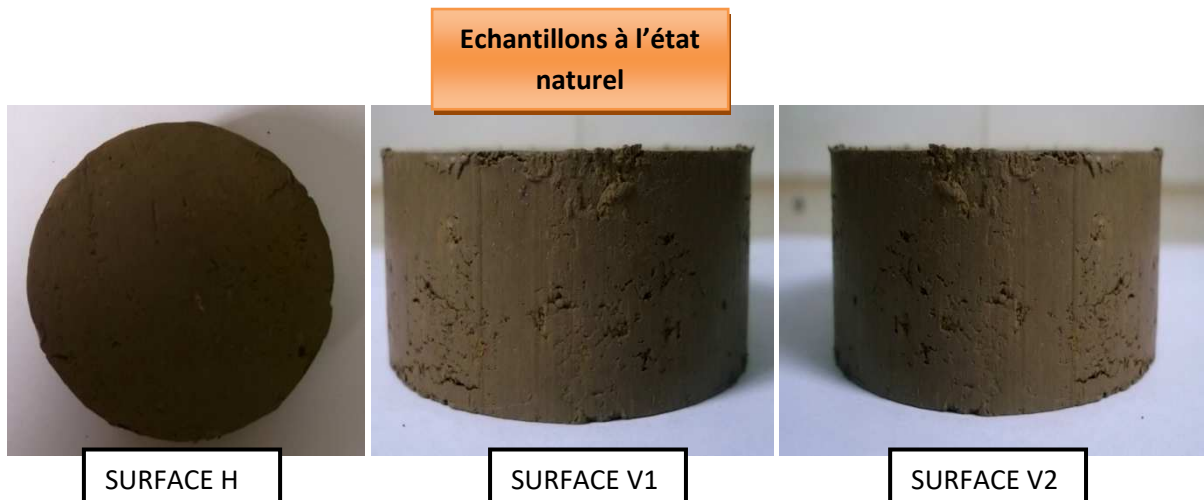


Figure V.13: Images de l'échantillon d'argile de Cap Djinet pendant l'essai de Dégradabilité, à l'état naturel et après chaque cycle.





SURFACE H



SURFACE H



SURFACE H

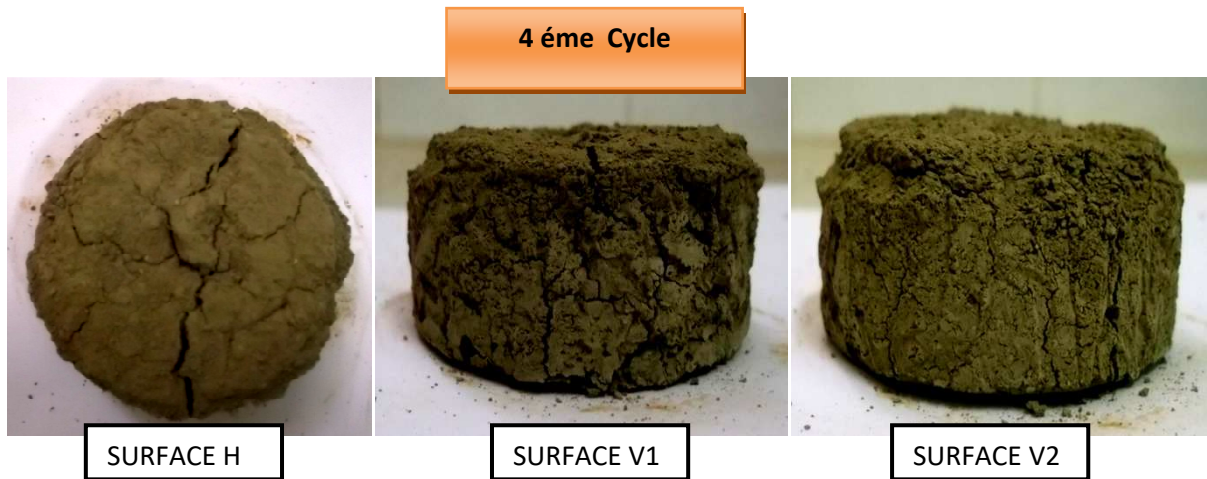


Figure V.14: Images de l'échantillon d'argile de Centre Ville (C.V.Compacté) pendant l'essai de Dégradabilité, à l'état naturel et après chaque cycle.

- **Interprétation des résultats :**

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.11, V.12, V.13, V.14. Les observations ont montré un gonflement volumique irréversible de l'échantillon de Cap Djinet durant le premier et le deuxième cycle (Figure V.13), 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, à la fin on remarque que l'échantillon s'éclate à partir de la phase est décapité totalement.

L'échantillon de Tigzirt et Azazga 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, d'humidification du 4ème cycle, on peut dire que ce phénomène a été engendré lorsque les minéraux se transforme 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 d'Azazga 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, par la présence importante des illites des Nontronites et des kaolinites.

Pour les échantillons de Tizirt et de C.V.Compacté leur potentiel de gonflement est peu considérable (par rapport à celui d'Azazga) et en raison de faible présence des particules argileuses et le type du sol qu'est un sol limoneux argileux, la présence des Kaolinites engendre la dureté de l'échantillon 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.5 : Variation de la masse d'argile des quatre sols au cours de l'essai.

Site	Etat Naturel	1 ^{er} Cycle	2 ^{eme} Cycle	3eme Cycle	4 ^{eme} Cycle
Azazga	142.173	106.929	105.931	105.332	104.732
Tizirt	172.324	156.749	156.748	156.350	155.751
Cap Djinet	144.469	117.911	117.612	113.418	111.721
C.V.Compacté	148.462	121.406	121.306	121.106	120.507

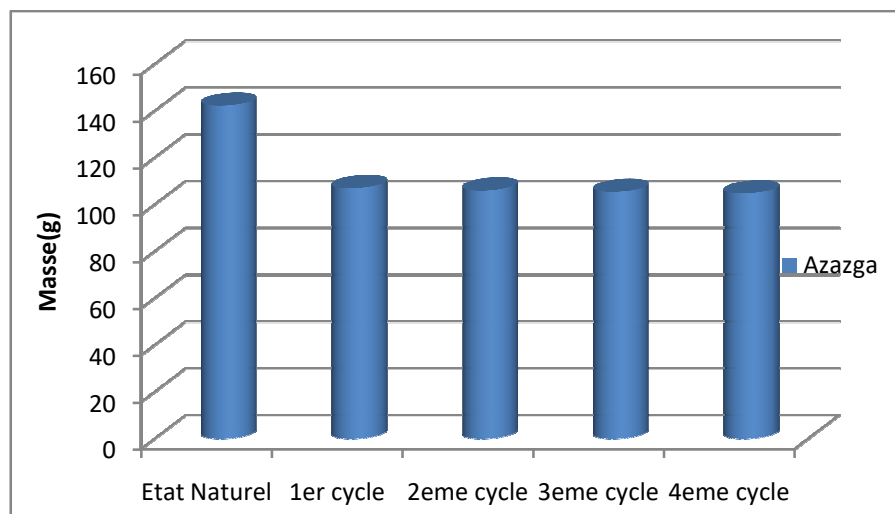


Figure V.15: Variation de la masse d'argile d'Azazga au cours de l'essai de Dégradabilité.

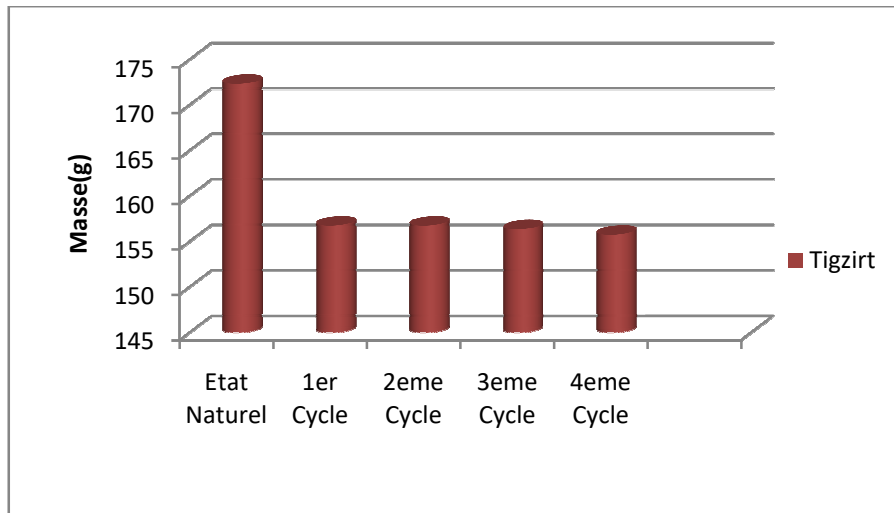


Figure V.16: Variation de la masse d'argile de Tizirt au cours de l'essai de Dégradabilité.

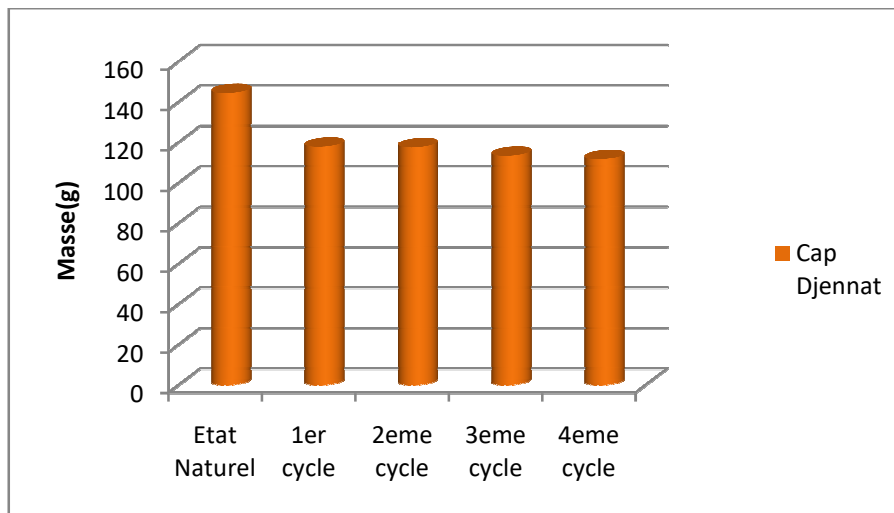


Figure V.17: Variation de la masse d'argile de Cap Djinet au cours de l'essai de Dégradabilité.

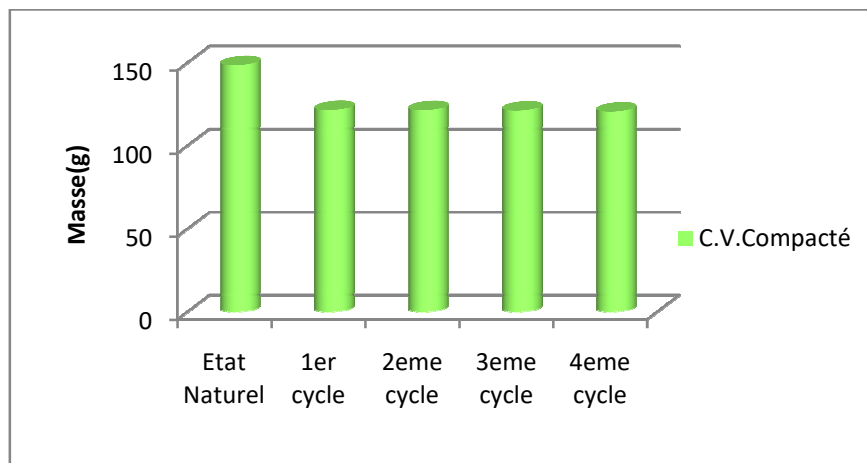


Figure V.18: Variation de la masse d'argile de C.V.Compacté au cours de l'essai de Dégradabilité.

- **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 Dégradabilité et retrait-gonflement, qui a un rôle très important pour ces pertes.

V.3.3 : Essai de Canicules :

V.3.3.1 Principe d'essai :

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

✓ Les Spécificités du cycle

<u>10 heures (Jour)</u>	<u>14 heures (Nuit)</u>
Température : 57 °C	Température : 20 °C
Humidité : 30 %	Humidité : 75%
Ventilation : 24	Ventilation : 24

V.3.3.2 Appareillage :

Les éléments constituant l'appareillage sont :

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

V.3.2.3 Le déroulement de l'essai :

- Imbiber les échantillons dans l'eau distillée à une température de 20°C pendant 3 jours (Pour garder la forme des échantillons on ajoute l'eau par intervalle de temps à l'aide d'une seringue.)
- les échantillons sont mis à l'étuve Jusqu'à masse constante.

Un cycle prend 24h et il est réalisé comme suit : On augmente la température de l'enceinte climatique de 0°C à 57°C pendant 10 heures, après on fait diminuer la température de 57°C à 20°C pendant 14 heures, on le répète pendant 10 jours.

V.3.3.4 Les images retenues des échantillons : Les images des échantillons de l'argile de N°01 Azazga, N°01 Tizirt, Cap Djinet, N°01 C.V.Compacté sont représenté sur les figures suivante :

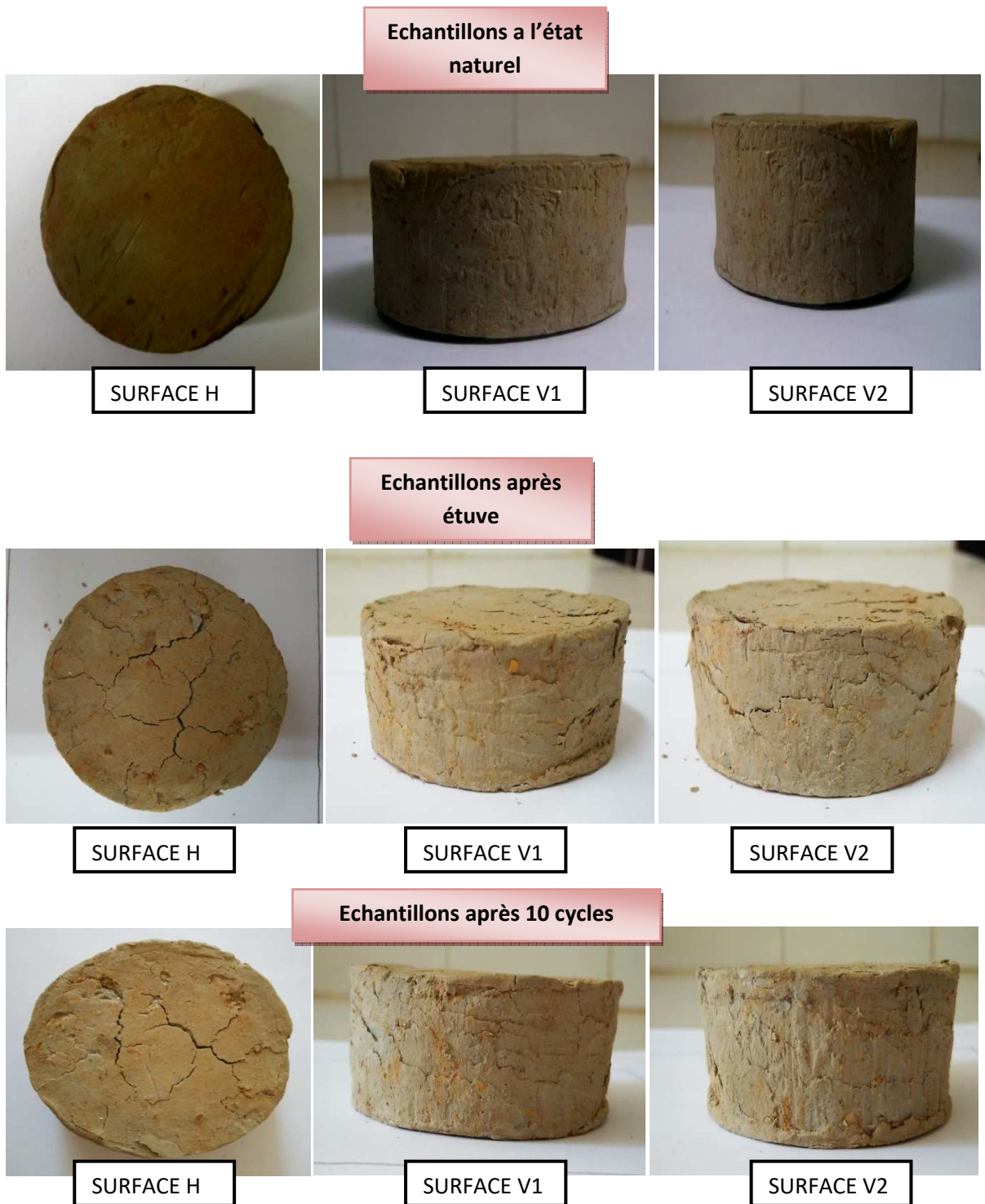


Figure V.19: Images de l'échantillon d'argile N°01 d'Azazga pendant l'essai de canicules

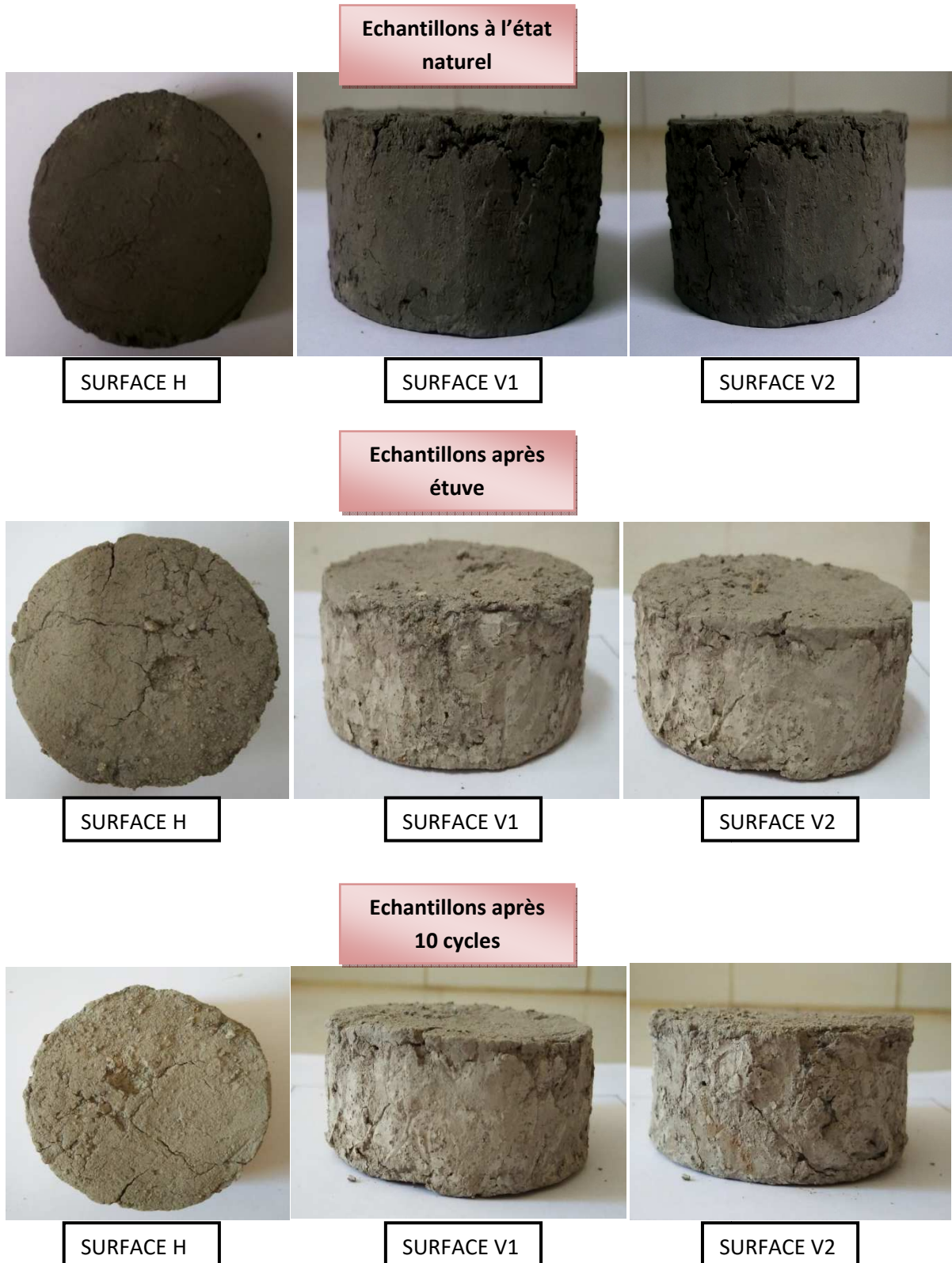


Figure V.20: Images de l'échantillon d'argile N°01 de Tigzirt pendant l'essai de canicules.

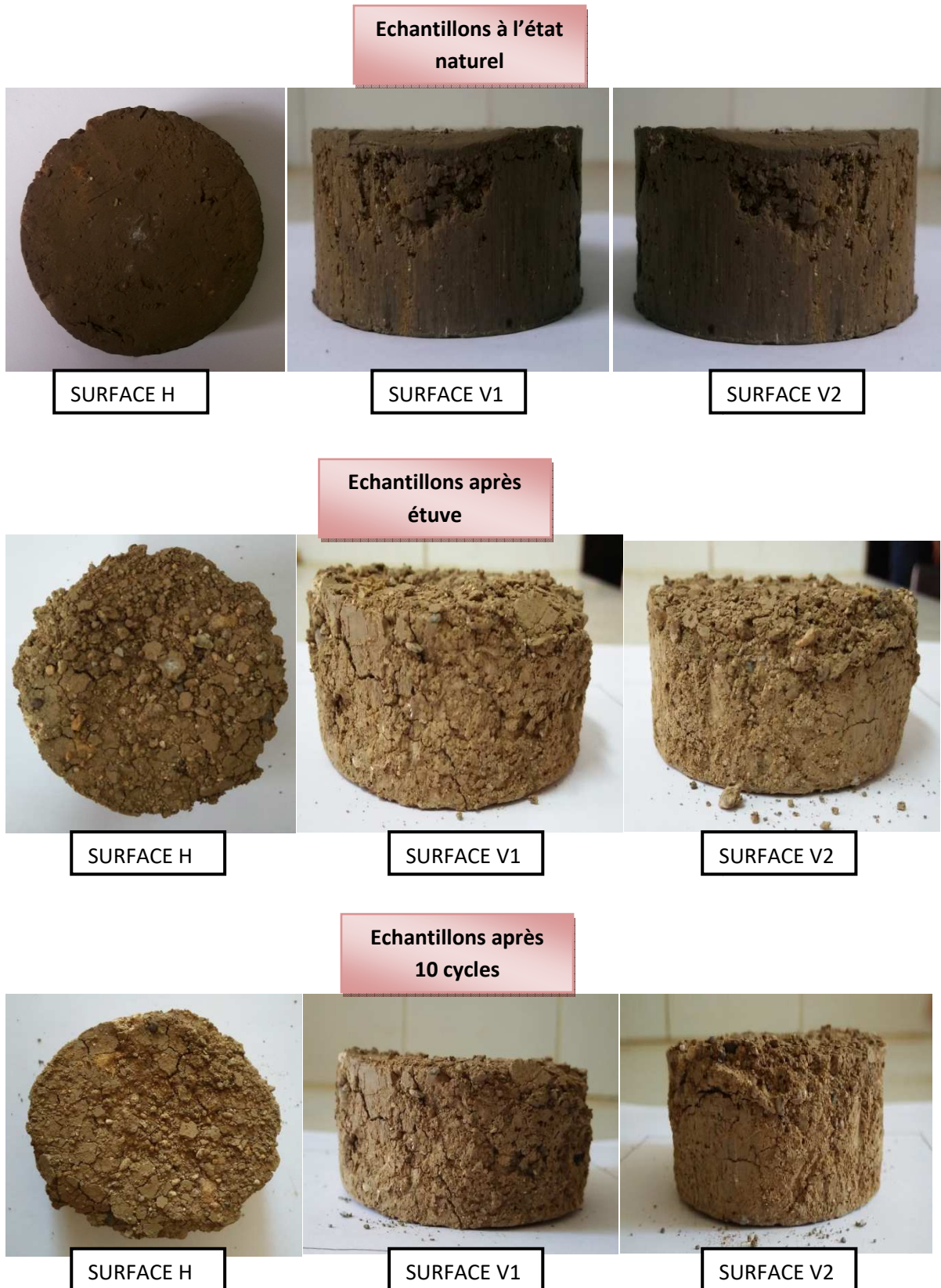


Figure V.21: Images de l'échantillon d'argile de Cap Djinet pendant l'essai de Canicules.

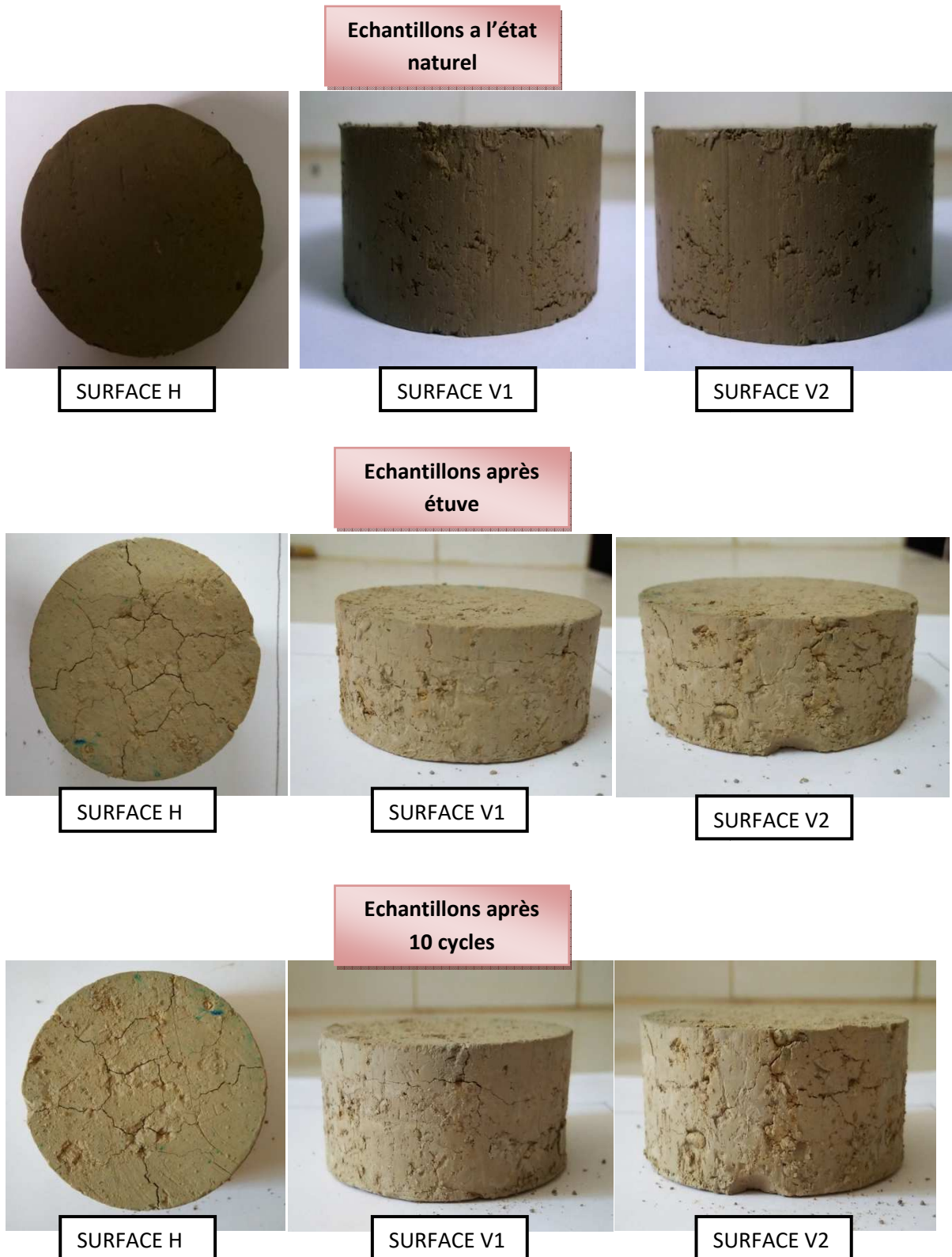


Figure V.22: Images de l'échantillon d'argile N°01 de C.V.Compacté pendant l'essai de canicules.

V.3.3.5 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.6 : Variation de la masse de l'argile d'Azazga pendant l'essai de canicules

ECH (g)	ECH 01	ECH 02
Etat Naturel	141.673	143.071
Après étuve	110.623	111.522
Fin de l'essai	112.520	113.818

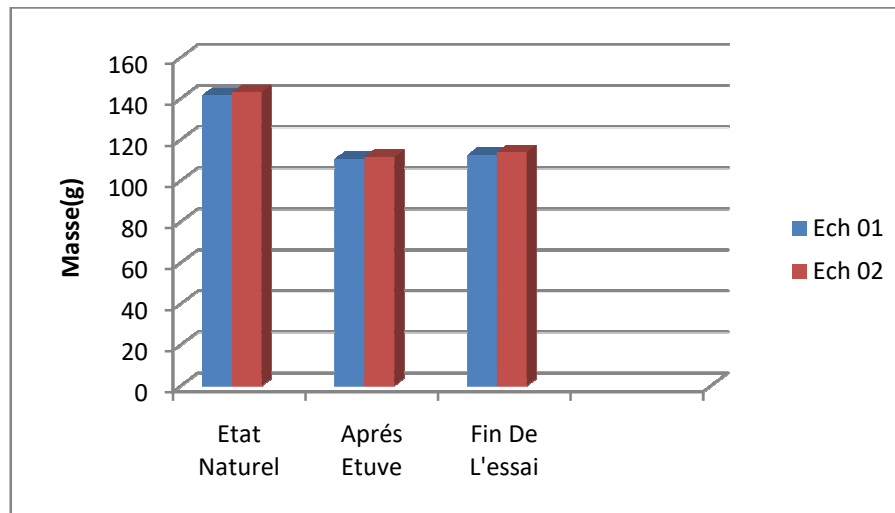


Figure V.23 : Variation de la masse de l'argile d'Azazga pendant l'essai de canicules

Tableau V.7 : Variation de la masse de l'argile de Cap Djinet pendant l'essai de canicules.

ECH	Masse(g)
Etat Naturel	147.564
Après étuve	121.905
Fin de l'essai	123.003

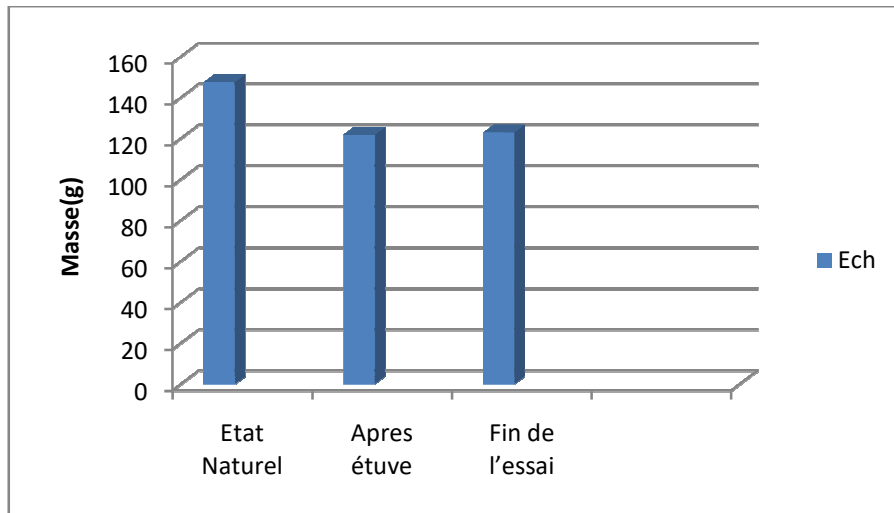


Figure V.24 : Variation de la masse de l'argile de Cap Djinet pendant l'essai de canicules

Tableau V.8 : Variation de la masse de l'argile de Tizirt pendant l'essai de canicules

ECH (g)	ECH 01	ECH 02
Etat Naturel	160.543	172.524
Apres étuve	145.367	157.847
Fin de l'essai	147.065	158.145

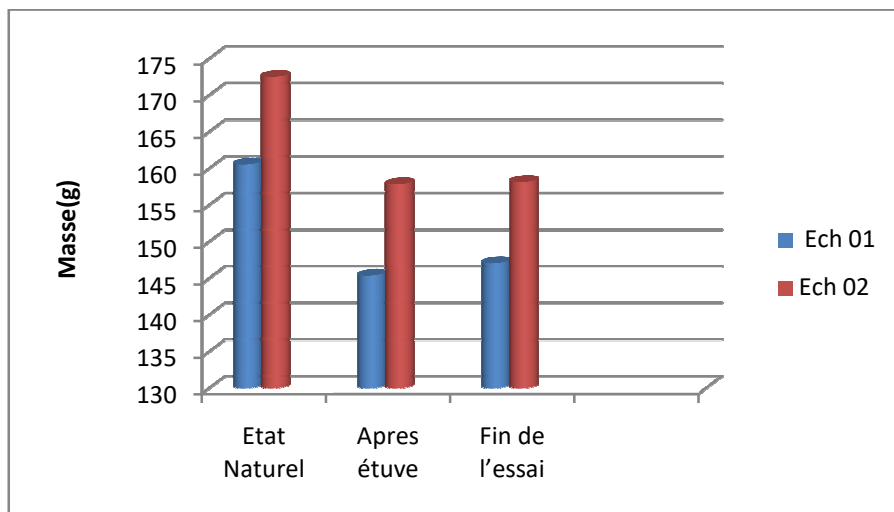


Figure V.25 : Variation de la masse de l'argile de Centre ville pendant l'essai de canicules

Tableau V.9 : Variation de la masse de l'argile de Centre ville pendant l'essai de canicules

ECH (g)	ECH 01	ECH 02
Etat Naturel	147.543	145.667
Après étuve	128.395	116.014
Fin de l'essai	130.092	117.612

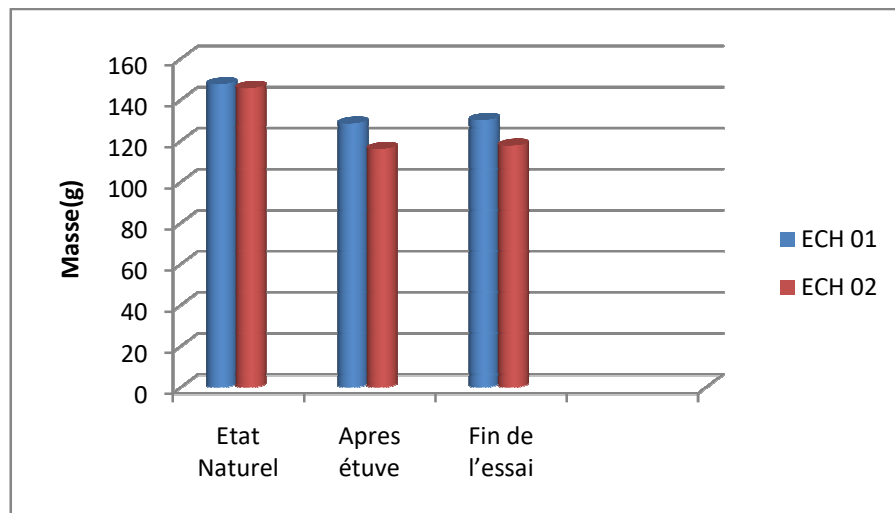


Figure V.26 : Variation de la masse de l'argile de C.V.Compacté pendant l'essai. De canicules

• **Interprétation des résultats :**

Les essais de canicules ont montré une variation de masse des échantillons, une diminution après le passage à l'étuve mais une petite augmentation à la fin des 10 Cycle, l'augmentation des masses est due au pourcentage élevé de l'humidité à qui les échantillons sont soumis durant l'essai.

Ce qui concerne la forme et les fissures des échantillons, on a pu remarquer que les fissures n'ont pas eu un développement important entre la période de séchage et la fin des cycles climatiques, on a pu observer des petites fissures qui apparaissent et des légers changements de forme sur le plant vertical et horizontal (Figures V.20 à V.23).

V.4 Conclusion :

Ce chapitre a représenté les sollicitations saisonnières cycliques appliquées au laboratoire sur les échantillons étudiés ; les effets de retrait-gonflement, les fissures et même le changement de la texture et de la structure des échantillons, qui ont progressé pendant le déroulement des essais. La présence des minéraux a joué un rôle très important dans le changement de comportement des échantillons. Dans le chapitre suivant, on va confirmer les résultats obtenus dans ce chapitre par l'étude de la variation de leurs dimensions fractales à l'aide d'un programme implémenté avec le logiciel MATLAB.

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.

Dans ce travail on va opter pour l'utilisation de la méthode de « **Box Counting** »

VI.2 Application de la méthode de Box Counting :

Avec cette méthode, la dimension fractale calculée est appelée Dimension Fractale de Rugosité (DFR), 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 DFR, 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 I. Un exemple du calcul est représenté ci-dessous (Figure IV.1), un échantillon d'argile de forme cylindrique, de $\varnothing = 63.4$ mm.

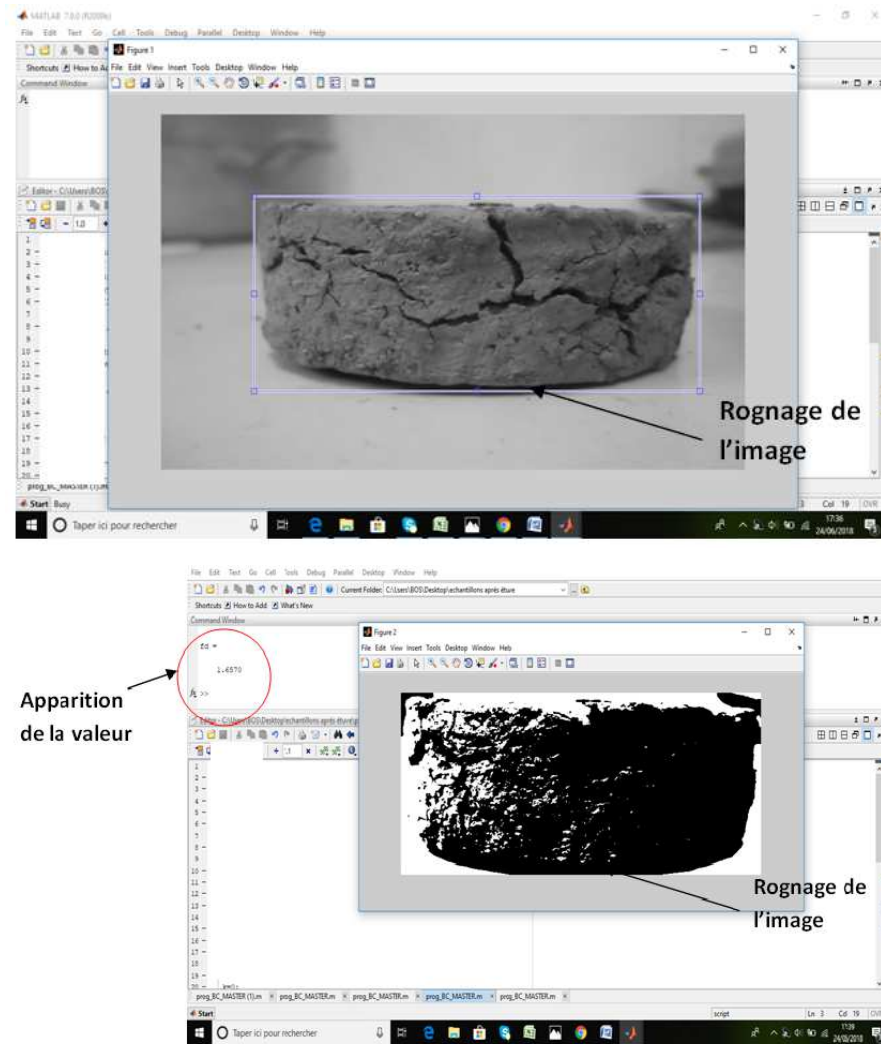


Figure VI.1 : Exemple du calcul de la DFR par le logiciel MATLAB R2009b.

VI.3 Résultats obtenus:

❖ Résultats de l'essai de Gel/ Dégel:

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

Tableau VI.1 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile d'Azazga. N°01.

<i>Echantillon N°01 d'Azazga.</i>			
Etapes	Surface H	Surface v 1	Surface v 2
Etat Naturel(1)	1.9562	1.8956	1.8909
Après étuve(2)	1.8181	1.8771	1.8339
48h après 10 cycles(3)	1.6023	1.8007	1.8037

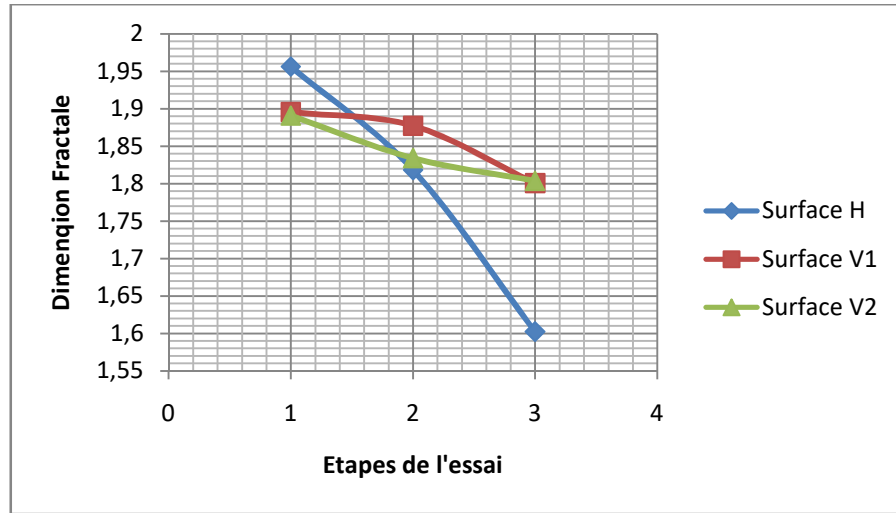


Figure VI.2: Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon N°01 d'Azazga.

Tableau VI.2 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile Azazga. N°02.

<i>Echantillon N°02 d'Azazga</i>			
Etapas	Surface H	Surface v 1	Surface v 2
Etat Naturel(1)	1,9462	1.8856	1.8423
Après étuve(2)	1,8655	1.8536	1.8409
48h après 10 cycles(3)	1,8321	1.7368	1.8378

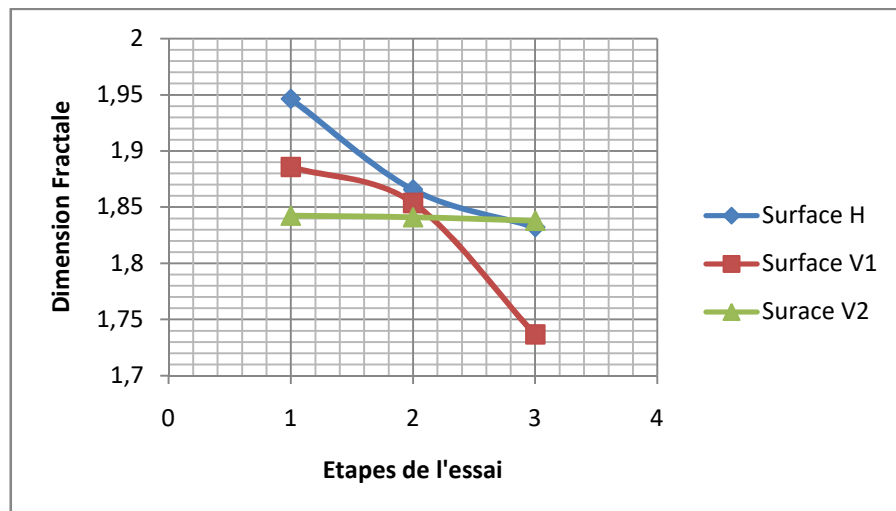


Figure VI.3: Variation de la dimension fractale en fonction des Etapas de l'essai pour l'échantillon N°02 d'Azazga.

Chapitre VI : Calcul de la Dimension Fractale par la méthode de Box Counting

Tableau VI.3 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile témoin Azazga.N.

<i>Echantillon Témoin d'Azazga</i>			
Etapes	Surface H	Surface v 1	Surface v 2
Etat Naturel(1)	1,9452	1,8946	1,8809
48h après 10cycles(3)	1,8680	1,7932	1,8178

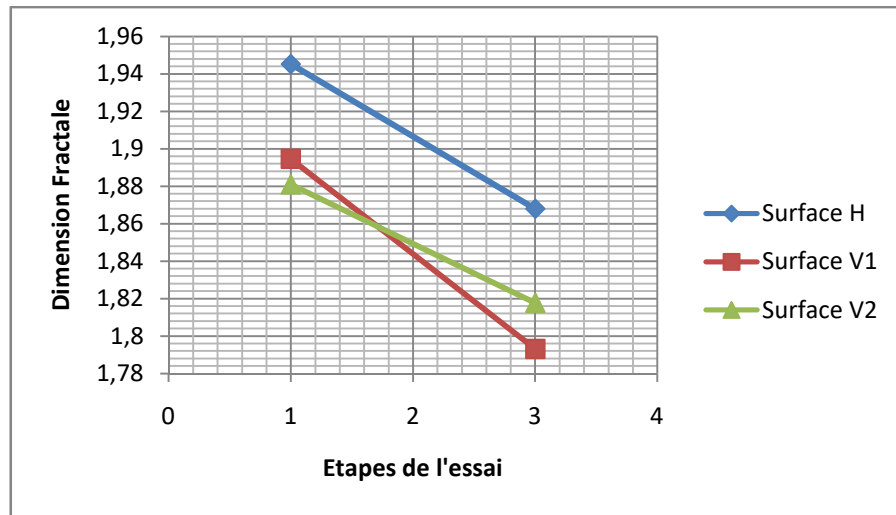


Figure VI.4 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile Témoin Azazga.N.

Tableau VI.4 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile de Tizirt. N°01.

<i>Echantillon N°01 de Tizirt</i>			
Etapes	Surface H	Surface v 1	Surface v 2
Etat Naturel(1)	1,9337	1,7994	1,725
Après étuve(2)	1,7425	1,7358	1,6034
48h après 10cycles(3)	1,7413	1,6043	1,5973

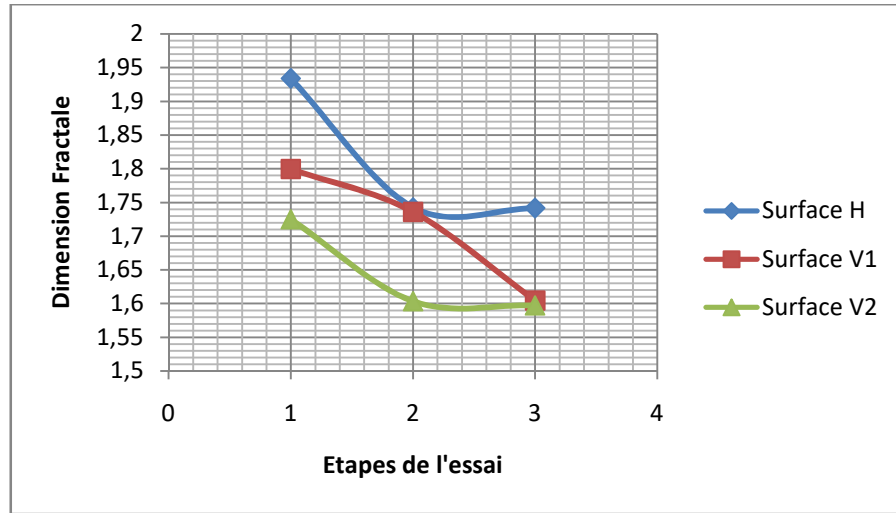


Figure VI.5: Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon N°01 Tizirt.

Tableau VI.5 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile de Tizirt. N°02.

<i>Echantillon N°02 de Tizirt</i>			
Etapas	Surface H	Surface v 1	Surface v 2
Etat Naturel(1)	1,9337	1,7984	1,7296
Après étuve(2)	1,7424	1,7398	1,7102
48h après 10cycles(3)	1,7401	1,6152	1,6023

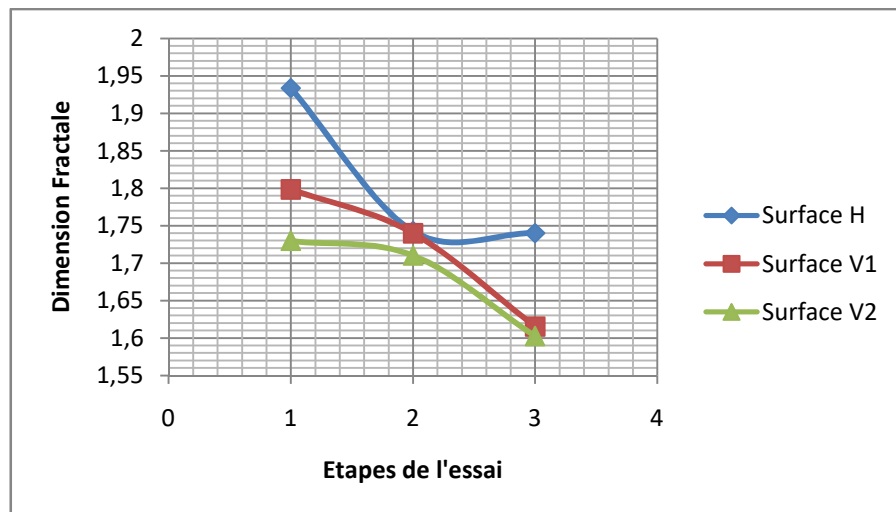


Figure VI.6: Variation de la dimension fractale en fonction des Etapas de l'essai pour l'échantillon N°02 Tizirt

Tableau VI.6 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile témoin TizirtN

<i>Echantillon Témoin Tizirt.N</i>			
Etapes	Surface H	Surface v 1	Surface v 2
Etat Naturel(1)	1,9337	1,7425	1,7413
48h après 10cycles(3)	1,7556	1,7368	1,7350

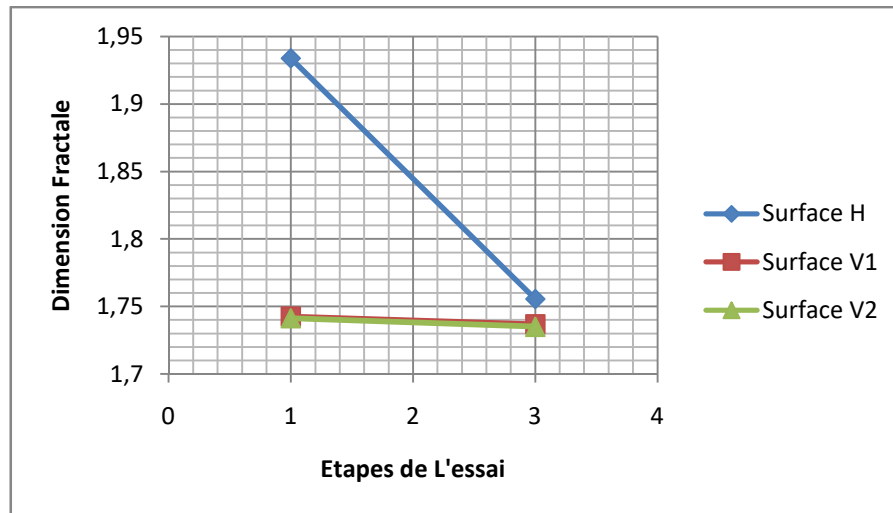


Figure VI.7 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile Témoin Tizirt.N.

Tableau VI.7 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile de Cap Djinet. N°01

<i>Echantillon N°01 de Cap Djinet</i>			
Etapes	Surface H	Surface v 1	Surface v 2
Etat Naturel(1)	1.9378	1.7356	1.7075
Après étuve(2)	1.9302	1.7166	1.6858
48h après 10cycles(3)	1.6836	1.5668	1.6836

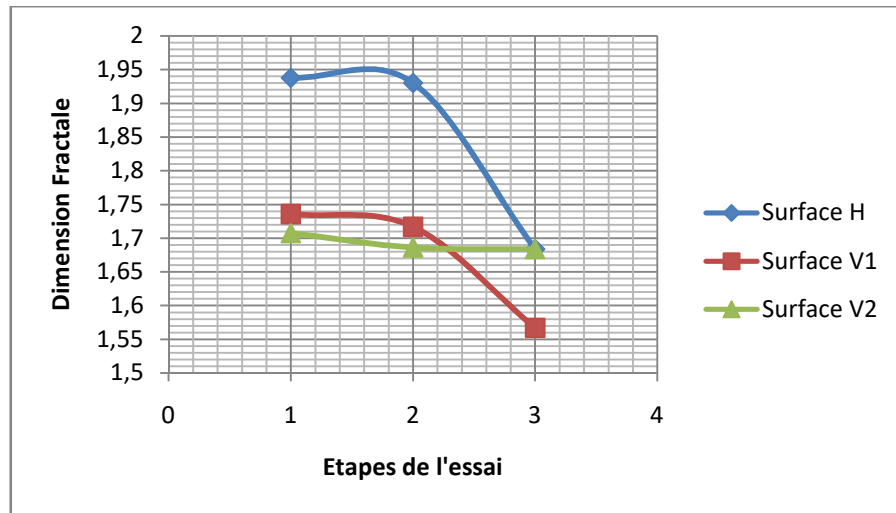


Figure VI.8: Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon N°01 Cap Djinet.

Tableau VI.8: Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile de Cap Djinet. N°02

<i>Echantillon N°02 de Cap Djinet</i>			
Etapas	Surface H	Surface v 1	Surface v 2
Etat Naturel(1)	1,9337	1,7984	1,7102
Après étuve(2)	1,7424	1,7398	1,7196
48h âpres 10cycles(3)	1,7401	1,652	1,6023

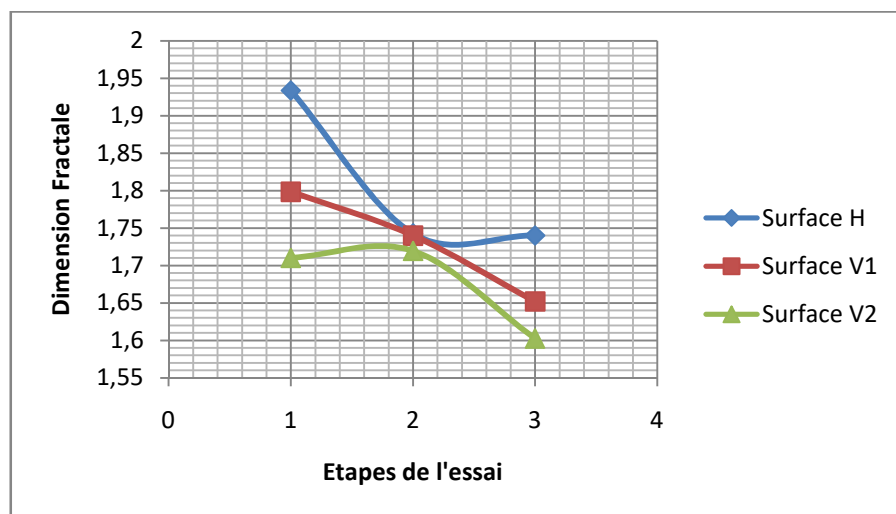


Figure VI.9: Variation de la dimension fractale en fonction des Etapas de l'essai pour l'échantillon N°02 Cap Djinet.

Tableau VI.9 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile témoin Cap Djinet.N

<i>Echantillon Témoin Cap Djinet.N</i>			
Etapes	Surface H	Surface v 1	Surface v 2
Etat Naturel(1)	1.9327	1.7875	1.7256
48h après 10cycles(3)	1.6481	1.5148	1.6468

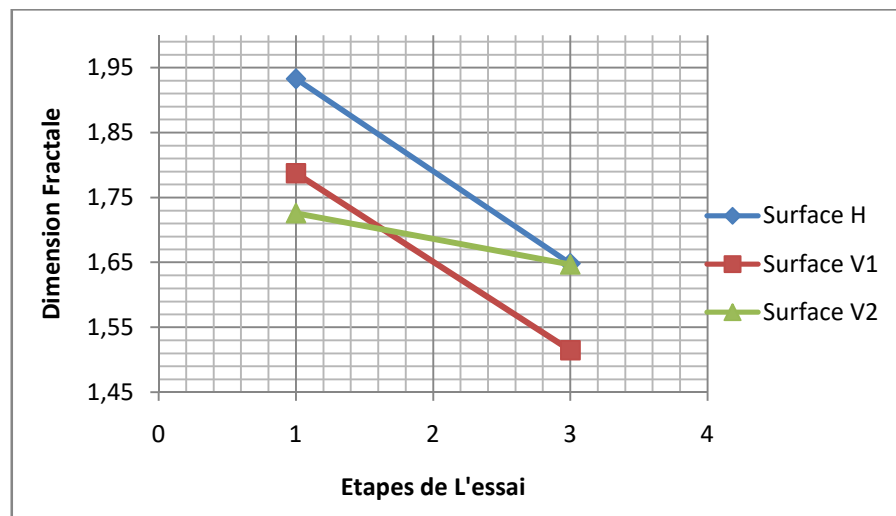


Figure VI.10 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile Témoin Cap Djinet.N

Tableau VI.10 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile de Centre Ville(C.V.Compacté). N°01

<i>Echantillon N°01 de C.V.Compacté</i>			
Etapes	Surface H	Surface v 1	Surface v 2
Etat Naturel(1)	1,9152	1.8937	1.8336
Après étuve(2)	1,8523	1.8543	1.8273
48h après 10cycles(3)	1,8069	1.7350	1.8050

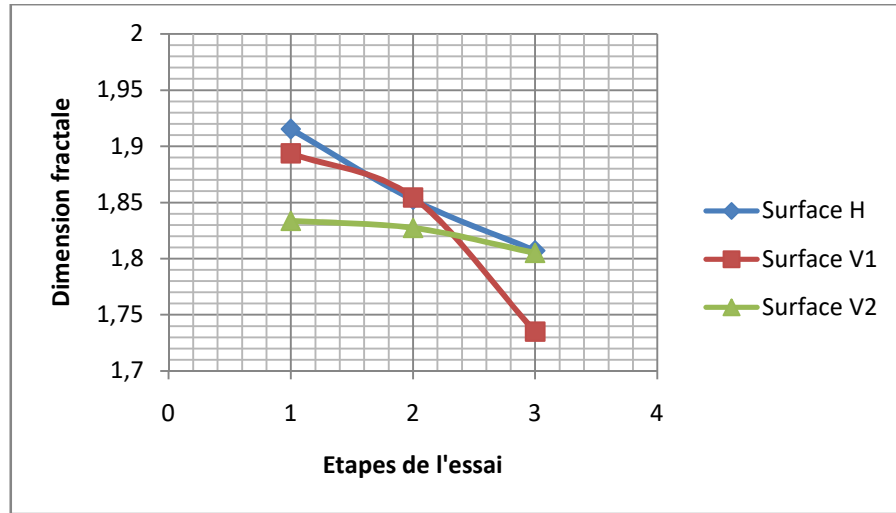


Figure VI.11: Variation de la dimension fractale en fonction des Etapes de l'essai pour l'échantillon N°01 C.V.Compacté.

Tableau VI.11 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile de Centre Ville(C.V.Compacté)N°02.

<i>Echantillon N°02 de C.V.Compacté</i>			
Etapas	Surface H	Surface v 1	Surface v 2
Etat Naturel(1)	1,9151	1,826	1,8048
Après étuve(2)	1,8891	1,8569	1,7776
48h après 10cycles(3)	1,8336	1,8241	1,7637

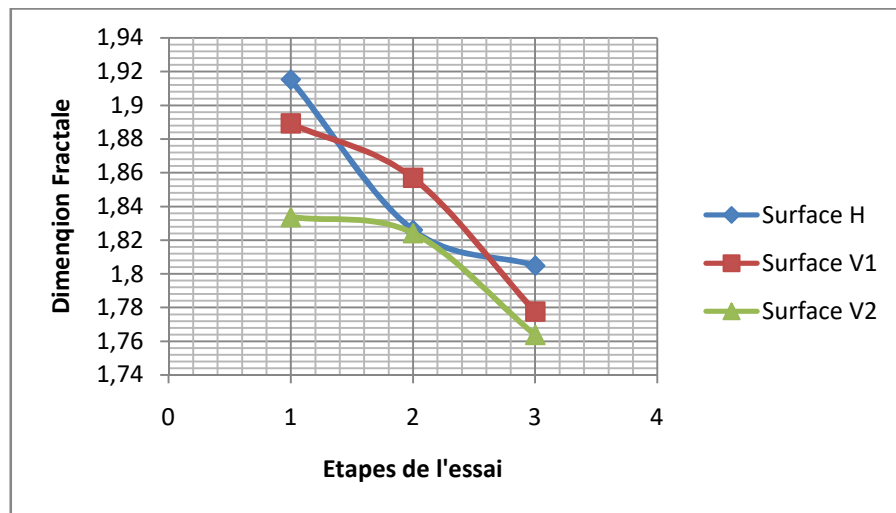


Figure VI.12: Variation de la dimension fractale en fonction des Etapes de l'essai pour l'échantillon N°02 C.V.Compacté.

Tableau VI.12 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile témoin C.V.N.Compacté.

<i>Echantillon Témoin Centre ville</i>			
Etapes	Surface H	Surface v 1	Surface v 2
Etat Naturel(1)	1,9152	1.8937	1.8336
48h après 10cycles(3)	1,7754	1.7850	1.7423

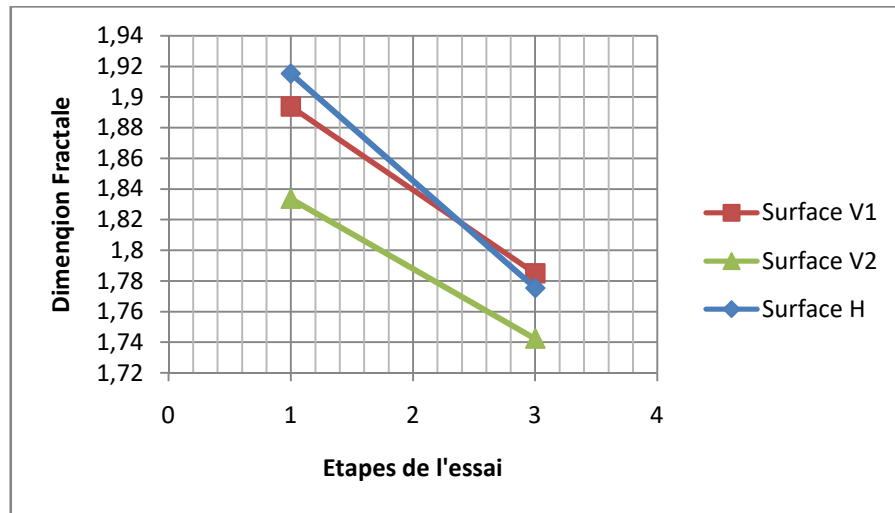


Figure VI.13 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile Témoin C.V.N.Compacté.

❖ **Résultats de l'essai de Dégradabilité :**

Tableau VI.13 : Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile d'Azazga

<i>Echantillon d'Azazga</i>			
	surface H	Surface V1	Surface V2
Etat naturel (1)	1,9433	1,9084	1,8873
1er cycle (2)	1,9246	1,8921	1,8851
2eme cycle (3)	1,9105	1,8261	1,7888
3eme cycle (4)	1,8834	1,684	1,7565
4eme cycle (5)	1,7557	1,5927	1,7423

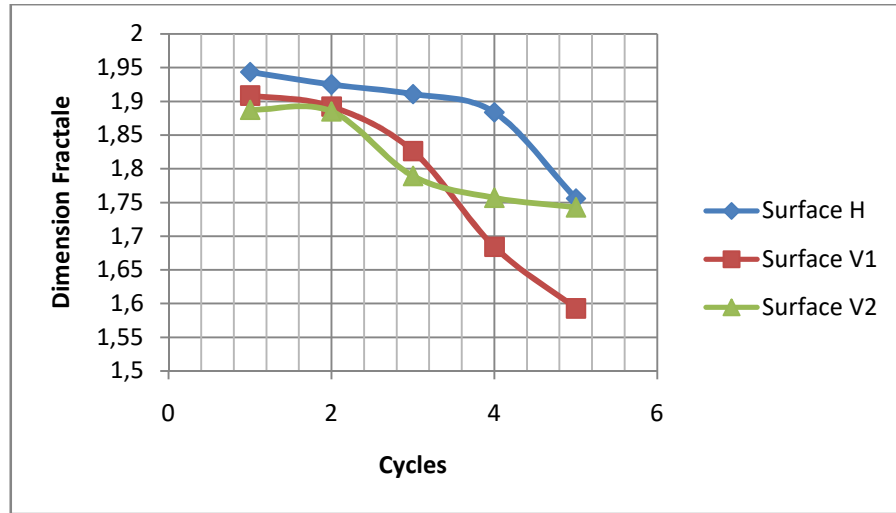


Figure VI.14 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon d'Azazga en fonction des cycles de Dégradabilité.

Tableau VI.14 : Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile de Tizirt.

<i>Echantillon de Tizirt</i>			
	surface H	Surface V1	Surface V2
Etat naturel (1)	1,9219	1,8407	1,8609
1er cycle (2)	1,8736	1,7578	1,8269
2eme cycle (3)	1,8426	1,722	1,7953
3eme cycle (4)	1,8232	1,7078	1,719
4eme cycle (5)	1,7529	1,6908	1,6985

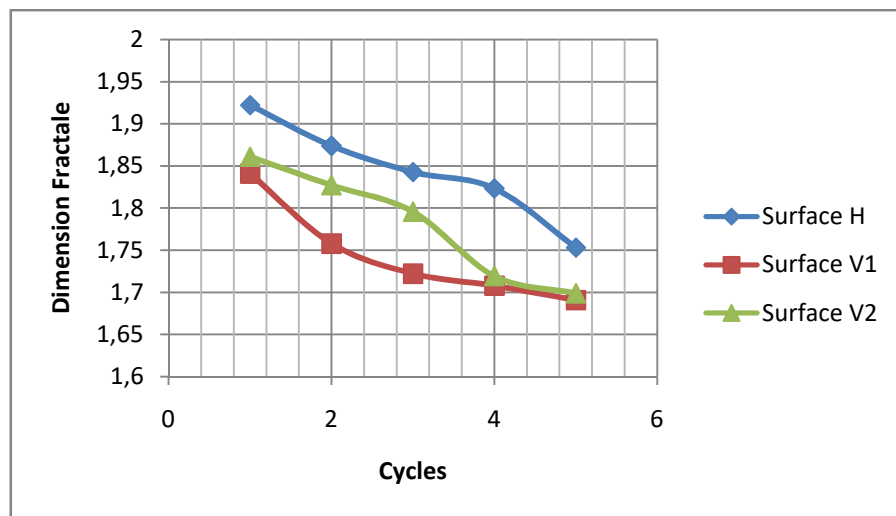


Figure VI.15 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de Tizirt en fonction des cycles de Dégradabilité

Tableau VI.15 : Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile de Cap Djinet.

<i>Echantillon de Cap Djinet</i>			
	surface H	Surface V1	Surface V2
Etat naturel (1)	1,8897	1,8451	1,8139
1er cycle (2)	1,8664	1,7694	1,7951
2eme cycle (3)	1,8659	1,7466	1,7755
3eme cycle (4)	1,8494	1,6509	1,773
4eme cycle (5)	1,7893	1,5927	1,4208

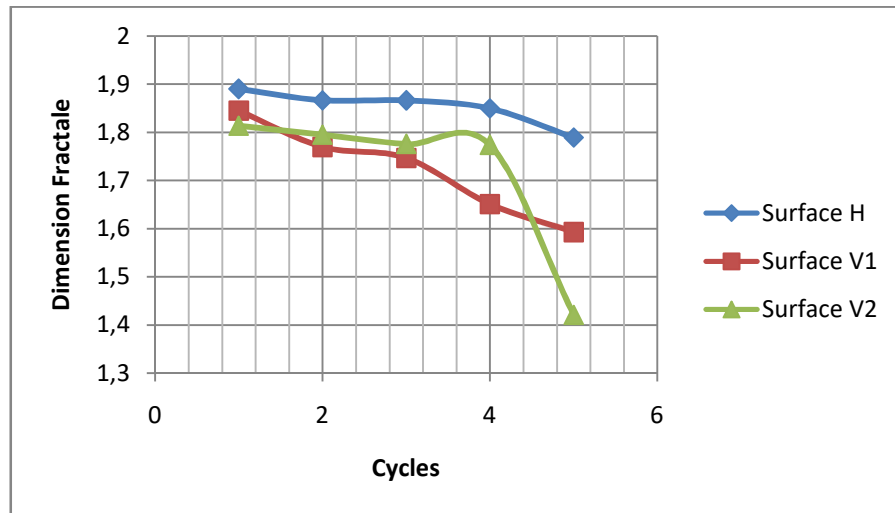


Figure VI.16 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de Cap Djinet en fonction des cycles de Dégradabilité

Tableau VI.16 : Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile de C.V.Compacté

<i>Echantillon de Centre Ville</i>			
	surface H	Surface V1	Surface V2
Etat naturel (1)	1,9797	1,8615	1,8753
1^{er} cycle (2)	1,954	1,8394	1,846
2^{eme} cycle (3)	1,9358	1,8214	1,8336
3^{eme} cycle (4)	1,9223	1,7929	1,8334
4^{eme} cycle (5)	1,8287	1,651	1,8114

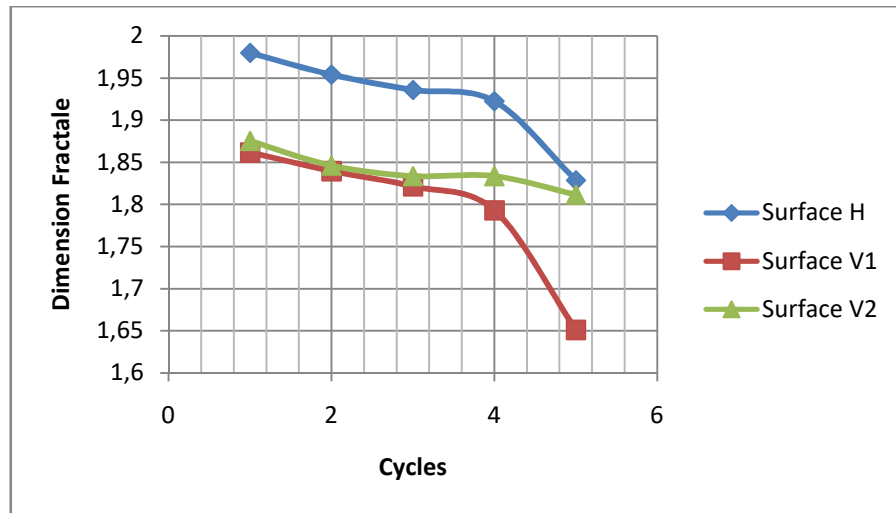


Figure VI.17 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de C.V.Compacté en fonction des cycles de Dégradabilité.

❖ **Résultats de l'essai de Canicules :**

Tableau VI.17 : Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile d'Azazga N°01

<i>Echantillon d'Azazga N°01</i>			
	surface H	Surface V1	Surface V2
Etat naturel (1)	1.9639	1.8966	1.8969
Après Etuve (2)	1.9562	1.8628	1.8649
Après 10cycles (3)	1.8725	1.8541	1.7855

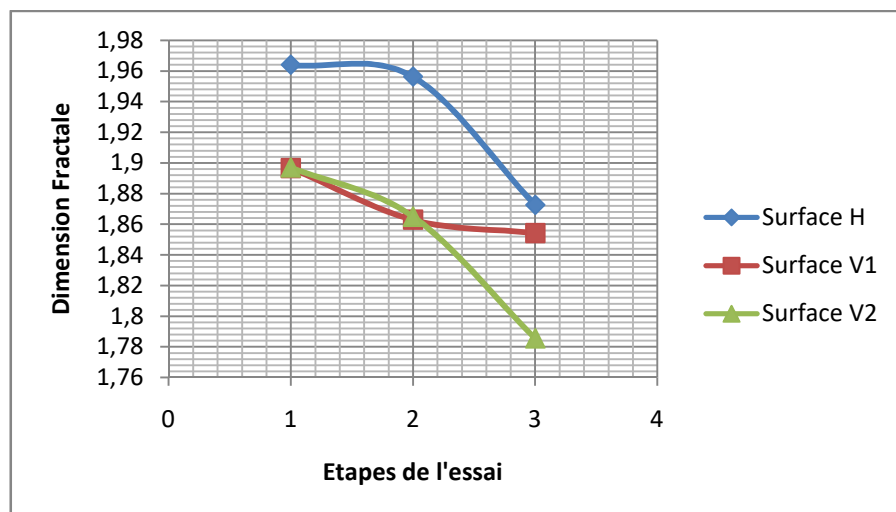


Figure VI.18 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de l'argile N°01 d'Azazga en fonction des cycles de Canicules.

Tableau VI.18 : Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile d'Azazga N°02.

<i>Echantillon d'Azazga N°02</i>			
	surface H	Surface V1	Surface V2
Etat naturel (1)	1.9565	1.9331	1.8502
Après Etuve (2)	1.8936	1.8896	1.8471
Après 10cycles (3)	1.8920	1.8779	1.8200

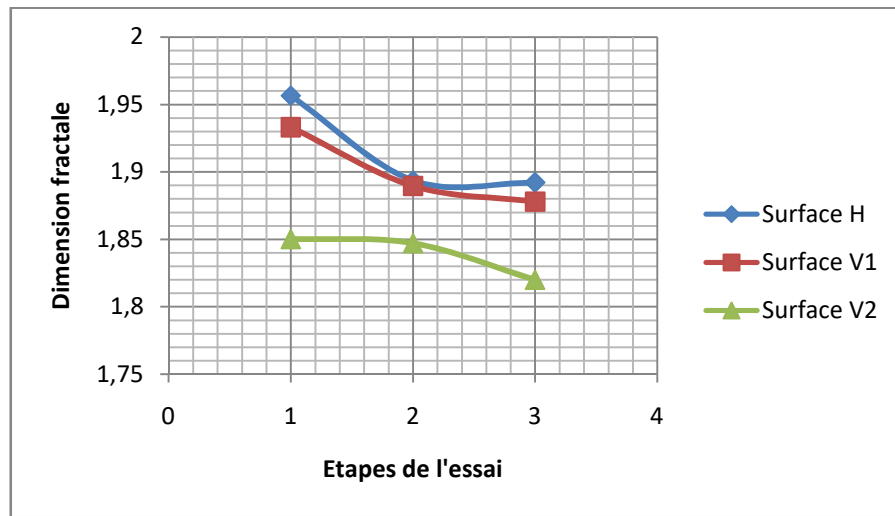


Figure VI.19 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de l'argile N°02 d'Azazga en fonction des cycles de Canicules.

Tableau VI.19 : Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile de Tizirt N°01

<i>Echantillon Tizirt N°01</i>			
	surface H	Surface V1	Surface V2
Etat naturel (1)	1,9219	1,8407	1,8609
Après Etuve (2)	1.8825	1.8298	1.8128
Après 10cycles (3)	1.6808	1.7064	1.6908

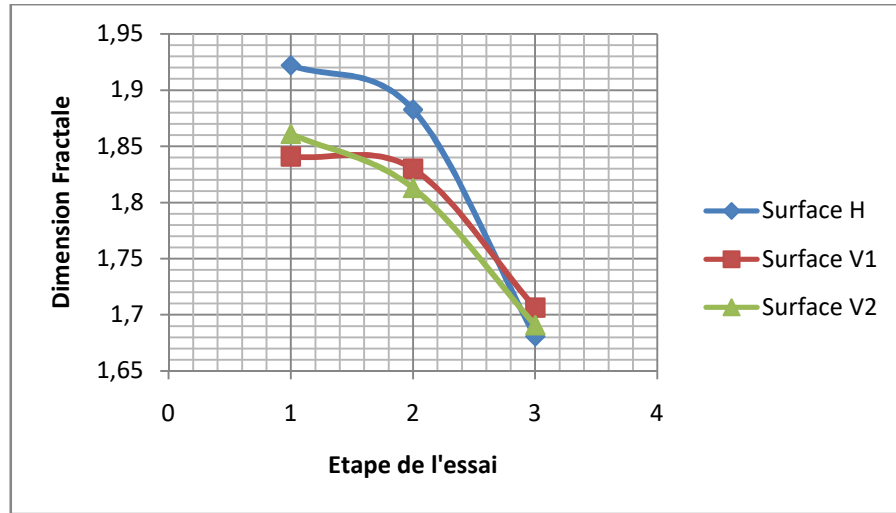


Figure VI.20 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de l'argile N°01 de Tizirt en fonction des cycles de Canicules.

Tableau VI.20 : Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile de Tizirt N°02

<i>Echantillon Tizirt N°02</i>			
	surface H	Surface V1	Surface V2
Etat naturel (1)	1,9223	1,8457	1,8656
Après Etuve (2)	1.8639	1.7512	1.7710
Après 10cycles (3)	1.6575	1.7483	1.6589

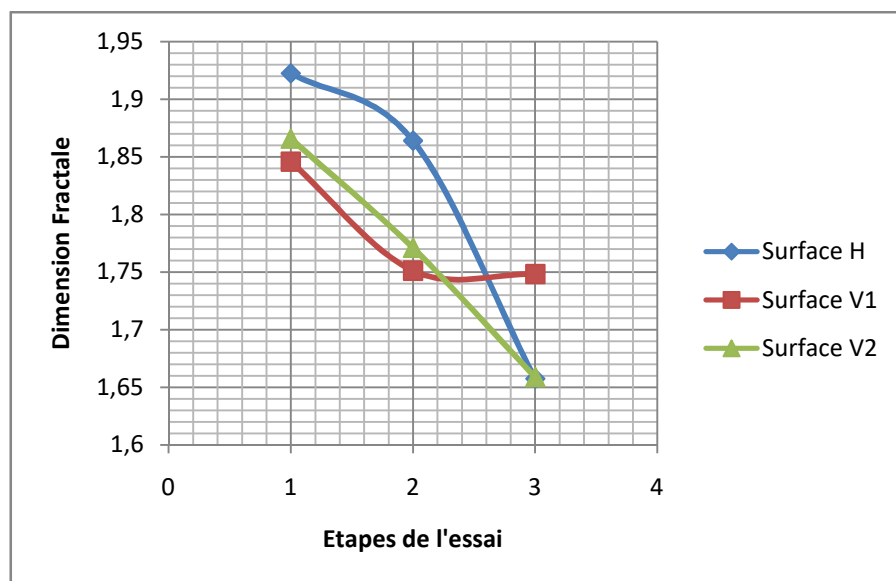


Figure VI.21 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de l'argile N°02 de Tizirt en fonction des cycles de Canicules

Tableau VI.21 : Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile de Centre Ville N°01

<i>Echantillon C.V.Compacté N°01</i>			
	surface H	Surface V1	Surface V2
Etat naturel (1)	1,978	1,8773	1,8763
Après Etuve (2)	1,9210	1,8615	1,8511
Après 10cycles (3)	1,6965	1,8489	1,7886

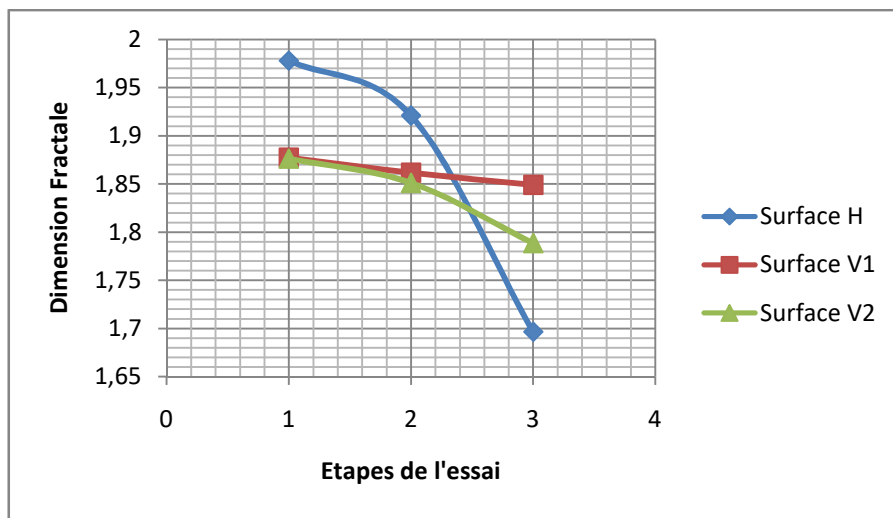


Figure VI.22 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de l'argile C.V.Compacté N°01 de en fonction des cycles de Canicules.

Tableau VI.22 : Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile de Centre Ville N°02

<i>Echantillon C.V.Compacté N°02</i>			
	surface H	Surface V1	Surface V2
Etat naturel (1)	1,9687	1,8915	1,8763
Après Etuve (2)	1,8943	1,8773	1,8540
Après 10cycles (3)	1,6792	1,8171	1,7957

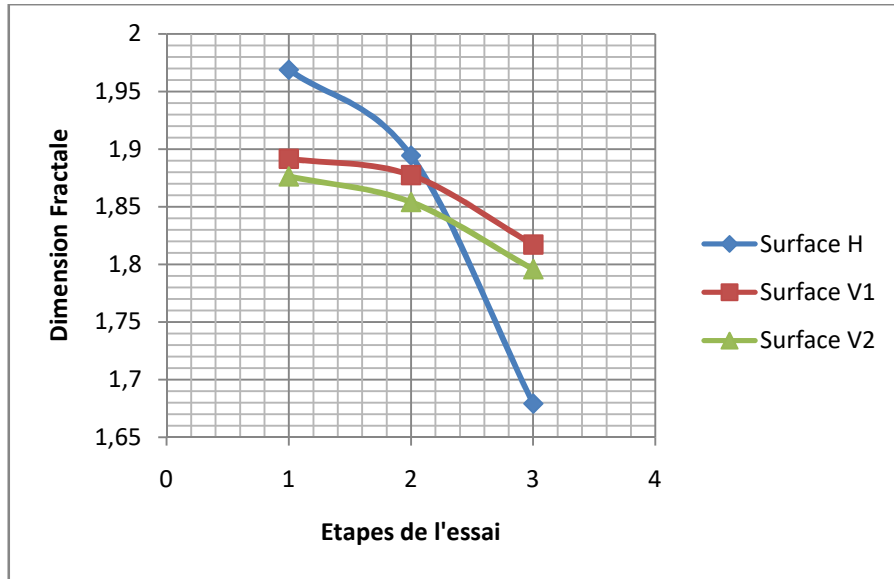


Figure VI.23 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de l'argile C.V.Compacté N°02 de en fonction des cycles de Canicules.

Tableau VI.23 : Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile de Cap Djinet.

<i>Echantillon Cap Djinet</i>			
	Surface H	Surface V1	Surface V2
Etat naturel (1)	1.9278	1.7746	1.7456
Après Etuve (2)	1.8280	1.7175	1.7239
Après 10cycles (3)	1.7181	1.6225	1.5455

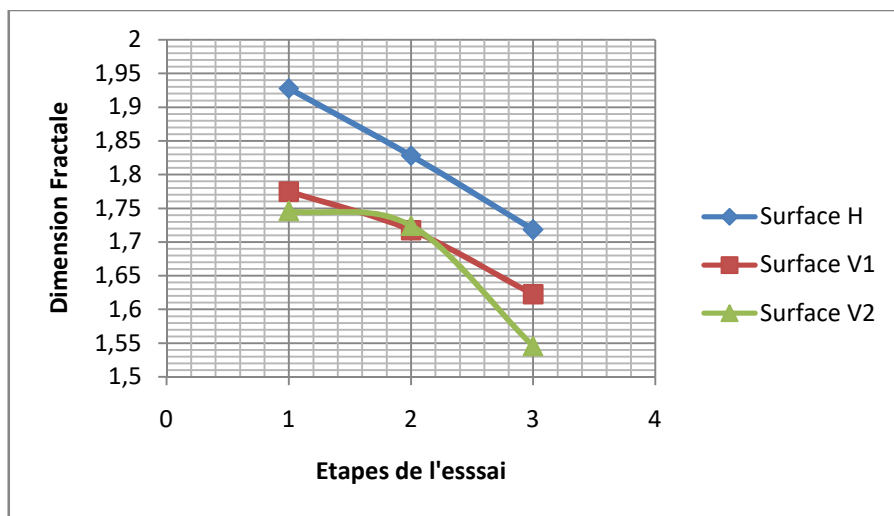


Figure VI.24 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de l'argile de Cap Djinet en fonction des cycles de Canicules.

- **Interprétation des résultats des trois essais :**

Les figures présentées ci-dessus montrent que les dimensions fractales calculées pour les échantillons ne varient pas linéairement ; elles présentent des pentes différentes, la valeur maximale et minimale varie d'un échantillon à un autre selon le mode et l'étape de l'essai.

Les figures (VI.2,VI.23) montrent que la valeur de DFR diminue avec l'augmentation du nombre de cycles appliqués, durant les 3 essais climatiques réalisés (Dégradabilité, Gel/Dégel/ canicules). 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 et de la structure des différents échantillons sont une cause de cette augmentation et de la diminution de la DFR calculée avant et après essais.

Il a été remarqué aussi que la façon de diminution de la D_{FR} est différente d'un sol à un autre durant les trois essais :

- Durant l'essai de canicules une diminution subite a été observée surtout sur la surface horizontale des échantillons de Tigzirt.
- la dimension fractale des échantillons témoin (état naturel) durant l'essai de Gel dégel varient presque de la même façon. (Figures ; VI.4 ; VI.7 ; VI.10 ; VI.13)
- la diminution rapide de la dimension fractale des échantillons a été remarquée dans :

- *la surface horizontale des échantillons compactés de Centre Ville ;

- *La surface Verticale des échantillons N°01 et N°02 de Cap Djinet et d'Azazga.

Ces diminutions de D_{FR} 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 D_{FR} , sans oublier la présence des minéraux ; qui ont une sensibilité à l'eau, et le potentiel de gonflement des sols qui est considérable (comme le sol d'Azazga).

VI.4 Conclusion :

La dimension fractale est un paramètre qui permet une meilleure précision dans la compréhension des changements engendrés par les différents effets climatiques, Elle est affectée par plusieurs paramètres, qui influent significativement sur le mode de rupture et le comportement des sols fins à l'état naturel et à l'état compacté, lesquels conduisent à la diminution D_{FR} .

Les résultats du calcul de la D_{FR} obtenus avec la méthode de ***Box Counting*** confirment les résultats vus durant les essais expérimentaux réalisés et présentés dans le chapitre précédent, ce que prouve sa fiabilité.

Les algorithmes donnent donc une estimation satisfaisante de la dimension fractale des échantillons par la technique d'analyse d'image, qui semble être formellement un outil puissant pour la comparaison des caractéristiques intrinsèques des sols liées à leur comportement mécanique.

CONCLUSION GENERAL

Ce travail s'inscrit dans le contexte des préoccupations actuelles liées au problèmes de retrait-gonflement, et constitue une contribution expérimentale à la compréhension et à la caractérisation de ce phénomène dans les sols argileux du nord algérien, le travail réalisé consiste d'une part, en une caractérisation climatologique et géotechnique de quelques argiles algériennes ainsi que l'estimation de leur potentiel de gonflement, et d'une part, en une analyse de la cinétique du gonflement et des essais cyclique de séchage humidification.

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

Les essais ont été réalisés sur des échantillons intacts et remaniés (compactés) de nature argileuse, prélevés de 3 sites situés à la wilaya de Tizi-Ouzou ; Azazaga ; Centre ville ; Tizirt et un autre site situé a la wilaya de Boumerdes plus précisément a Cap Djinet .

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.
- le compactage a un rôle très important dans ce qui concerne la dégradation des sols, car il empêche une déformation importante et diminue le développement des fissures.
- la présence des minéraux sensibles à l'eau a une influence sur le changement du sol (gonflement-retrait).
- le cycle émerision-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.

Références bibliographiques

- **ALDALATI. R (2014)** « Conception des chaussées en béton bitumineux sous l'effet des conditions climatiques : Application au phénomène de Gel. » Thèse de doctorat : Spécialité Génie Civil ; Université des Sciences et Technologie LILLE, (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.
 - NF P 94-093_Proctor_Octobre (1999) : « Détermination des références du compactage d'un matériau. »
 - NFP 94- 041 (1995) : « Analyse granulométrique, méthode de tamisage par voie humide. »
 - NFP 94-050 (1995) : « Détermination de la teneur en l'eau pondérale des matériaux- Méthode par étuvage ».
 - NFP 94-051 (1993) : « Détermination des limites d'Atterberg la limite à la coupelle – limite de plasticité au rouleau ».
 - NFP 94- 053 (1991) : « Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire. Méthode de la trousse coupante, du moule et de l'immersion dans l'eau ».
 - NFP 94-057 (1992) : « Analyse granulométrique des sols par sédimentométrie ».
 - NFP 94-060-1 : « Détermination conventionnelle de la limite retrait sur le passant à 400µm d'un matériau ».
 - NFP 18-592 (1990) : « Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à tache ».
 - NFP 94- 067 (1992) : « Coefficient de dégradabilité des matériaux rocheux ».
 - NF EN 1367-1 (2000) : « Essais pour déterminer les propriétés thermiques et l'altérabilité des granulats, Partie 1: Détermination de la résistance au gel/dégel ».
 - NF EN 1367-4 (1998) : « Essais pour déterminer les propriétés thermiques et l'altérabilité des granulats, Partie 4 : Détermination du retrait au séchage ».

- **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.
- **BARNSLEY. M.F (1988)** : « Fractals Everywhere. Academic Press », San Diego.
- **BILAN 2007 DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES** : « Rapport de synthèse Publié sous la direction de L'Équipe de rédaction principale Rapport de synthèse GIEC Rajendra K. Pachauri Président du GIEC » (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat).
- **BOUZEBOUDJA. 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.
- **CALVET. R (2009-2003)** : Le sol - Propriétés et fonctions - Volume 1 et « Constitution et structure, phénomènes aux interfaces ». Edition 2003.2009
- **CANTOR.G (1883)** : « Uber unendliche, lineare Punktmannigfaltigkeiten », Mathematische Annalen 21 pp. 545-591.
- **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.
- **CREMER. H (1925)** : « Uber die Iteration rationaler Funktionen, Jahresbericht der Deutschen Mathematiker-Vereinigung » 33 pp. 185-210.
- **FAGEL.N (2005)** « Atmospheric lead and heavy metal pollution records from a Belgian peat bog spanning the last two millenia: Human impact on a regional to global scale ».2005.
- **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.
- **GIORGIO.F et LIONELLO.P (2008)** : « Climate change projections for the Mediterranean region ». Global and Planetary Change, v.63, p. 90–104.
- **HAMMER.K.P Aydin. A et Basu. A** « Le marteau Schmidt dans la caractérisation des matériaux rocheux » (Département des sciences de la terre, Université de Hong Kong, chemin Pokfulam, Hong Kong, Chine)

- **HASSINI. N, ABDERRAHMANI. B. et DOBBI. A** : « changement climatique et phénomènes extrêmes : action symbiotique du climat et du milieu naturel dans l'occurrence de la sécheresse en Algérie », colloque de l'association internationale de climatologie, liège 2015.
- **HERMANN. Z** : « Typographie des caractères romains de la Renaissance, »
- **HILBERT. D (1891)** : « Uberdie stetige Abbild engeigner Linie aufein FL achenstuck », Mathematische Annalen 38 pp. 459-460.
- **HOLTZ. R.D et KOVACS W.D (1991)** : « Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite » (GRIM, 1959).
- **HUANG et ZHAN (2002) ; Wang et al. (2006)** : « Simulation of soil organic carbon Dynamics in chinese »
- **HUANG. G.H et ZHAN. W.H (2002)** :« Fractal property of soil particle size distribution and its application. » Acte Pedologica Sinica, 39.
- **HUTCHINSON. J (1981)** : «Fractals and self-similarity» Indiana Journal of Mathematics 30 (1981) pp.713-747.
- **JULIA. G (1918)** : «Mémoire sur l'itération de fonctions rationnelles, Journal de Mathématique Pure et Appliqué 8 pp. 47-245.
- **LAJOIE. J (2006)** :« La Géométrie Fractale ».Mémoire de Master en mathématique et informatique, Université du Québec
- **LANTAGNE. K et al. (2002)** :« Tropical Ecology » V47-49.
- **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.
- **LINDENMAYER. A (1968)**, :«Mathematical models for cellular interaction in developement», Part I and II, Journal of theoretical Biology 18 pp. 280-315.
- **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 (1982)**: « The Fractal Geometry of Nature. » Edition W.II. Freeman, San Francisco, 453 pp.
- **MANDELBROT. B (1983)**: « The fractal Geometry of nature. » Edition W.II. Freeman, San Francisco, 461 pp.

- **MANDELBROT. B.B (1975)** :« Les objets fractals, forme, hasard et dimension. » 190 pp. Editions Flammarion, Paris (France)
- **MELBOUCI. B (2002)** : Doctorat d'Etat en Génie civil | Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Tizi Ouzou | UMMTO).
- **MUSY et SOULLER (1991)** : « Physique du Sol », p. 25-335.
- **NEFZIA (2012)** : « Evaluation économique de l'impact du changement climatique sur l'agriculteur : étude théorique et application au cas de Tunisie »Thèse de doctorat en Economie de l'environnement et des ressources naturelles, Ecole Doctorale Agriculture, Alimentation, Biologie, Environnement, Santé, Paris.
- **OUTAYEB.S (2016)** : « Mémoire de Master en Géotechnique et environnement : » Evaluation de la dégradation chimique des grains de schiste a l'aide de la notion de la dimension fractale, Université Mouloud Mammeri. Tizi-Ouzou
- **PAVEL. S et BOILEAU. M** : « Vocabulaire combinatoire de l'imagerie fractale », gouvernement du Canada .Décembre (2005.)
- **PEANO. G (1890)** :« Sur une courbe qui remplit toute une aire plane », Mathematische Annalen 36 pp. 157-160
- **RUSSEL et al. (1980).** :« The Scientific Foundation of Neuropsychologie Assesment ».Miami. (USA.)
- **SCHROEDER (1991).** : « les cavernes à Montréal, du glaciotectonisme à l'aménagement urbain ».Québec.
- **SIERPINSKI. W (1915)** : « Sur une courbe cantorienne dont tout point est un point de ramification », C.R. Académie des Sciences de Paris 160, p. 302.
- **TABET AOUL (2008)** : « Changement Climatique et agriculture au Magreb », Note d'allerte du CEIHM n°48. Paris. (France).
- **VALLEJO et HYSLIP (HYSLIP.J, VALLEJO.L (1997)** : « Fractale Analysis of the roughnes and size distribution of granular material » *Engineering Géology*, vol.48.pp 231-244.
- **VON KOCH. H (1904)** : « Sur une courbe continue sans tangente obtenue par construction géométrique élémentaire », Arkiv for matematik 1, pp. 681-704.
- **VON KOCH. H (1906)** « « Une méthode géométrique élémentaire pour l'étude de certaines questions de la théorie des courbes planes », Acta Mathematica 30 pp. 145-174.
- **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.3d-gfx.com/ Fractal/3d.html](http://www.3d-gfx.com/Fractal/3d.html).
- http://fractals.nsu.ru/gallery_en.htm
- http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Relativit%C3%A9_d%27%C3%A9c_helle&oldid=73896617.
- http://laurie.bougeois.free.fr/cours/Mineraux_argileux.pdf
- [http : //www.translationbureau.gc.ca/pwgsc internet/ fr/publications/documents/fractal.pdf](http://www.translationbureau.gc.ca/pwgsc_internet/fr/publications/documents/fractal.pdf).
- [http : //www.3d-gfx.com/fractals/3d.html](http://www.3d-gfx.com/fractals/3d.html)).



Annexe

*Représentation Des Images
Des Echantillons Prisent
Durant Les Essais
Climatiques*

I. Essais de GEL /DEGEL

Etat Naturel



SURFACE H



SURFACE V1



SURFACE V2

Après Etuve



SURFACE H



SURFACE V1



SURFACE V2

Après 10 Cycles



SURFACE H



SURFACE V1



SURFACE V2

Annexe : Représentation Des Images Des Echantillons Prisent Durant Les Essais
Climatiques

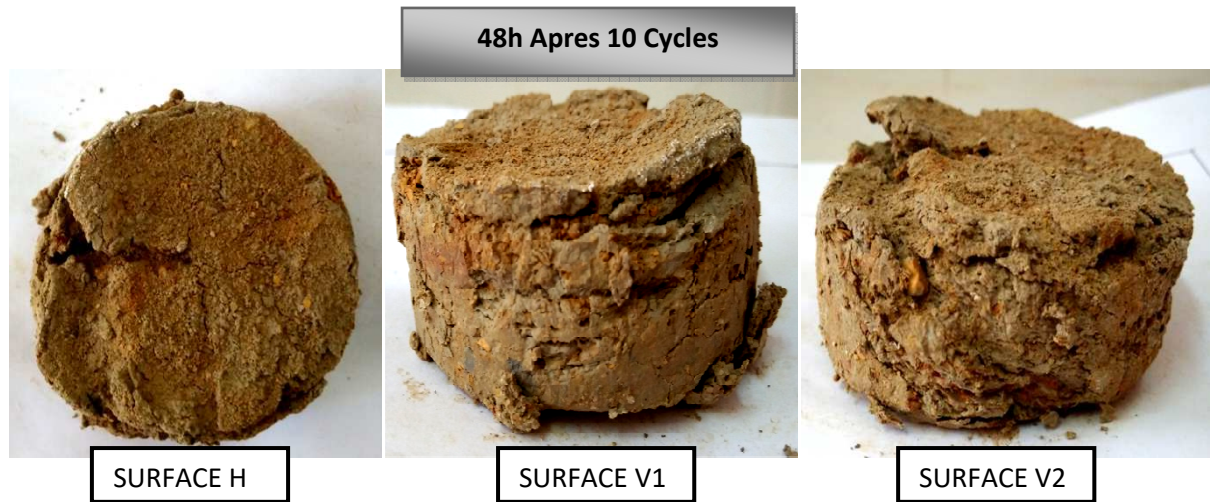
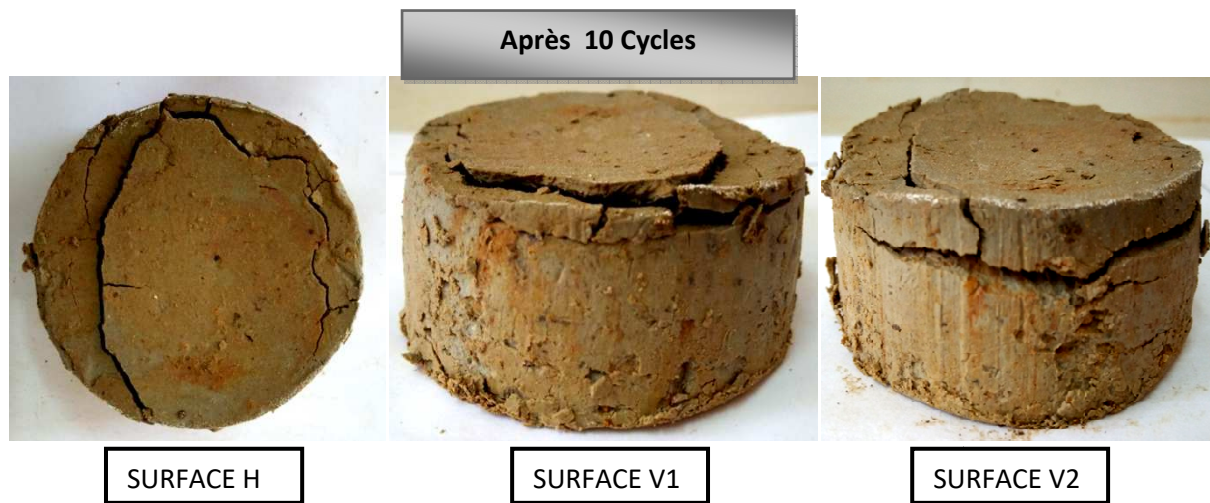
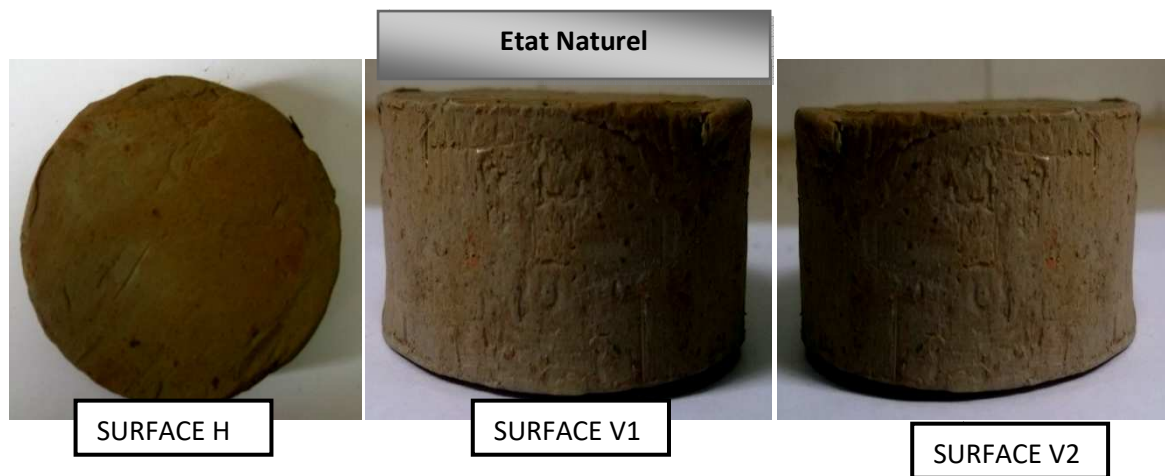


Figure I.1 : Les images de l'échantillon N°02 d'Azazga à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.



Annexe : Représentation Des Images Des Echantillons Présentés Durant Les Essais Climatiques

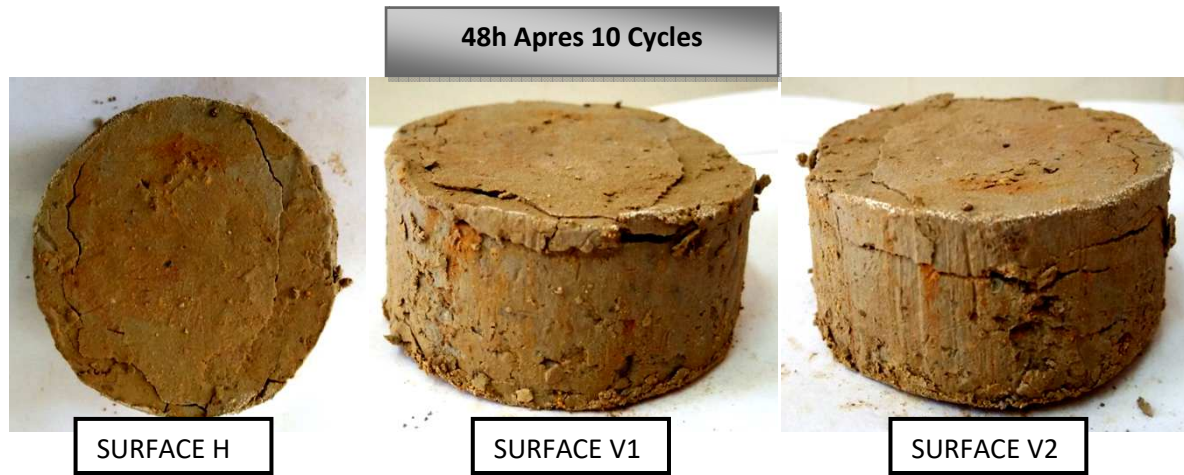
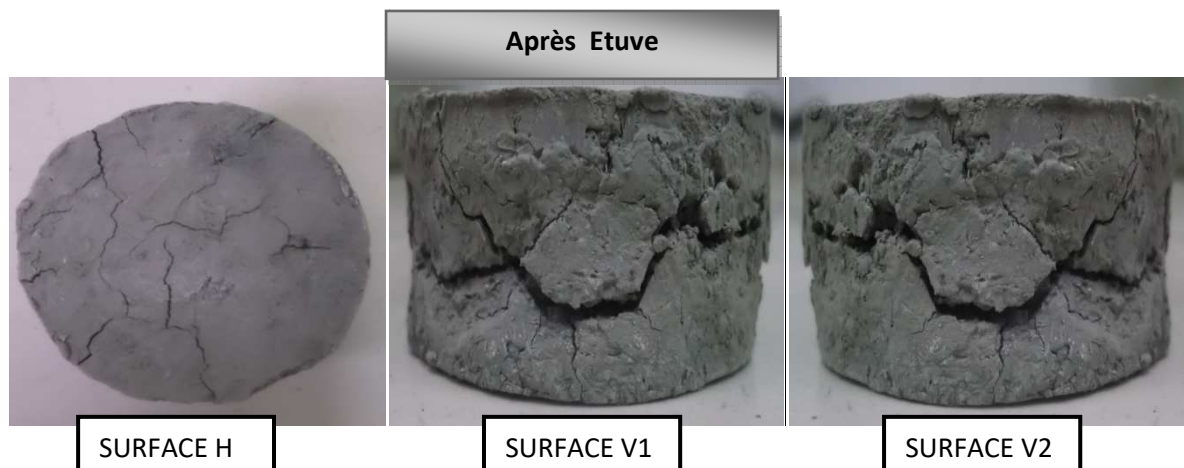
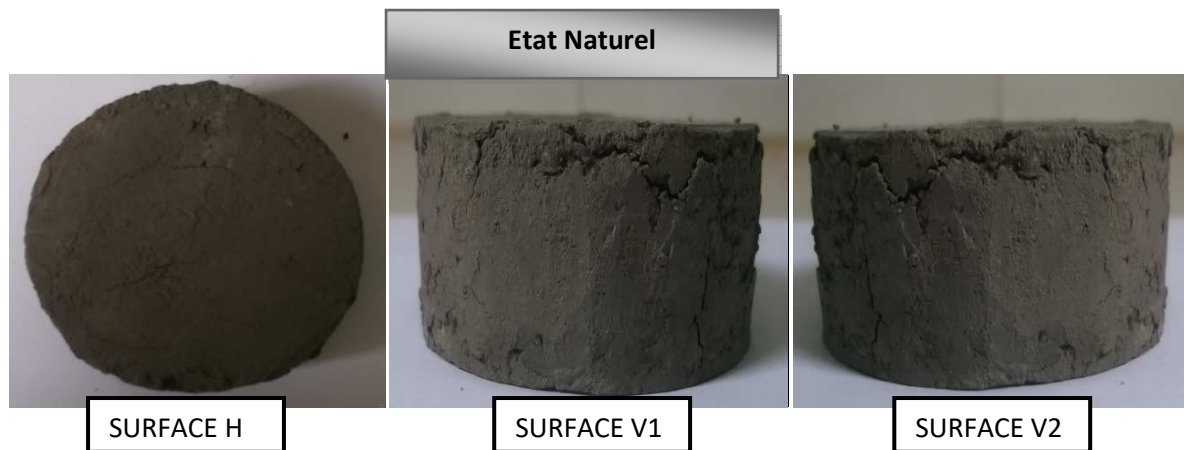


Figure I.2 : Les images de l'échantillon Témoin d'Azazga (Azazga.N) à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.



Annexe : Représentation Des Images Des Echantillons Présentés Durant Les Essais Climatiques

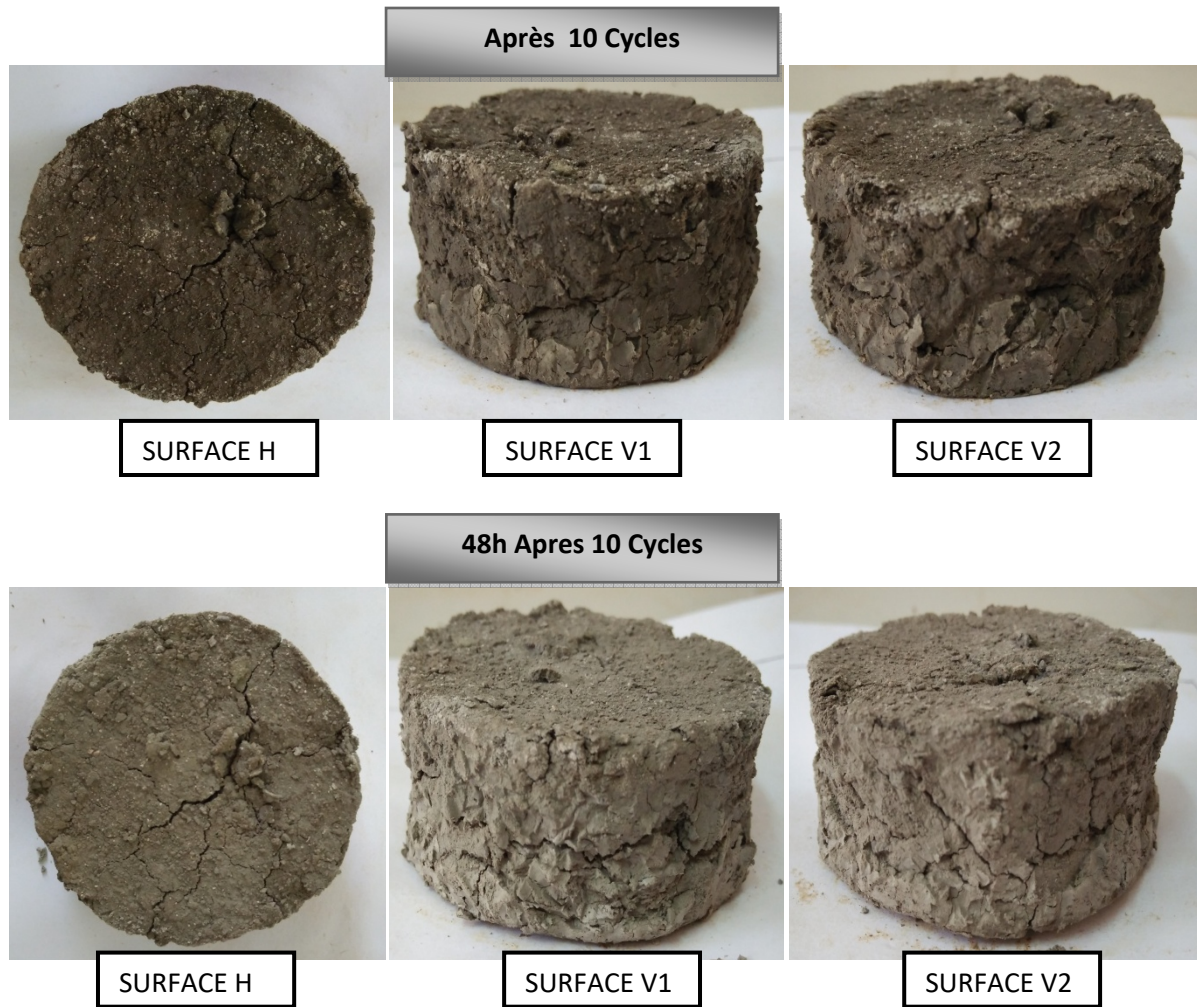
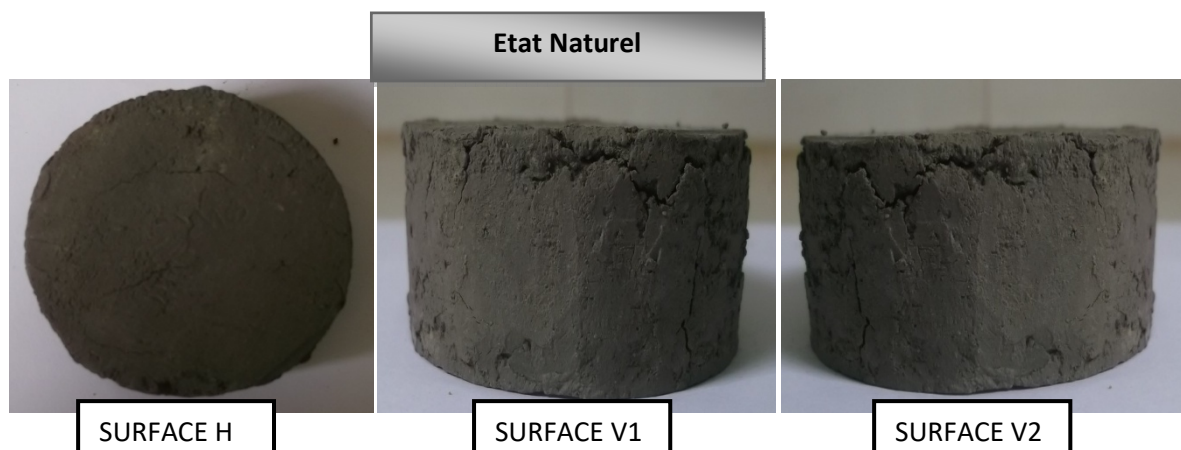


Figure I.3 : Les images de l'échantillon N°02 de Tigzirt à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.



Annexe : Représentation Des Images Des Echantillons Présentés Durant Les Essais Climatiques

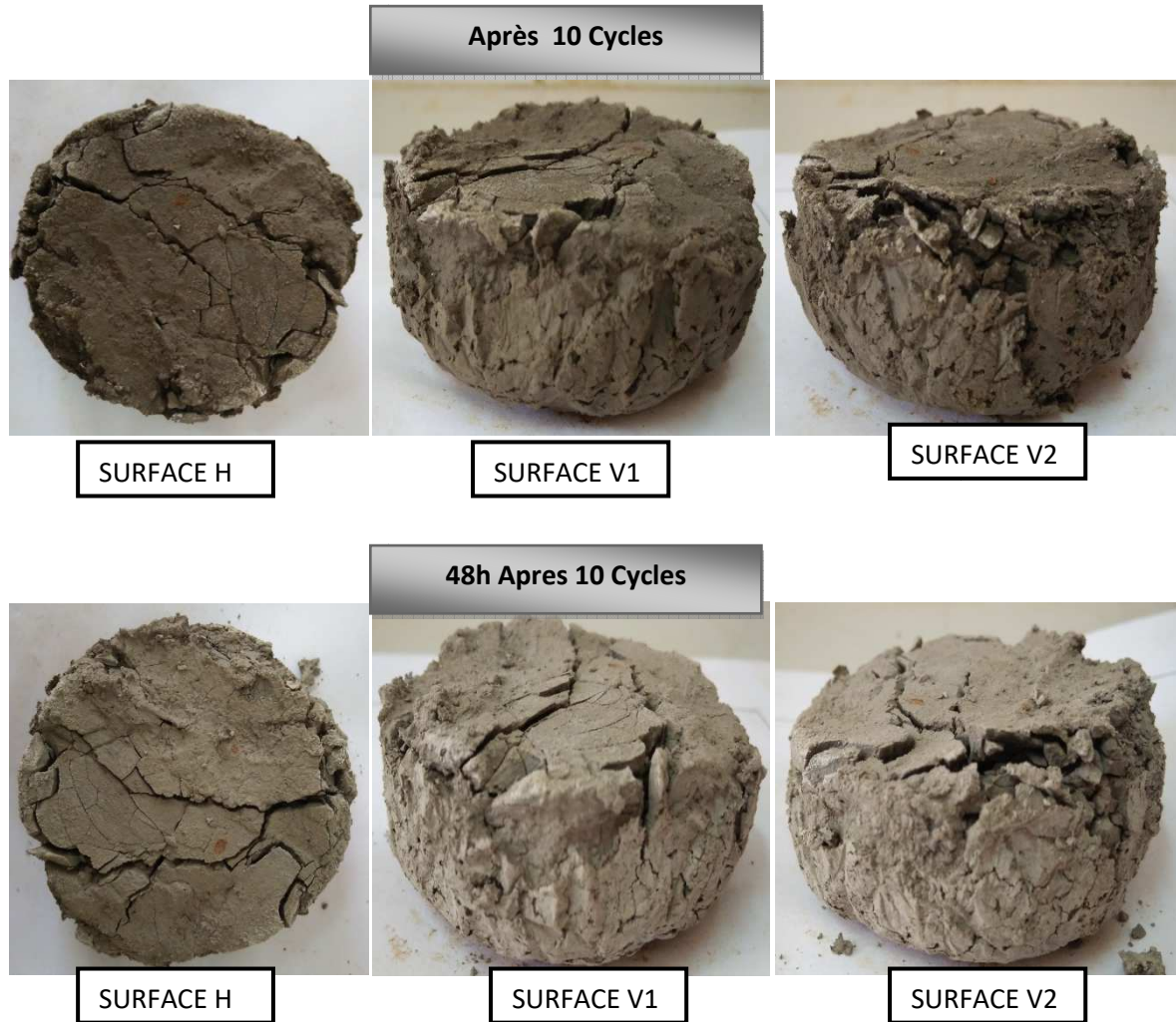
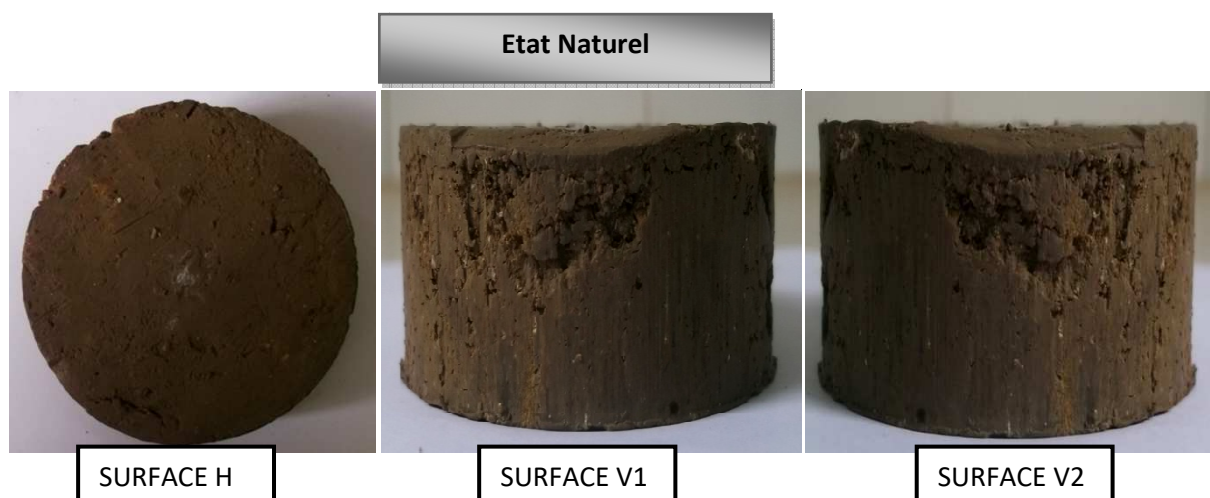


Figure I.4 : Les images de l'échantillon Témoin de Tizirt (Tizirt.N) à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.



Annexe : Représentation Des Images Des Echantillons Présentés Durant Les Essais Climatiques

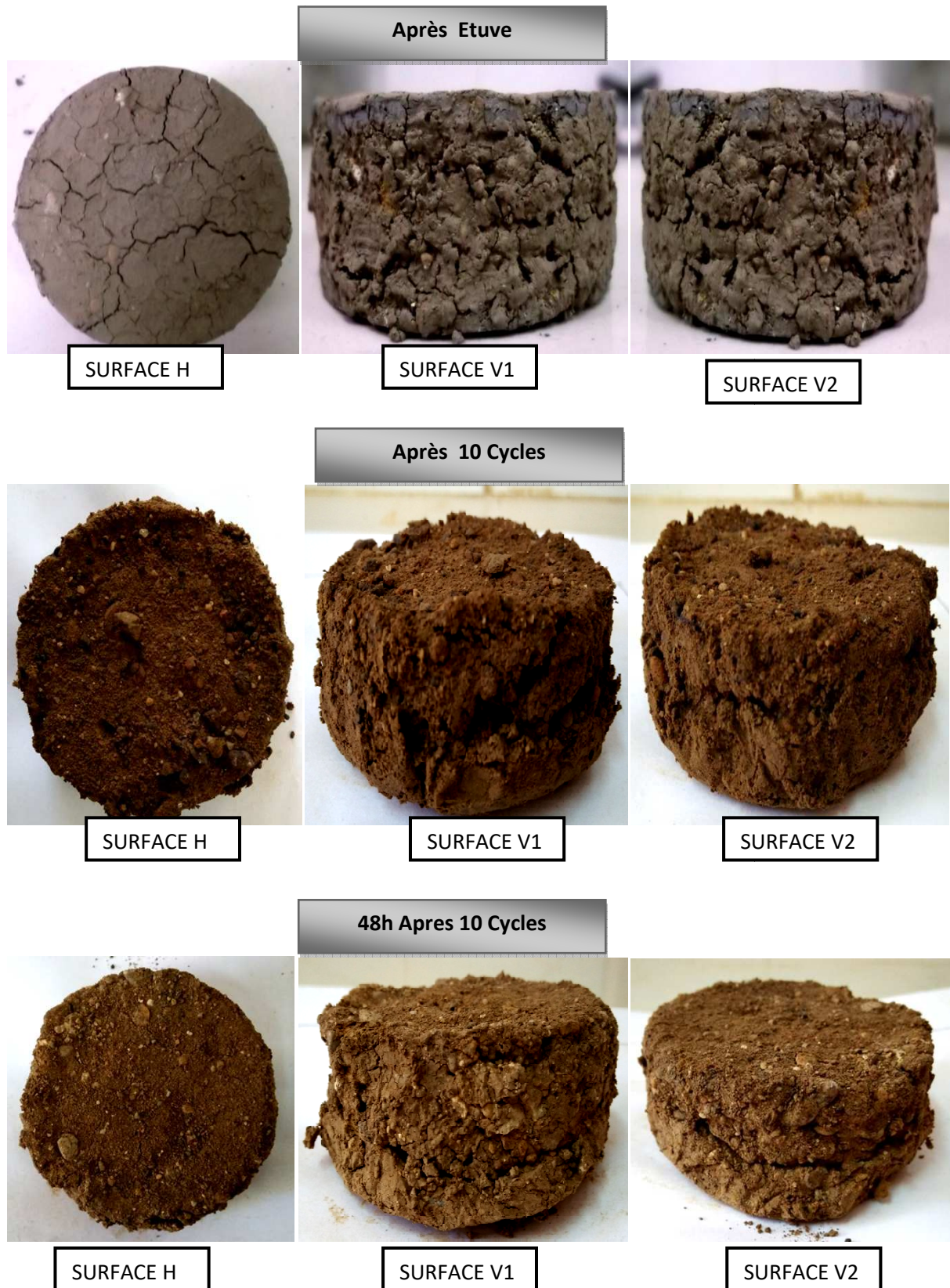


Figure I.5 : Les images de l'échantillon N°02 de Cap Djinet à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.

Annexe : Représentation Des Images Des Echantillons Prisent Durant Les Essais

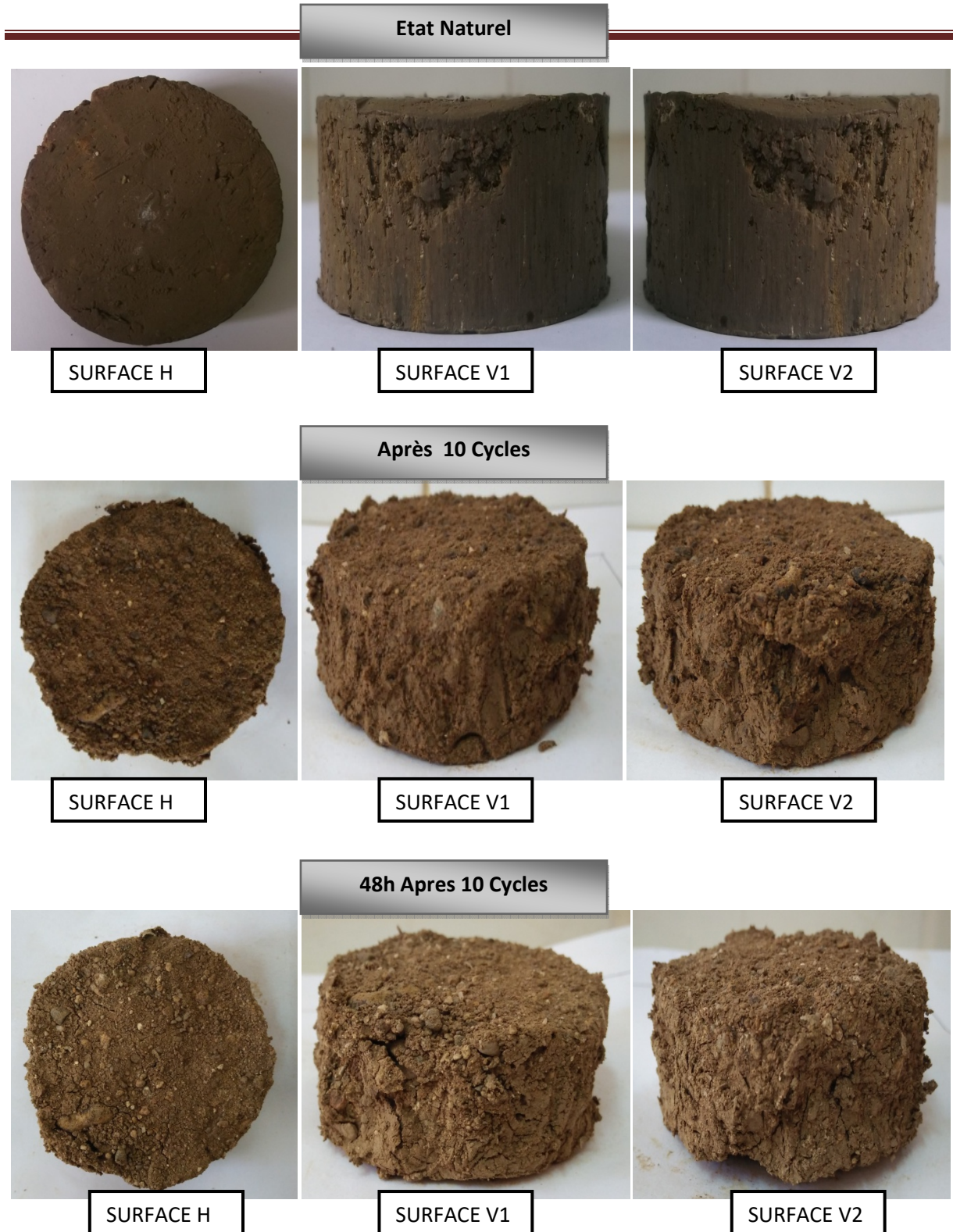
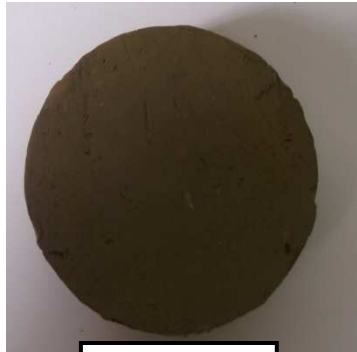


Figure I.6 : Les images de l'échantillon Témoin de Cap Djinet (Cap Djinet. N) à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.

Annexe : Représentation Des Images Des Echantillons Prisent Durant Les Essais
Climatiques

Etat Naturel



SURFACE H



SURFACE V1



SURFACE V2

Après Etuve



SURFACE H



SURFACE V1



SURFACE V2

Après 10 Cycles



SURFACE H



SURFACE V1



SURFACE V2

Annexe : Représentation Des Images Des Echantillons Prisent Durant Les Essais
Climatiques

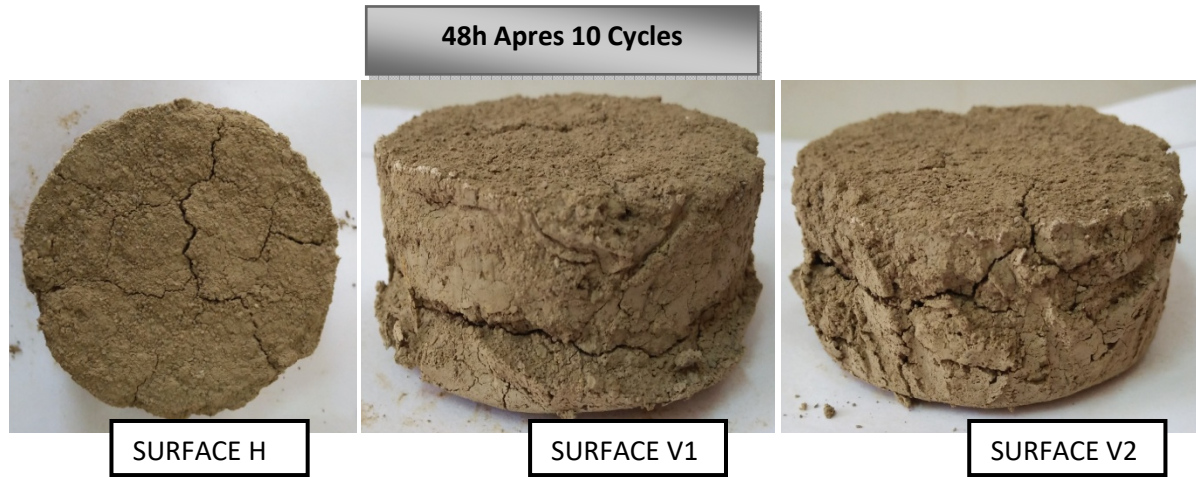


Figure I.7 : Les images de l'échantillon N°02 de Centre ville (C.V.Compacté) à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.

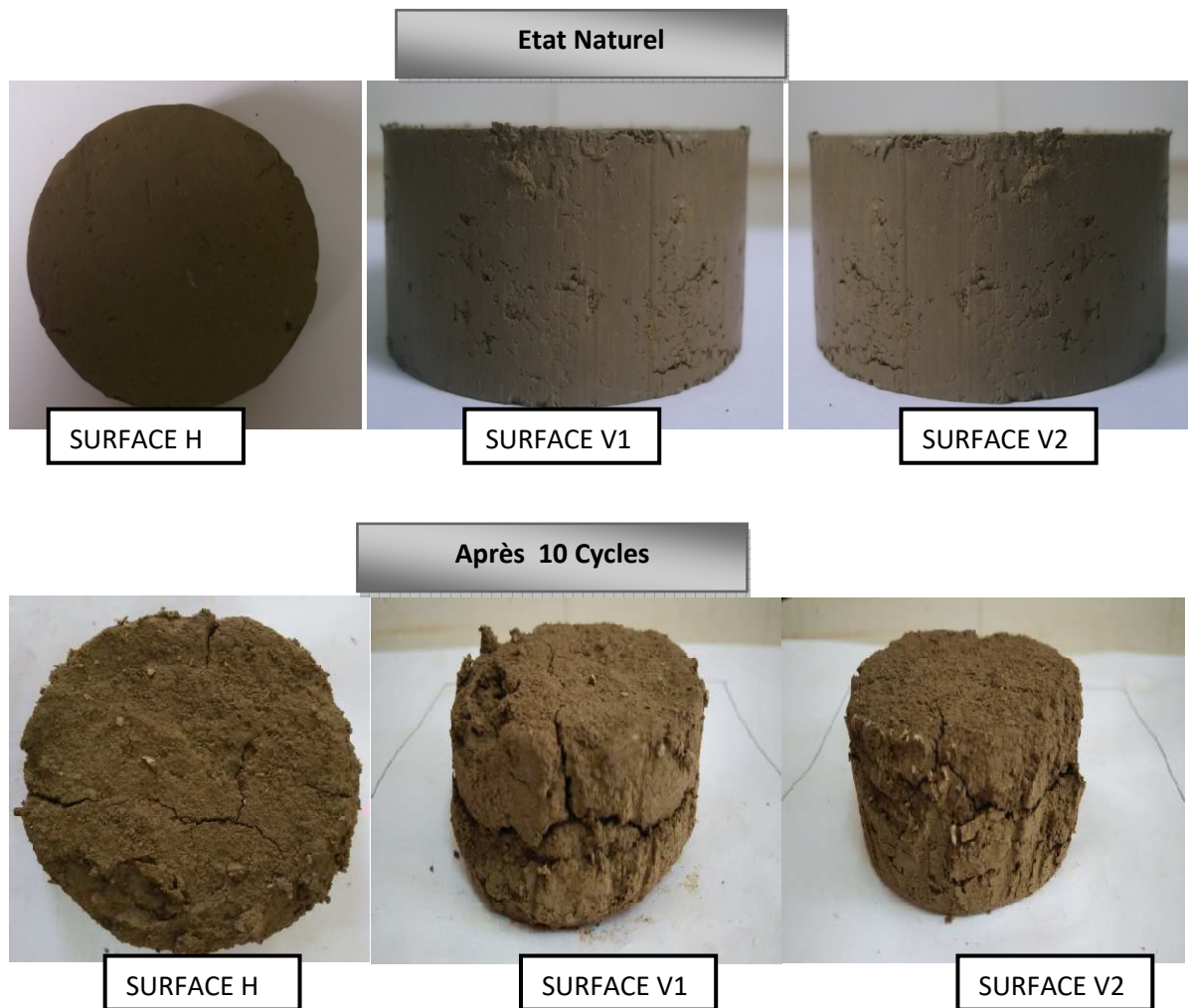
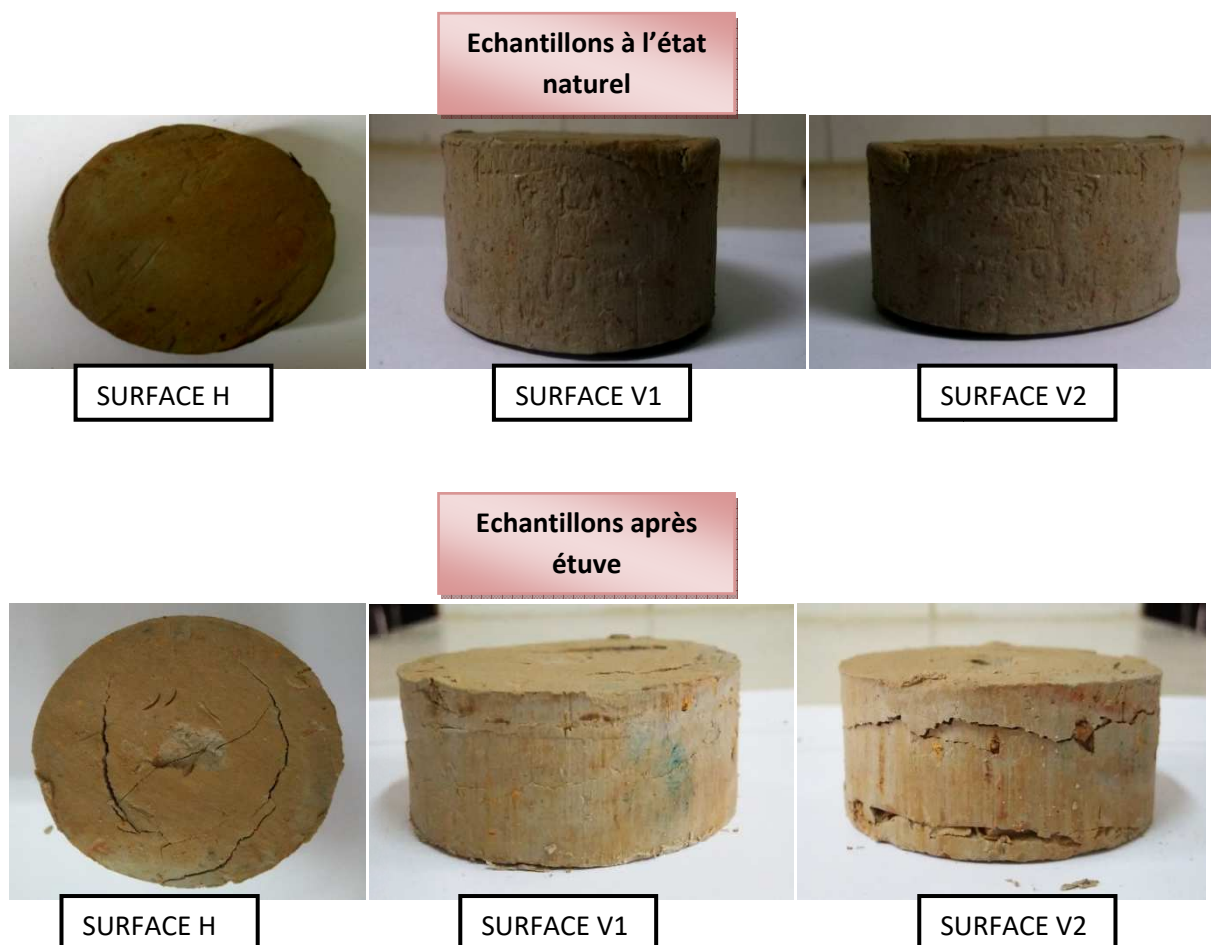




Figure I.8 : Les images de l'échantillon témoin de Centre ville (C.V.N.Compacté) à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.

II. Essais de CANICULES



Annexe : Représentation Des Images Des Echantillons Présent Durant Les Essais
Climatiques

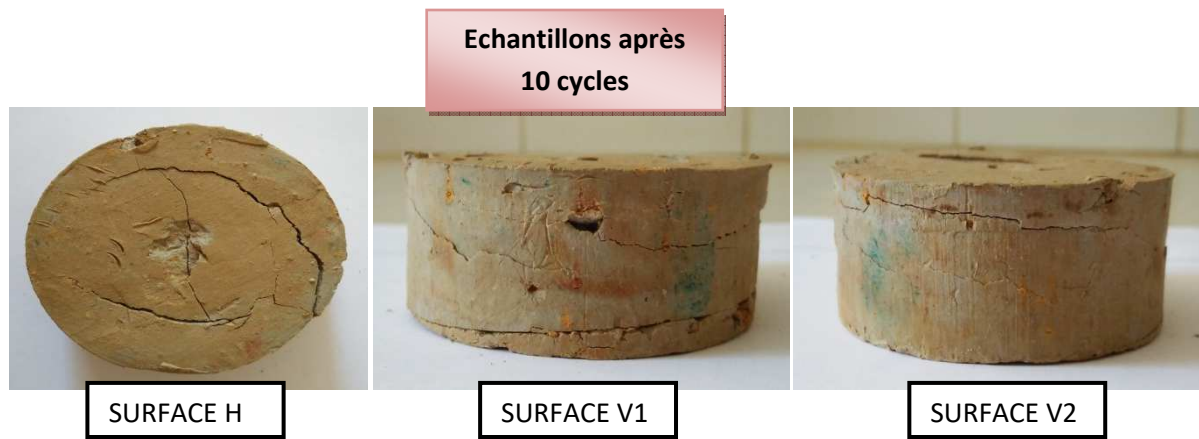
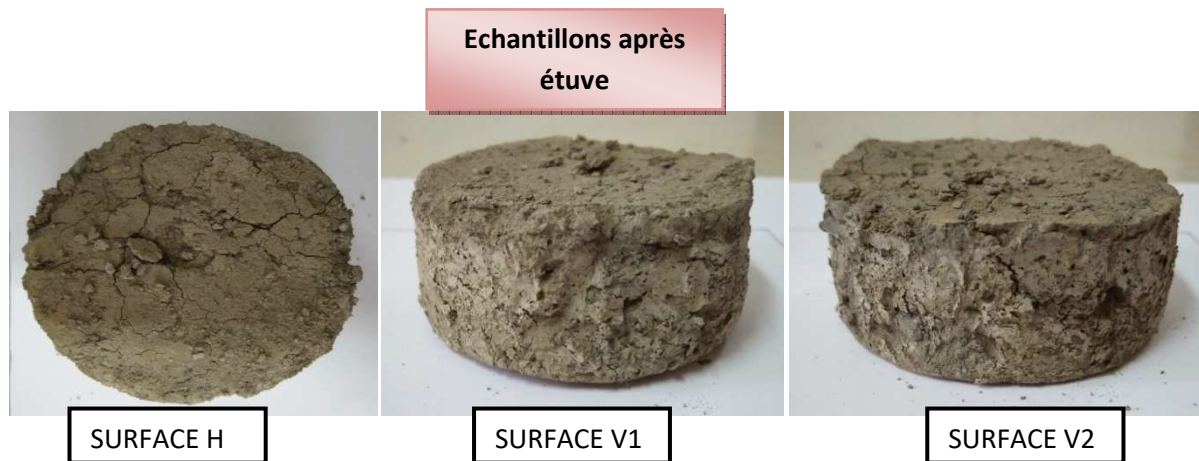
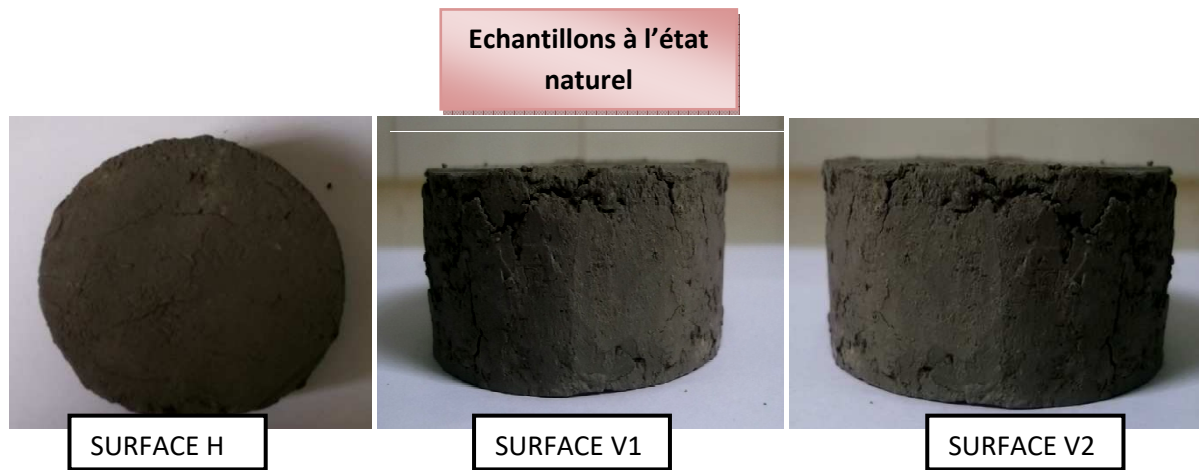


Figure II.1: Images de l'échantillon d'argile N°02 d'Azazga pendant l'essai de Canicules.



Annexe : Représentation Des Images Des Echantillons Présentés Durant Les Essais Climatiques

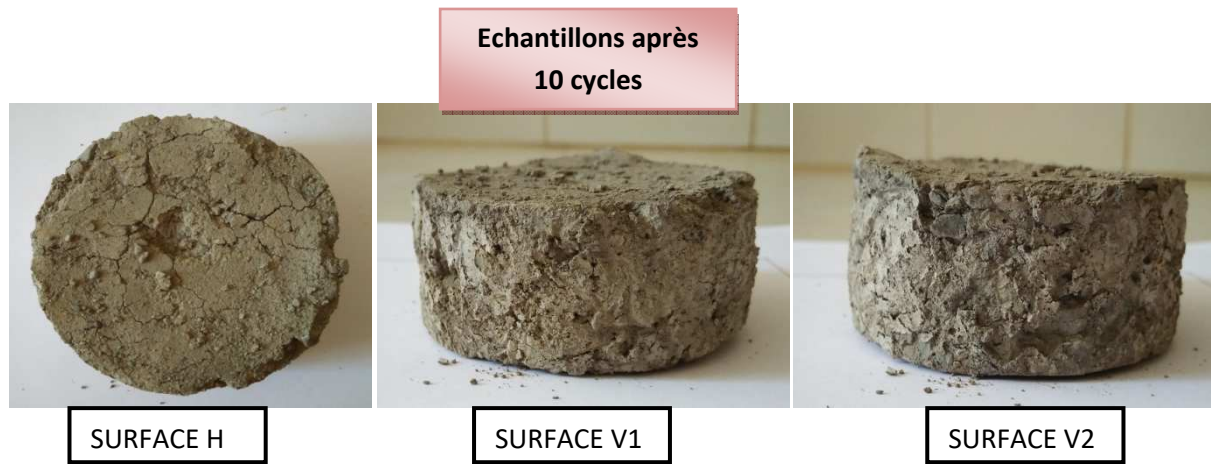
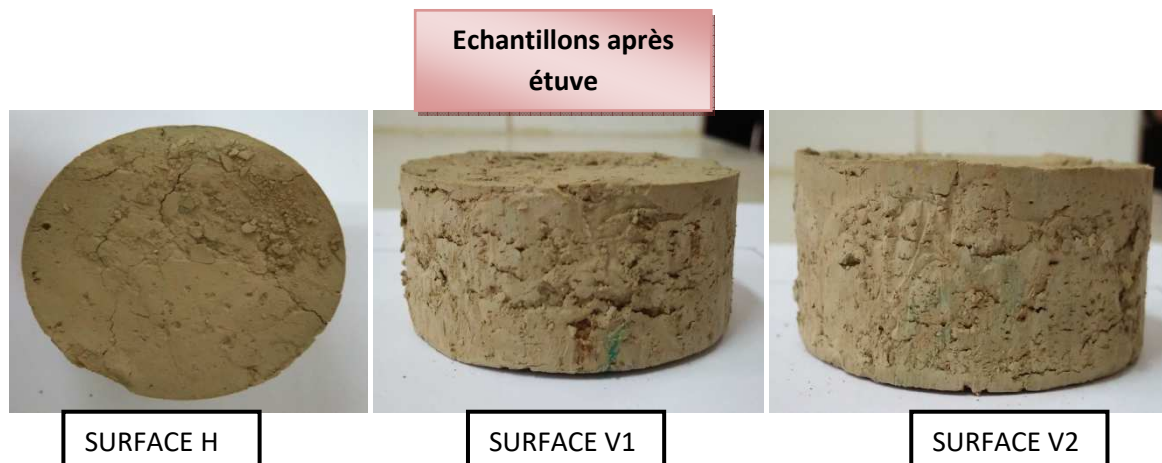
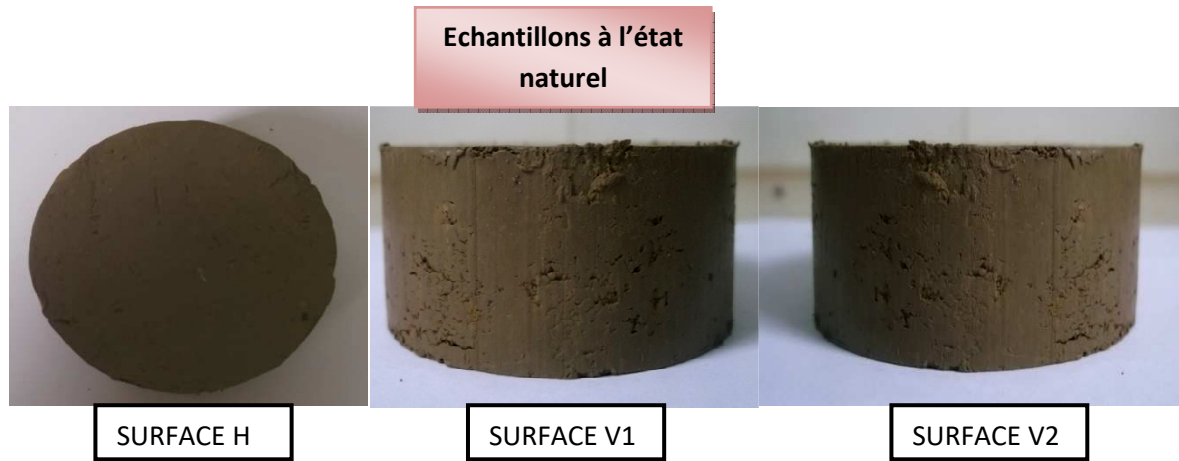


Figure II.2: Images de l'échantillon d'argile N°02 de Tizirt pendant l'essai de Canicules.



Annexe : Représentation Des Images Des Echantillons Présentés Durant Les Essais
Climatiques

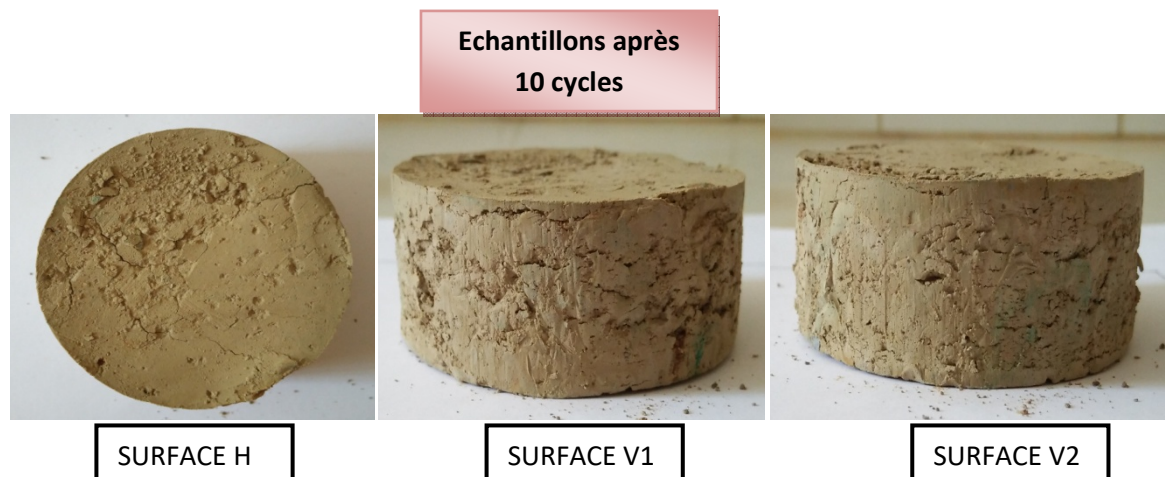


Figure II.3: Images de l'échantillon d'argile N°02 de Centre ville (C.V.Compacté) pendant l'essai de Canicules.



Chapitre III

*Les Effets Climatiques
Et Les Sols A Etudier*

Chapitre VI

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



Chapitre V

**LES ESSAIS REALISES
SUR LES SOLS
ETUDIES**



Chapitre IV

**IDENTIFICATION DES
SOLS ETUDIES**



Chapitre II

*L'EFFET DES
CONDITIONS
CLIMATIQUES SUR
LES SOLS FINS*



Chapitre I

*LA DIMENSION
FRACTALE ET SON
CALCUL EN GENIE CIVIL.*