

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 Géo matériaux, Environnement et Aménagement(LGEA)



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Génie Civil

Option : Géotechnique

Réalisé par :

M^{ELLE}: ALI AHMED RACHIDA

THEME:

***Étude du phénomène retrait-gonflement des
argiles***

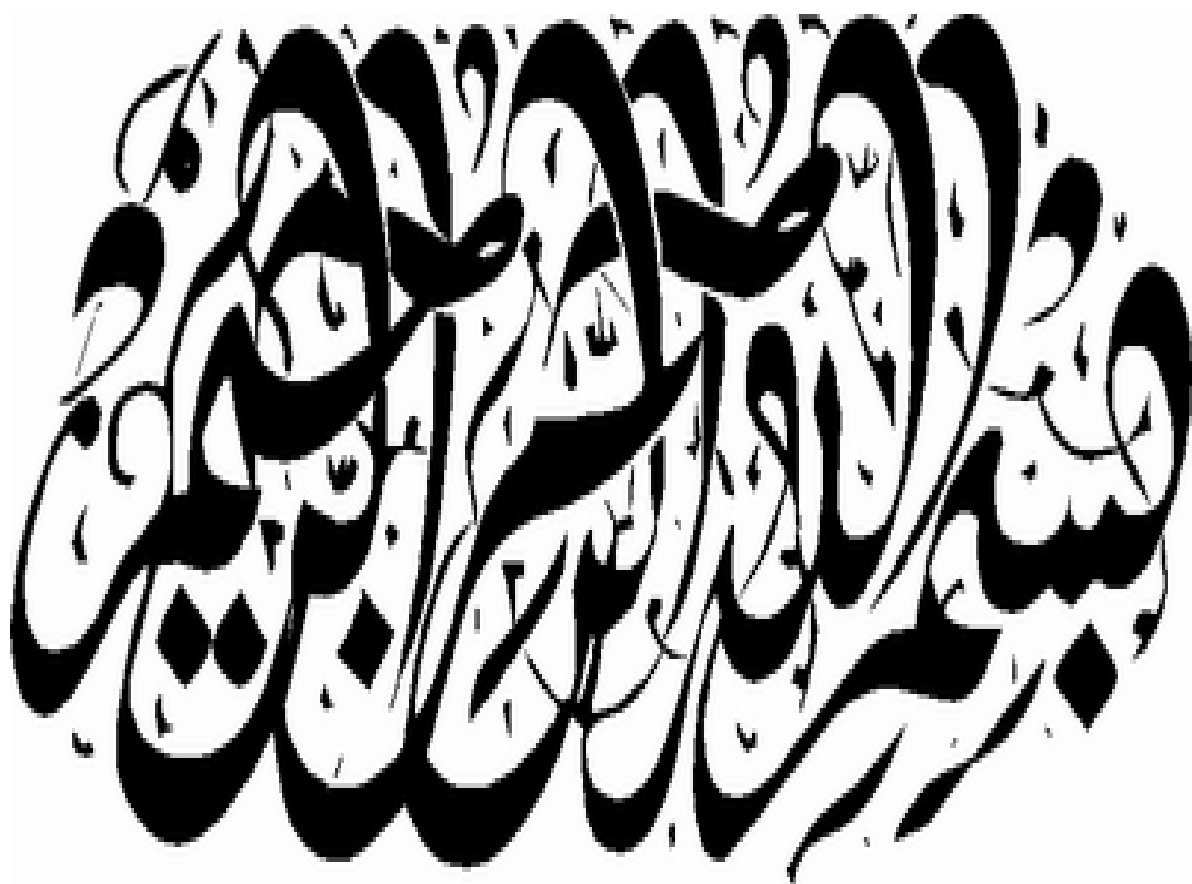
Devant le jury composé de :

Mr MELBOUCI Bachir, Professeur à l'UMMTOPrésident

M^{me} BOUZBOUDJA Aldjia, Maître de Conférence-B à l'UMMTO.....Promotrice

Mr BOUDLAL Omar, Maître de Conférence-A à l'UMMTO.....Examineur

Année Universitaire : 2019/2020



SOMMAIRE

Remerciements	
Dédicace	
Liste des symboles et notations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
INTRODUCTION GENERALE	1

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : Les problèmes des changements climatiques

I.1.Introduction	3
I.2.Le climat.....	3
I.3.Classification climatique	4
I.3.1. Le climat tropical	4
I.3.2. Le climat subtropicaux	4
I.3.3. Le climat tempéré.....	4
I.3.4. Le climat polaire.....	4
I.3.5. Le climat désertique	4
I.4. Le climat en Algérie.....	5
I.4.1. Le Nord, un pays de hautes terres	5
I.4.2. Le Sud, un désert dominé par le Hoggar.....	5
I.5. Le climat en Tizi-Ouzou	5
I.5.1. Situation géographies de Tizi-Ouzou.....	8
I.6. Analyse climatique.....	8
I.7. Les tendances des paramètres climatiques en particulier l'évaporation, la précipitation, l'humidité et la température	9
I.7.1. Précipitation	9
I.7.2. Evaporation et humidité	10
I.7.3. Température	11
I.8. Changement climatique.....	12
I.8.1. L'augmentation des concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre.....	12
I.8.2. Le dioxyde de carbone (CO ₂)	13
I.8.3. Le méthane (CH ₄).....	13
I.8.4. Le protoxyde d'azote (N ₂ O)	14
I.9. Les indicateurs du changement climatique	14
I.9.1. L'augmentation de la température de surface sur la terre	14
I.9.2. La température des océans	14
I.9.3. La réduction de la surface des glaces océaniques arctiques.....	15
I.9.4. Le recul des glaciers continentaux	15
I.9.5. Les calottes polaires de l'antarctique et du Groenland	15

I.9.6. Le niveau moyen des océans	15
I.9.7. Les indicateurs biologiques	16
I.10. Conséquences du changement climatique sur les risques naturels	16
I.10.1. Les canicules	16
I.10.2. Les incendies	16
I.11. L'eau et le changement climatique.....	17
I.12. Impacts attendus des changements climatiques sur les ressources.....	19
I.13. Conclusion.....	19

CHAPITRE II : Les changements climatiques et les argiles

II.1. Introduction.....	20
II.2. Généralités sur les argiles	20
II.2.1. Définition et origine des argiles	20
II.2.1.1. La roche mère	21
II.2.1.2. La topographie	21
II.2.1.3. Le climat	22
II.2.2. Formation des argiles.....	23
II.2.3. Structure et minéralogie des argiles	23
II.2.3.1. Les minéraux 1/1.....	24
II.2.3.2. Les minéraux 2/1.....	25
II.2.4. Structures cristallines fondamentales des minéraux argileux.....	26
II.2.5. Structure moléculaire des argiles.....	27
II.2.6. Les types de minéraux argileux	28
II.2.6.1. La kaolinite	29
II.2.6.2. Les illites.....	29
II.2.6.3. La montmorillonite	30
II.2.7. Texture des argiles	32
II.2.8. L'eau et les minéraux argileux.....	33
II.2.8.1. La forme de l'eau	33
II.2.8.1.1. Eau liée.....	33
II.2.8.1.2. Eau libre	34
II.2.8.2. Interactions eau-argile.....	35
II.2.9. Caractéristiques minéralogiques des argiles	36
II.2.9.1. La surface spécifique (S _s).....	36
II.2.9.2. La capacité d'échange cationique (CEC).....	37
II.2.9.3. La densité de charge spécifique (σ)	38
II.3. Les dégâts que peut engendrer les sols argileux	38
II.3.1. Le phénomène de retrait-gonflement.....	38
II.3.1.1. Nature du phénomène	40
II.3.1.2. Double structure des sols gonflants	42
II.3.2. Gonflement des argiles	43
II.3.2.1. Mécanisme de gonflement des argiles	43
II.3.3. Les fissures	45
II.4. Instabilité des fondations par le phénomène de retrait-gonflement.....	46

II.5.Effet du temps sur le comportement des argiles	47
II.6. Conclusion	48

CHAPITRE III : Détermination de la dimension fractale

III.1. Introduction	49
III.2.Définition de la géométrie fractale	49
III.2.1.Origine de la géométrie fractale	49
III.2.2.Mesure de la dimension fractale	50
III.2.3.Surfaces fractales	52
III.2.4.Dimension.....	53
III.3.Application à la dimension fractale	55
III.4.Le calcul de la dimension fractale en génie civil	55
• La Méthode de comptage de boîtes (Box Counting) bidimensionnelle BC (2D)	56
• Méthode de comptage différentielle de boîtes tridimensionnelle DBC (3D).....	57
III.5. Conclusion	62

PARTIE NUMERIQUE

Chapitre IV : Identifications et les essais réalisés sur les sols étudiés

IV.1.Introduction	63
IV/1. Les résultats des essais d'identifications des sols étudiés	63
IV/1.1. Origine des matériaux utilisés	63
IV/1.2.Caractéristiques physiques et minéralogiques	64
IV/1.2.1.Caractéristiques physiques	64
• Interprétation des résultats.....	65
IV/1.2.2.Analyse des compositions minéralogiques des échantillons étudiés	66
• Interprétation des résultats.....	68
IV/1.2.3. Images au microscope électronique à balayage (MEB).....	68
• Interprétation des résultats.....	69
IV/2. Résultats des essais des effets climatiques réalisés au laboratoire	70
IV/2.1.Préparation des échantillons	70
IV/2.1.1. Échantillonnage.....	70
IV/2.2. Les essais réalisés.....	71
IV/2.2.1. Essai gel dégel	71
IV/2.2.1.1. Principe d'essai	71
IV/2.2.1.2.Déroulement d'essai	71
IV/2.2.1.3. Images des échantillons.....	72
• Interprétation des résultats des échantillons	76
IV/2.2.1.4. Les résultats obtenus	76
• Interprétation des résultats des échantillons.....	77
IV/2.2.2.Essai de Dégradabilité.....	78
IV/2.2.2.1. But de l'essai	78
IV/2.2.2.2. Le déroulement de l'essai.....	78
IV/2.2.2.3. Les images retenues des échantillons.....	78

•	Interprétation des résultats.....	83
IV/2.2.2.4.	Les résultats obtenus	83
•	Interprétation des résultats.....	83
IV/2.2.3.	Essai de canicules.....	84
IV/2.2.3.1.	Principe d`essai	84
IV/2.2.3.2.	Le déroulement de l`essai.....	84
IV/2.2.3.3.	Les images retenues des échantillons.....	84
IV/2.2.3.4.	Les résultats obtenus	86
•	Interprétation des résultats.....	87
IV.2.	Conclusion.....	87

Chapitre V : Calcul de la dimension fractale en (2D)

V.1.	Introduction	88
V.2.	Application de la méthode de Box Counting.....	88
V.3.	Résultats obtenus :	89
a)	Résultats de l`essai de Gel/ Dégel	89
b)	Résultats de l`essai de Dégradabilité.....	92
c)	Résultats de l`essai de Canicules.....	94
•	Interprétation des résultats des trois essais	96
V.4.	Conclusion	97

Chapitre VI : Calcul de la dimension Fractale en (3D)

VI.1.	Introduction	98
VI.2.	Résultats obtenus :	98
a)	Résultats de l`essai de Gel/ Dégel	98
b)	Résultats de l`essai de Dégradabilité.....	106
c)	Résultats de l`essai de Canicules.....	110
•	Interprétation des résultats des trois essais	113
V.3.	Conclusion	114

Chapitre VII :L`analyse statistique des données

VII.1.	Introduction.....	115
VII.2.	Les méthode d`analyse statistique	115
VII.2.1.	Méthode de régression linéaire	115
VII.2.1.1.	Notion de corrélation	115
VII.2.1.2.	Régression linéaire simple	116
VII.2.1.3.	Droite de régression	116
VII.2.1.4.	Test sur le modèle de régression linéaire	116
VII.2.1.5.	Coefficient de détermination R^2	117
VII.2.1.6.	Résultats de larégression linaire entre 2D et 3D et la masse	124
VII.2.2.	Analyse en composantes principales	125
VII.2.2.1.	Principe de l`ACP	126
VII.2.2.2.	Résultats de l`ACP.....	126

• Interprétation	127
VII.3. Conclusion	129
CONCLUSION GENERALE	130
Références bibliographiques	
Annexe A	
Annexe B	

REMERCEMENTS

*Il est primordial de remercier«**dieu**» de m'avoir donné le courage, la patience et la santé qui m'ont été utiles tout au long de mon parcours pour réaliser ce modeste travail.*

*Je tiens d'abord à exprimer toute ma gratitude à ma promotrice **Madame BOUZEBODJA Aldjia** pour m'avoir proposé ce sujet et suivi fidèlement mon parcours, pour ses remarques judicieuses et constructives qui ont contribué à l'amélioration de ce mémoire, ainsi que pour ses qualités pédagogiques et l'enthousiasme communicatif dont il a su faire preuve. C'est à la fois un privilège et une expérience exceptionnelle d'avoir pu bénéficier de ses conseils qui m'ont guidé et me guideront encore les années à venir, que Dieu la protège.*

Je tiens également à remercier,Mr MELBOUCI Bachir, Professeur à l'Université (U.M.M.T.O), d'avoir accepté de présider le jury de soutenance du présent mémoire.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Mr BOUDLAL Omar MCA à l'UMMTO d'avoir accepté d'examiner mon travail.

J'exprime mes vifs remerciements à tous les enseignants du département de Génie Civil de l'université MOULOUD MAMMARI de TIZI-OUZOU pour leur aide, leur encouragement et leur conseil tout au long de mon cursus universitaire, qu'ils puissent trouver ici l'expression de mon profond respect.

Je remercie mes parents, mes frères et mes sœurs pour leur soutien et leur encouragement.

Mes sentiments de reconnaissance vont également à l'encontre de toute personne qui a participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Je remercie toute mes copines sans exception (surtout dyhia, ouafia,sara, dadi) d'avoir été à mes côtés durant cette année.

Je remercie mes camarades de ma promotion pour les sympathiques moments qu'on a passés ensemble.





Dédicace

Je dédie ce lapidaire travail :

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

**A mes très chers frères (ahmed etyakhlaf).*

**A mes très chères sœurs (dhaouia ettinhinane).*

**A ma chère grande mère (rachda)et mes tentes (sa3ida ethouria).*

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

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

LISTE DES SYMBOLES

Notation	Définition
W	Teneur en eau (%).
W_L	Limite de liquidité (%).
W_P	Limite de plasticité (%).
I_P	Indice de plasticité (%).
I_C	Indice de consistance (%).
A_C	Activité de Skempton
ρ_s	La masse volumique des particules solides (g/cm ³).
VBS	La valeur de bleu de sol
DF_R	Dimension fractale de rugosité
DF	Dimension fractale
ACP	Analyse en Composante Principale
R	Coefficient de corrélation
p-value	La probabilité pour un modèle statistique donnée sous l'hypothèse nulle
vM	La valeur de la masse des échantillons durant les essais
v12D	La valeur de la variation de la dimension fractale en 2D
v23D	La valeur de la variation de la dimension fractale en 3D
T	La température appliqué durant les essais
C.V	Argile de site de centre-ville de Tizi-Ouzou (passé par les conditions initiales de chaque essai).
C.V.N	Argile de site de Centre-Ville de Tizi-Ouzou (sans étuvage).

Listes des figures

CHAPITRE I :

FigureI.1: Les composantes du système climatique.....	3	
FigureI.2: LES TYPES DE CLIMATS.....	4	
FigureI.3: Valeurs climatiques en 2020 à Tizi-ouzou.....	7	
FigureI.4: Wilaya de Tizi-Ouzou.....	8	
FigureI.5: Global surface température relative de 1880 à 1920.....	99	
FigureI.6: Les principaux éléments de la climatologie.....	10	10
FigureI.7: Les changements de température et des précipitations moyennes, de 1950 à 2011.....	11	
FigureI.8: Simulations et les observations du climat en 1958.....	12	
FigureI.9: Processus de l'effet de serre.....	13	
FigureI.10: Emission de Gaz à effet de serra.....	14	14
FigureI.11: Schéma qui indique l'effet du changement climatique prévu pour 2050 à 2100.....	17	
FigureI.12: Photo sur les glaciers de montagne.....	18	

CHAPITRE II :

FigureII.1: Massifs naturels argileux.....	20	
FigureII.2: Types de phyllosilicates formés au cours de l'altération.....	22	
FigureII.3: Structure de la bentonite à différentes échelles.....	23	
FigureII.4: Structure de base des phylosilicates.....	24	
FigureII.5: Assemblage d'une couche octaédrique et d'une couche tétraédrique pour une argile TOT(1:1).....	25	
FigureII.6: Assemblage d'une couche octaédrique et deux couches tétraédriques pour une argile TOT(2:1).....	25	
FigureII.7: a) Tétraèdre de silice; b) feuillet de silice en tétraèdre.....	26	
FigureII.8: a) octaèdre d'aluminium(ou de magnésium); b) vue isométrique d'un feuillet en octaèdre.....	27	
FigureII.9: Structure des argiles.....	27	
FigureII.10: Cristaux des particules de kaolinite vus au microscope électronique à balayage.....	29	
FigureII.11: Cristaux des particules d'Illite vus au microscope électronique à balayage.....	30	
FigureII.12: Vue microscopique au MEB de la montmorillonite et arrangement des feuillets.....	31	
FigureII.13: Cristaux de chlorite vu au microscope électronique à balayage.....	31	

Listes des figures

FigureII.14: Photographie MEB de texture matricielle (a : Argile Verte de Romainville) et texture agrégé (b : Argile de Bavent)	33
FigureII.15: Gonflement et hydratation du matériau argileux	34
FigureII.16: Liaisons possibles de l'eau inter foliaire	36
FigureII.17: Mécanisme d'adsorption de l'eau sur les surfaces argileuses a) par osmose, b)Attraction dipolaire	39
FigureII.18: Fissure sur les murs et Fissures diagonales	39
FigureII.19: Risque à prendre en compte lors de la construction	39
FigureII.20: Formes de fissuration Sur des Bâtiments Reposant sur des terrains gonflants	39
FigureII.21: Formes de Dégâts Sur des Bâtiments Reposant sur des terrains gonflants	39
FigureII.22: Dégradation des routes	40
FigureII.23: Dégradation de la route RN15, village Soumer.....	40
FigureII.24: Vue d'une maison individuelle soumise à des phénomènes de retrait-gonflement.....	40
FigureII.25: Schéma simplifié de deux sources de désordre sur une maison construite dans fondations suffisantes sur un sol argileux	40
FigureII.26: Désordres de la structure au cours des périodes de sécheresse (Région bordelaise)	41
FigureII.27: Structure des sols gonflants	43
FigureII.28: Représentation schématique de la double couche diffuse	44
FigureII.29: Schéma de mécanisme de gonflement - retrait des argiles	45
FigureII.30: Conséquence du gonflement des argiles dans la déstructuration d'un sol	46
FigureII.31: Développement des fissures	46
FigureII.32: Phénomène de retrait-gonflement.....	46
CHAPITRE III :	
FigureIII.1: Classification de surfaces fractales en trois catégories	52
FigureIII.2: La rugosité de la surface augmente avec la croissance de la dimension fractale, A($D \approx 2$), B($D \approx 2.1$), C($D \approx 2.3$), D($D \approx 2.5$), E($D \approx 2.8$).....	54
Figure III.3: Une fractale 3D et sa projection 2D	54
Figure III.4 : Le triangle de Sierpinsky.....	55
Figure III.5 : L'éponge de Menger	55
Figure III.6: Différentes étapes de maillage de l'image du grain et illustration de la méthode de Box Counting	57

Listes des figures

Figure III.7 : Technique de Comptage Différentiel de Boîtes (CDB)	58
Figure III.8 : Deux pixels appartenant à deux cubes différents d'altitude 3 alors que leur distance suivant (oz) est inférieure à 3	60
Figure III.9 : Nombre N_s de cubes qui couvre l'image	61
CHAPITRE IV :	
FigureIV.1 :Classification des sols étudiés dans l'abaque de Casagrande.....	66
FigureIV.2 : Diffractogramme aux rayons X de l'échantillon d'Azazga	66
FigureIV.3 :Diffractogramme aux rayons X de l'échantillon de Tigzirt.....	77
Figure IV.4 :Diffractogramme aux rayons X de l'échantillon de C.V (Ech Compacté)	77
Figure IV.5 : Image au MEB réalisé pour un échantillon extrait de Fréha	69
Figure IV.6 : Image au MEB réalisé pour un échantillon de Centre ville de Tizi-Ouzou	69
Figure IV.7 : Préparation des échantillons	70
Figure IV.8 : Les images de l'échantillon N°01 d'Azazga à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.....	72
Figure IV.9 : Les images de l'échantillon N°01 de Tigzirt à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.....	73
Figure IV.10 : Les images de l'échantillon N°01 de C.V. compacté à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique	74
Figure IV.11 : Les images de l'échantillon N°1 de Freha à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.....	75
Figure IV.12 : Les images de l'échantillon de (C.V.N) à état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.....	76
Figure IV.13 : Variation de la masse des échantillons au cours d'essai. Gel/Dégel	77
Figure IV.14 : Variation de la masse des deux échantillons d'argile à l'état naturel.....	77
Figure IV.15 : Images de l'échantillon d'argile d'Azazga pendant l'essai de Dégradabilité, à l'état naturel et après chaque cycle	78
Figure IV.16 : Images de l'échantillon d'argile de Tigzirt pendant l'essai de Dégradabilité, à l'état naturel et après chaque cycle	79
Figure IV.17 : 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	80
Figure IV.18 : Images de l'échantillon N°1 d'argile de centre-ville (C.V) pendant l'essai de Dégradabilité, à l'état naturel et après chaque cycle	81
Figure IV.19 : Image de l'échantillon N°1 d'argile de Fréha (F) pendant l'essai de Dégradabilité, à l'état naturel et après chaque cycle	82

Listes des figures

Figure IV.20 : Variation de la masse des échantillons au cours de l'essai de Dégradabilité	83
Figure IV.21 : Images de l'échantillon d'argile N°01 d'Azazga pendant l'essai de canicule	84
Figure IV.22 : Images de l'échantillon d'argile N°1 de Tizirt pendant l'essai de canicules	85
Figure IV.23 : Images de l'échantillon d'argile N°01 de C.V compacté pendant l'essai de canicules	86
Figure IV.24 : Variation de la masse des échantillons pendant l'essai de canicules	87
CHAPITRE V :	
FigureV.1: Exemple du calcul de la DFR par le logiciel MATLAB R2009b.....	89
FigureV.2: Variation de la dimension fractale en fonction des etapes de l'essai pour les l'échantillons N°1 et N°2, d'Azazga respectivement.....	90
FigureV.3: Résultats du calcul de la dimension fractale pour les échantillons Azazga.N et N°1 Tizirt, respectivement.....	90
FigureV.4: Variation de la dimension fractale en fonction des etapes de l'essai pour les l'échantillons N°2 Tizirt et Tizirt.N, respectivement	90
FigureV.5: Variation de la dimension fractale en fonction des etapes de l'essai pour l'échantillons N°01et N°2 de centre-ville, respectivement	91
FigureV.6: Résultats du calcul de la dimension fractale pour les échantillons C.V.N.Compacté et N°1 F, respectivement.....	91
FigureV.7: Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillons N°02 de F et N°3 de F.N, respectivement	91
FigureV.8: Variation de la dimension fractale en fonction des etapes de l'essai pour l'échantillons N°01 de C.V et N°2 de C.V, respectivement.....	92
FigureV.9: Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon N°03 C.V.N	92
FigureV.10: Variation de la dimension fractale des échantillons d'Azazga et de Tizirt , respectivement, en fonction des cycles de Dégradabilité	93
FigureV.11: Variation de la dimension fractale des échantillons C.V.Compacté et N°1 de C.V, respectivement, en fonction des cycles de Dégradabilité	93
FigureV.12: Variation de la dimension fractale des échantillons N°2 de C.V et N°1 de F, respectivement, en fonction des cycles de Dégradabilité	93
FigureV.13: Variation de la dimension fractale de l'échantillon N°2 de F en fonction des cycles climatiques de l'essai Dégradabilité	94
FigureV.14: Variation de la dimension fractale des échantillons N°01 et N°02 d'Azazga, respectivement, en fonction des cycles de canicules.....	95

Listes des figures

FigureV.15: Variation de la dimension fractale des échantillons N°01 et N°02 de Tizirt, respectivement, en fonction des cycles de canicules.....	95
FigureV.16: Variation de la dimension fractale des échantillons N°1 et N°2 de C.V.Compacté, respectivement, en fonction des cycles de canicules	95
CHAPITRE VI:	
FigureVI.1: Variation de la dimension fractale en fonction des Etapes de l'essai pour l'échantillon N°1 d'Azazga	99
FigureVI.2: Variation de la dimension fractale en fonction des Etapes de l'essai pour l'échantillon N°02 d'Azazga	99
FigureVI.3: Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile Témoin Azazga.N	100
FigureVI.4: Variation de la dimension fractale en fonction des Etapes de l'essai pour l'échantillon N°01 Tizirt.....	100
FigureVI.5: Variation de la dimension fractale en fonction des Etapes de l'essai pour l'échantillon N°02 Tizirt.....	101
FigureVI.6: Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile Témoin Tizirt.N	101
FigureVI.7: Variation de la dimension fractale en fonction des Etapes de l'essai pour l'échantillon N°01 de centre ville.....	102
FigureVI.8: Variation de la dimension fractale en fonction des Etapes de l'essai pour l'échantillon N°02 centre ville.....	102
FigureVI.9: Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile Témoin C.V.N.Compacté	103
FigureVI.10: Variation de la dimension fractale en fonction des Etapes de l'essai pour l'échantillon N°1 de F	103
FigureVI.11: Variation de la dimension fractale en fonction des Etapes de l'essai pour l'échantillon N°2 de F	104
FigureVI.12: Variation de la dimension fractale en fonction des Etapes de l'essai pour l'échantillon N°3 de F.N.....	104
FigureVI.13: Variation de la dimension fractale en fonction des Etapes de l'essai pour l'échantillon N°1 de C.V	105
FigureVI.14: Variation de la dimension fractale en fonction des Etapes de l'essai de pour l'échantillon N°2 de C.V	105
FigureVI.15: Variation de la dimension fractale en fonction des Etapes de l'essai pour l'échantillon N°3 de C.V.N	106

Listes des figures

FigureVI.16: Variation de la dimension fractale de l'échantillon d'Azazga en fonction des cycles de Dégradabilité.....	106
FigureVI.17: Variation de la dimension fractale de l'échantillon de Tizirt en fonction des cycles de Dégradabilité.....	107
FigureVI.18: Variation de la dimension fractale de l'échantillon de C.V.Compacté en fonction des cycles de Dégradabilité	107
FigureVI.19: Variation de la dimension fractale de l'échantillon N°1 de C.V en fonction des cycles de Dégradabilité	108
FigureVI.20: Variation de la dimension fractale de l'échantillon N°2 de C.V en fonction des cycles de Dégradabilité	108
FigureVI.21: Variation de la dimension fractale de l'échantillon N°1 de F en fonction des cycles de Dégradabilité.....	109
FigureVI.22: Variation de la dimension fractale en fonction des cycles climatiques de l'essai Dégradabilité de l'échantillon N°2 de Fr	109
FigureVI.23: Variation de la dimension fractale de l'échantillon de l'argile N°01 d'Azazga en fonction des cycles de Canicules.....	110
FigureVI.24: Variation de la dimension fractale de l'échantillon de l'argile N°02 d'Azazga en fonction des cycles de Canicules.....	110
FigureVI.25: Variation de la dimension fractale de l'échantillon de l'argile N°01 de Tizirt en fonction des cycles de Canicules	111
FigureVI.26: Variation de la dimension fractale de l'échantillon de l'argile N°02 de Tizirt en fonction des cycles de Canicules	111
FigureVI.27: Variation de la dimension fractale de l'échantillon de l'argile C.V.Compacté N°01 de en fonction des cycles de Canicules.....	112
FigureVI.28: Variation de la dimension fractale de l'échantillon de l'argile C.V.Compacté N°02 de en fonction des cycles de Canicules.....	112
CHAPITRE VII :	
FigureVII.1: La droite de la régression linéaire.....	125
FigureVII.2: Graphe des variablesdonné par l'AC	128
FigureVII.3: Graphe des individusdonné par l'ACP	128

Liste des tableaux

CHAPITRE I :

Tableau I.1: Valeurs climatiques moyennes et totales annuelles.....	6
--	---

CHAPITRE II :

Tableau II.1: Minéraux argileux	32
--	----

Tableau II.2: Quelques données sur les minéraux argileux	37
---	----

Tableau II.3: Caractéristiques des argiles	38
---	----

CHAPITRE IV:

Tableau IV.1: Résultats finals des expériences pour les déférentes échantillons	64
--	----

Tableau IV.2: La composition minéralogique estimative semi-quantitative	68
--	----

Tableau IV.3: Variation de la masse des échantillons avant et après l'essai Gel/Dégel.....	76
---	----

Tableau IV.4: Variation de la masse de l'argile C.V.N et F.N pendant l'essai	77
---	----

Tableau IV.5: Variation de la masse d'argile des échantillons au cours de l'essai.....	83
---	----

Tableau IV.6 : Variation de la masse des échantillons pendant l'essai de canicules.....	86
--	----

CHAPITRE V :

Tableau V.1: Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile d'Azazga N°01.....	89
---	----

Tableau V.2: Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile d'Azazga.....	92
--	----

Tableau V.3: Variation de la dimension fractale en fonction les cycles pour l'argile F.N°2	94
---	----

Tableau V.4: Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile d'Azazga N°01	94
--	----

CHAPITRE VI:

Tableau VI.1: Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile Azazga N°01.....	98
--	----

Tableau VI.2: Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile Azazga N°02.....	99
--	----

Tableau VI.3: Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile témoin Azazga.N.....	99
--	----

Tableau VI.4: Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile de Tizirt. N°1	100
--	-----

Tableau VI.5: Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile de Tizirt. N°02.....	100
--	-----

Tableau VI.6: Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile témoin Tizirt.N.....	101
--	-----

Tableau VI.7: Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile de Centre Ville. N°01	101
---	-----

Tableau VI.8: Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile de centre ville. N°02...	102
--	-----

Tableau VI.9: Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile témoin C.V.N.Compacté.....	102
---	-----

Tableau VI.10: Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile F. N°1	103
---	-----

Tableau VI.11: Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile F. N°2	103
---	-----

Tableau VI.12: Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile F.N N°3	104
--	-----

Tableau VI.13: Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile C.V, N°1	104
---	-----

Tableau VI.14: Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile C.V, N°2.....	105
--	-----

Liste des tableaux

TableauVI.15: Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile C.V.N N°3	105
TableauVI.16: Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile d'Azazga	106
TableauVI.17: Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile de Tigzirt.....	106
TableauVI.18: Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile de C.V.Compacté.....	107
TableauVI.19: Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile C.V N°1	108
TableauVI.20: Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile C.V N°2	108
TableauVI.21: Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile F. N°1.....	109
TableauVI.22: Variation de la dimension fractale en fonction les cycles pour l'argile F.N°2....	109
TableauVI.23: Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile d'Azazga N°01.....	110
TableauVI.24: Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile d'Azazga N°02.....	110
TableauVI.25: Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile de Tigzirt N°01	111
TableauVI.26: Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile de Tigzirt N°02	111
TableauVI.27: Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile de Centre Ville N°01...	112
TableauVI.28: Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile deCentre Ville N°02....	112
CHAPITRE VII :	
TableauVII.1 : Les valeurs du calcul de l'analyse statistique.....	116

INTRODUCTION GENERALE

L'optique d'un éventuel changement climatique fait aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches scientifiques. Le changement climatique est un défi global qui exige une réponse mondiale. Le réchauffement climatique et ses variations régionales vont avoir un certain nombre de conséquences physiques sur l'environnement. Plusieurs de ces conséquences concernent le cycle des eaux, océans, glaciers, nuages et pluies. Plus personne n'ignore la problématique du changement climatique, Canicule en été, hiver sans neige, dérèglement du climat, des inondations et de terribles sécheresses, le changement climatique se manifeste sous des formes diverses.

L'Algérie est l'une des régions les plus vulnérables face aux impacts et changement climatique au cours du 21^{ème} siècle. Elle reste une région touchée par ces changements climatiques et catastrophes naturelles. Cependant les résultats des études effectuées par Djellouli et Daget, (1993) ont montré que depuis 1881, l'Algérie a subi deux périodes de sécheresse : la pénurie a été ressentie de 1943 à 1948 qui avait une répercussion importante sur la récolte et le bétail, et la deuxième est celle que nous subissons depuis 1980. Cette sécheresse a été suivie par de nombreuses inondations qui ont été marquées sur tout le territoire algérien.

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

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

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

étude numérique.

La première partie est bibliographique et composée de trois chapitres ;

Le premier chapitre présente des généralités sur les problèmes des changements climatiques.

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

Le troisième chapitre est consacré à la définition des fractales, leur dimension et son utilisation.

La deuxième partie est numérique, elle est composée de quatre chapitres :

Le quatrième chapitre est consacré pour une synthèse ; les types des matériaux, leur localisation, les résultats des essais d'identification des échantillons et les essais climatiques (Gel-dégel, Dégradabilité et cycles de canicules) les résultats obtenus et leur interprétation.

Le cinquième chapitre porte sur les résultats du calcul de la dimension fractale en (2D) avec le logiciel MATLAB 2009, par les images prises pour les échantillons durant les essais. Ce qui nous a permis de faire une comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par la méthode analytique.

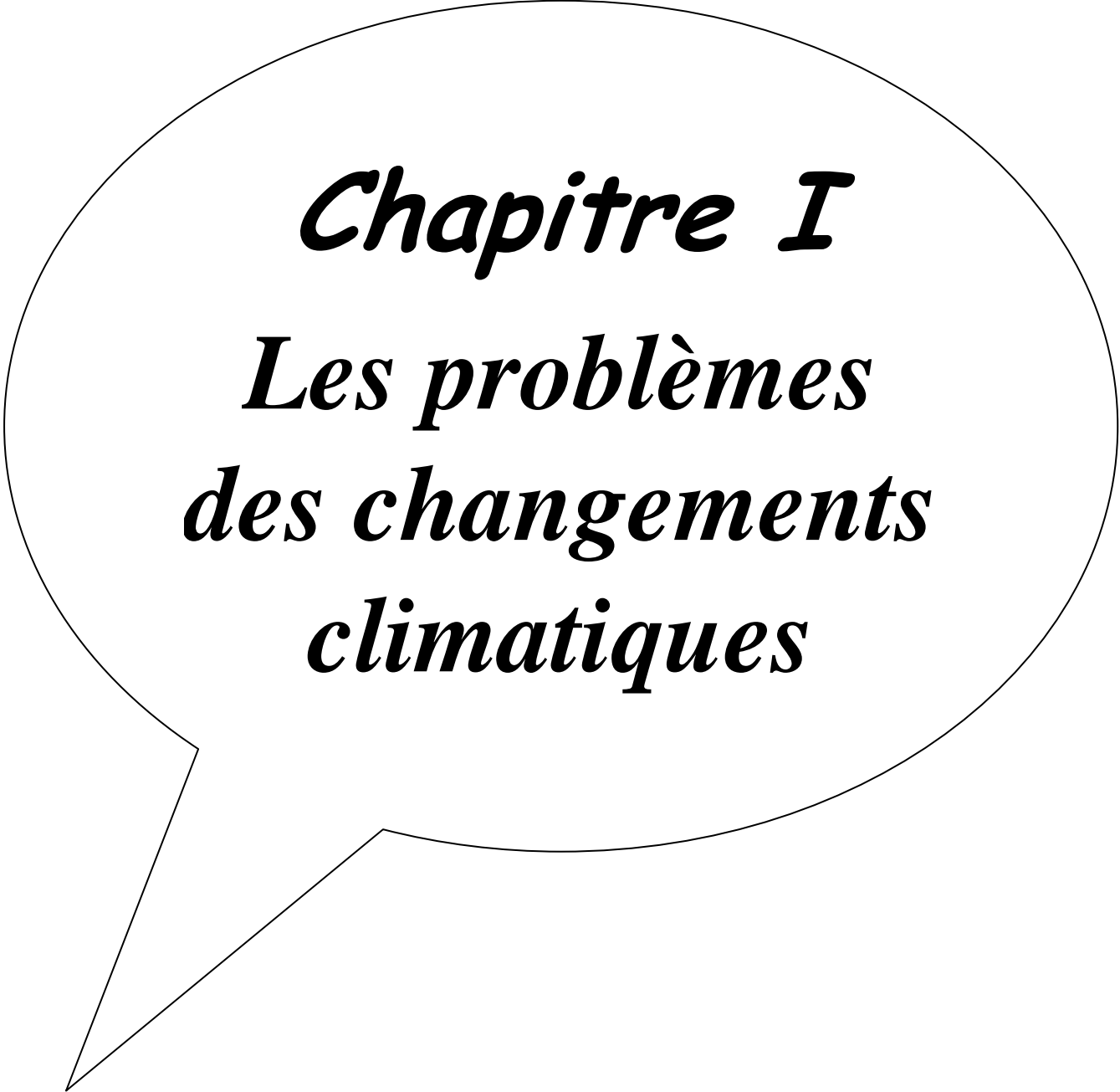
Le sixième chapitre porte sur la détermination de la dimension fractale en (3D) avec le logiciel MATLAB 2015, pour les images prises pour les échantillons durant les essais.

Le septième chapitre présente une analyse statistique pour les données de la dimension fractale calculées avec le logiciel R, Ce qui nous a permis de faire une comparaison entre les résultats obtenus par la méthode en (2D) et ceux obtenus par la méthode (3D).

Enfin, les deux annexes ont été organisées comme suit :

ANNEXE A représente des images des échantillons prises durant les essais climatiques (gel-dégel ; dégradabilité et Canicules).

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



Chapitre I
Les problèmes
des changements
climatiques

I.1 Introduction

Les changements climatiques ont depuis longtemps cessé d'être une curiosité scientifique. Ils constituent la question environnementale majeure qui domine notre vie. A la fin de ce siècle, le changement climatique est devenu l'un des sujets d'actualité, on lit souvent dans la presse les titres comme : "Le climat change-t-il" ? "La terre se réchauffera telle"?,etc.(Khoualdia.W,2014).Les changements climatiques désignent de lentes variations des caractéristiques climatiques, en un endroit donné au cours de temps. En effet ces changements observés de nos jours constituent des défis auxquels l'humanité a et aura à faire face (GIEC, 2001 et Wood, 2008).

I.2 Le climat

Le climat correspond à la distribution statistique des conditions atmosphériques dans une région donnée pendant une période donnée. Il est effectué à l'aide de valeurs moyennes établies à partir de mesures statistiques, mensuelles et annuelles, ainsi que sur la base des données atmosphériques locales: température, précipitations, ensoleillement, humidité, vitesse du vent.

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

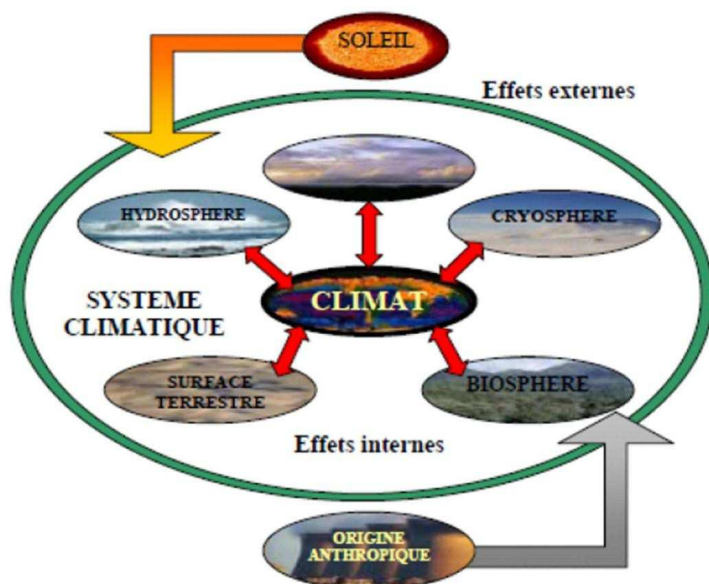


Figure I.1 : Les composantes du système climatique (Mazar. A,2014).

I.3 Classification climatique

I.3.1 Le climat tropical humide présent de part et d'autre de l'équateur, La température mensuelle moyenne est toute l'année au-dessus de 18° C. On distingue une saison sèche et une saison humide.

I.3.2 Le climat subtropicaux offre un ressenti agréable (douceur, ensoleillement), mais il est aussi sujets à des phénomènes brutaux (orages, inondations, tempêtes tropicales, cyclones). Ils prennent en compte le climat méditerranéen, réputé pour ses étés secs et chauds ainsi que pour ses hivers doux et humides.

I.3.3 Le climat tempéré également en ligne de compte. Ces climats sont en général caractérisés par les saisons tempérées : une saison froide et une saison chaude. il comprend le climat océanique ou la température varie entre 3 et 18 degrés et le climat continental caractériser par un été court et chaud et un hiver longs et froids. La température moyenne se situe autour de -9° C et 18° C.

I.3.4 Le climat polaire, les plus froids du monde. Il s'étend surtout sur les régions de l'Arctique et de l'Antarctique ainsi que dans le Grand Nord québécois, les Territoires du Nord-Ouest et au nord de la C.E.I. (ancienne URSS). Les températures moyennes de janvier sont de -34° C et celles de juillet de 4° C. Les précipitations sont très rares et le sol est toujours gelé en profondeur. On l'appelle d'ailleurs pergélisol.

I.3.5 Le climat désertique, que l'on trouve dans certaines régions de l'Afrique, du Nord de l'Océanie, du Sud de l'Eurasie et du Sud-ouest des États-Unis. Le temps y est très sec et chaud. Il y a, par contre, de très grandes différences de températures entre le jour et la nuit les températures moyennes de ces régions sont variées de 28° C à 11° C.

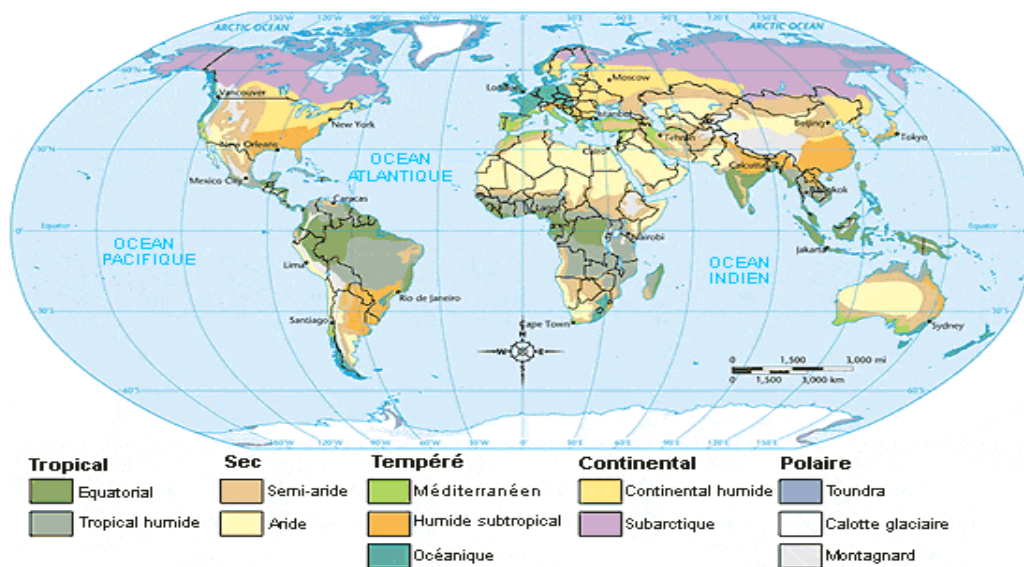


Figure I.2 : Les types de climats (la. climatologie.free.fr).

I.4 Le climat en Algérie

Les aires climatiques sont très diversifiées et le climat varie du type méditerranéen au type saharien. Au nord, les hivers sont pluvieux et froids, les étés chauds et secs. Le climat, le long de la côte, est adouci par la présence de la mer.

L'Est algérien est une région plus pluvieuse que l'Ouest, avec ses 2 mètres de pluie par an et des sommets enneigés d'octobre à juillet.

Le pied sud de l'Atlas tellien marque la limite du climat aride : sec et tropical, avec de grands écarts de températures en hiver : la température moyenne est de 36°C le jour et 5°C la nuit (http://www.khaoula.com/algerie_climat.htm, le 14/05/2014).

I.4.1 : Le Nord, un pays de hautes terres

Le Nord de l'Algérie est essentiellement méditerranéen avec un contrepoids continental, dû au barrage opposé par les chaînons côtiers aux influences maritimes. La combinaison des traits méditerranéens avec les caractéristiques continentales se développe d'avantage au fur et à mesure que l'on avance à l'intérieur des hautes terres. L'hiver y est alors rigoureux et l'été chaud et sec.

Les pluies insuffisantes et irrégulièrement réparties sont absentes en été et assez fréquentes en hiver dans le Tell, et au printemps dans les hauts plateaux. Elles sont abondantes dans le Tell oriental et dans les hautes plaines constantinoises, tandis qu'elle est plus rare au sud des Aurès, et dans les hautes plaines oranaises (http://www.khaoula.com/algerie_climat.htm, le 14/05/2014).

I.4.2 : Le Sud, un désert dominé par le Hoggar

La région est connue par ses précipitations inférieures à 1500 mm par an et les températures très élevées le jour et très basses la nuit (0°) et l'aridité des sols est extrême (http://www.khaoula.com/algerie_climat.htm, le 14/05/2014).

I.5 Le climat en Tizi-Ouzou

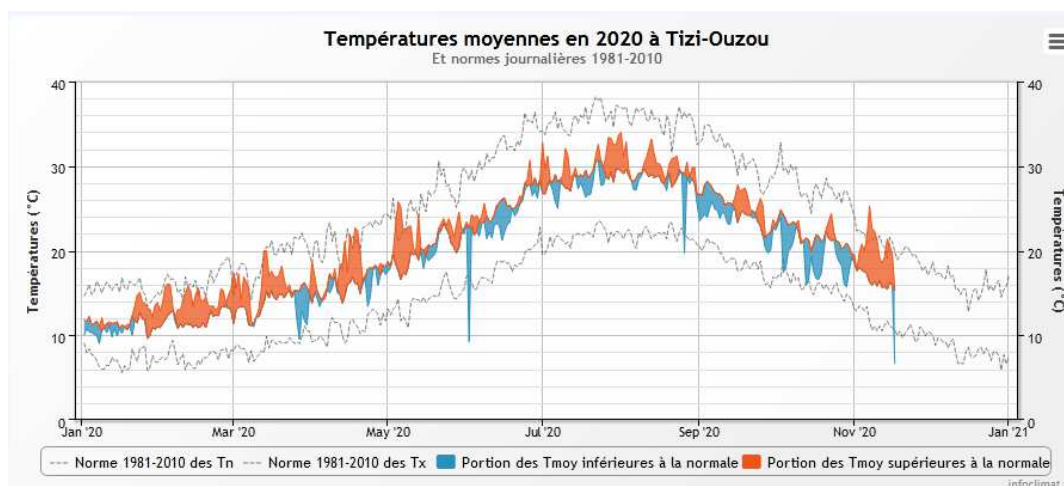
Tizi-Ouzou se situe dans la zone du climat méditerranéen. En raison des massifs montagneux qui entourent la ville, il neige chaque année en hiver entre décembre pour les hautes altitudes (600 m et plus), et en février pour les basses altitudes. En été, la chaleur peut être suffocante car l'air marin se heurte au relief montagneux qui l'empêche d'atteindre la ville.

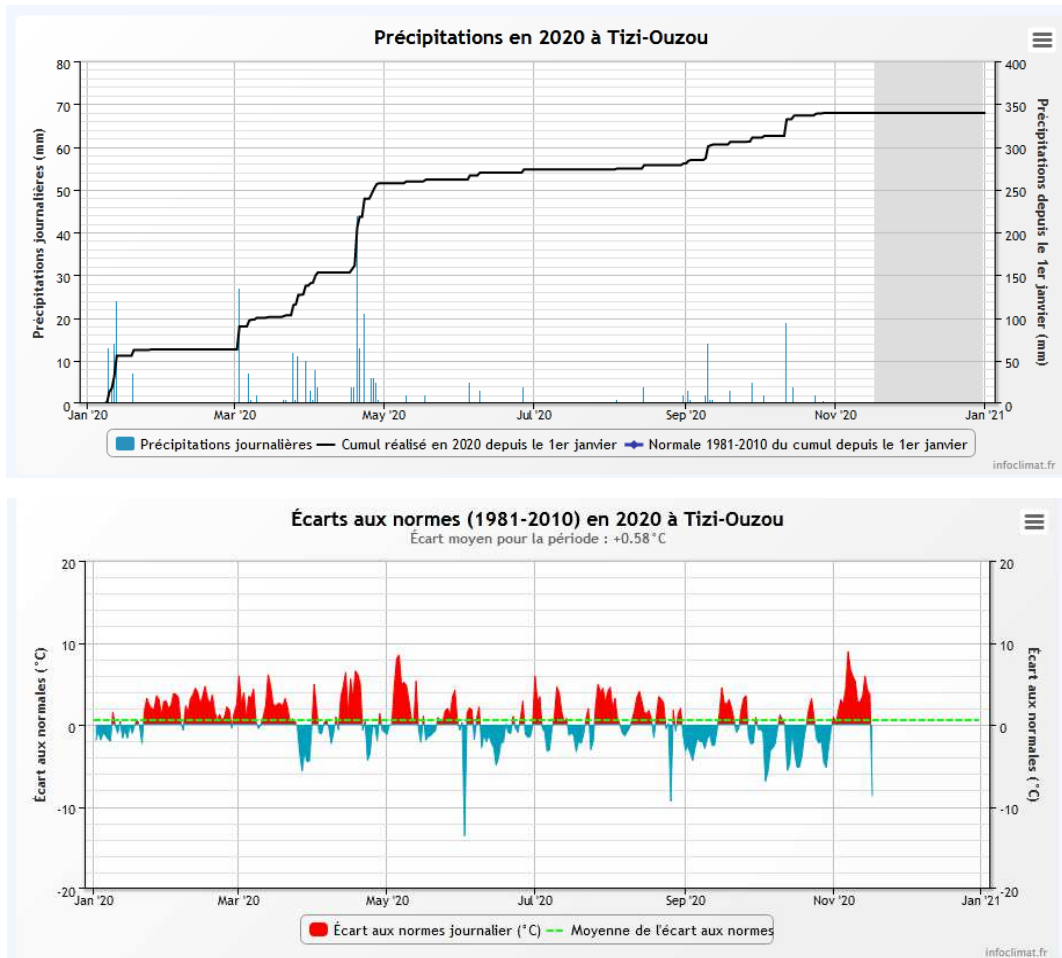
La ville de Tizi Ouzou bénéficie d'un climat tempéré chaud. A Tizi Ouzou, les précipitations sont plus importantes en hiver qu'en été. Selon la classification de

KoppenGeiger, 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 I.1: Valeurs climatiques moyennes et totales annuelles

Année	T	TM	Tm	PP	V	RA	SN	TS	FG	TN	GR
<u>2004</u>	18.3	24.8	13.6	748.83	6.6	79	1	15	15	0	1
<u>2006</u>	19.2	25.9	14.1	667.04	7.3	71	0	13	6	0	0
<u>2007</u>	18.2	24.4	13.5	1125.25	5.6	79	0	23	13	0	1
<u>2008</u>	18.2	24.7	13.3	648.74	5.0	72	1	12	11	0	1
<u>2009</u>	18.6	25.0	13.6	1017.77	4.5	85	0	23	10	0	1
<u>2010</u>	18.2	24.5	13.2	778.83	-	104	0	15	8	0	1
<u>2011</u>	18.6	25.2	13.8	852.94	-	87	0	15	12	0	1
<u>2012</u>	18.6	25.4	13.6	748.02	-	77	4	7	9	0	0
<u>2013</u>	18.0	24.2	13.3	1053.58	4.7	94	0	17	9	0	1
<u>2014</u>	19.1	25.6	14.0	777.24	0.1	65	0	16	9	0	0
<u>2015</u>	19.0	25.5	13.9	694.45	3.7	64	0	14	3	0	0
<u>2016</u>	19.2	25.3	13.7	700.78	7.7	63	0	18	11	0	0
<u>2017</u>	20.6	25.0	13.7	671.35	9.1	47	0	9	10	0	0
<u>2018</u>	-	-	-	-	-	67	0	8	12	0	0
<u>2019</u>	20.1	24.1	13.9	723.59	8.7	48	0	8	2	0	0





FigureI.3 : Valeurs climatiques en 2020 à Tizi-ouzou.

Interprétation des valeurs climatiques moyennes annuelles

T Température moyenne annuelle

TM Température maximale moyenne annuelle

Tm Température minimale moyenne annuelle

PP Précipitation totale annuelle de pluie et/ou neige fondue (mm)

V Vitesse moyenne annuelle du vent (Km/h)

RA Total jours de pluie durant l'année

SN Total jours de neige durant l'année

TS Total jours de tempête durant l'année

FG Total jours de brouillard durant l'année

TN Total jours de tornades ou nuages en entonnoir durant l'année

GR Total jours de grêle durant l'année

(Climat Tizi-Ouzou-données climatique (603950).mhtml) ; (Climatologie de l'année 2020 à Tizi-Ouzou - Infoclimat.html (DZ)).

I.5.1 Situation géographiques de Tizi-Ouzou

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

La Wilaya de Tizi Ouzou est limitée par :

- La mer méditerranée au Nord
- La wilaya de Bouira au sud
- La wilaya de Boumerdes à l'ouest
- La wilaya de Bejaia à l'est.



Figure I.4 : wilaya de Tizi-Ouzou.

I.6 Analyse climatique

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

A l'échelle globale, on a déjà noté :

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

Plus particulièrement, les années entre (1995 et 2006) sont les années les plus chaudes jamais enregistrées depuis que les températures de la surface du globe sont mesurées (1850) (Source:PDF Lucie Vincent et Enric Aguilar).

L'année 2019 s'avère être la deuxième année la plus chaude dans les enregistrements thermométriques, donc depuis 1880. Les années les plus chaudes de la série sont toutes postérieures à 2000 (Climat _ en 1988, 2020 était bien prédit – {Sciences²}.mhtml. Le Monde.fr).

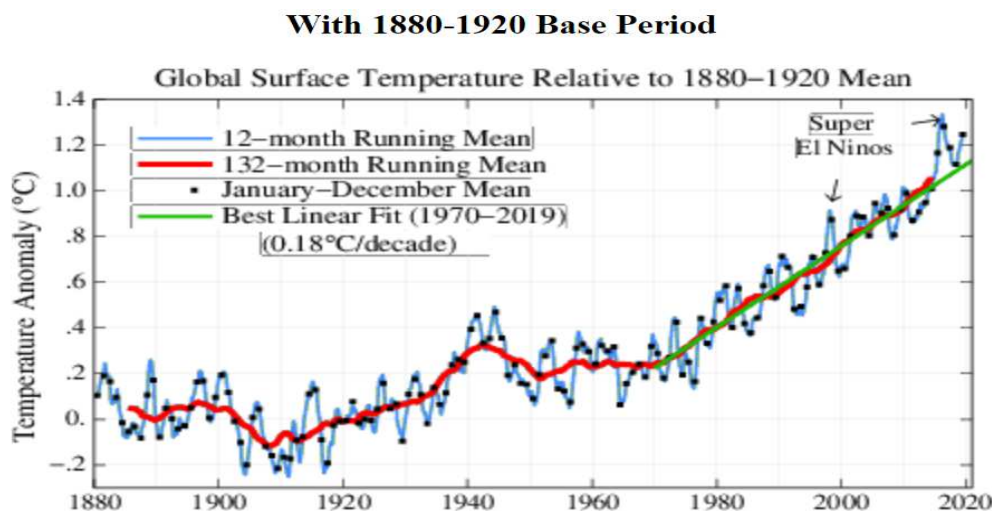


Figure I.5 : Global surface température relative de 1880 à 2020 (Climat _ en 1988, 2020 était bien prédit – {Sciences²}.mhtml. Le Monde.fr).

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

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

I.7 Les tendances des paramètres climatiques en particulier l'évaporation, la précipitation, l'humidité et la température

I.7.1 Précipitation

Les tendances des précipitations sur les terres ont été analysées grâce à plusieurs ensembles de données provenant du Réseau mondial, de données climatologiques

anciennes, du Centre mondial de climatologie, des précipitations et de l'Unité de recherche climatologique. Les précipitations sur les terres ont généralement augmenté durant le XXe siècle entre 30°N et 85°N ; néanmoins, des baisses importantes se sont produites au cours de ces 30 à 40 dernières années entre 10°S et 30°N.

Les diminutions de la salinité dans l'Atlantique Nord et au sud de 25°S suggèrent de changements identiques des précipitations au-dessus de l'océan. Les précipitations ont sensiblement augmenté entre 1900 et les années 1950, entre 10°N et 30°N, mais elles ont diminué après 1970.

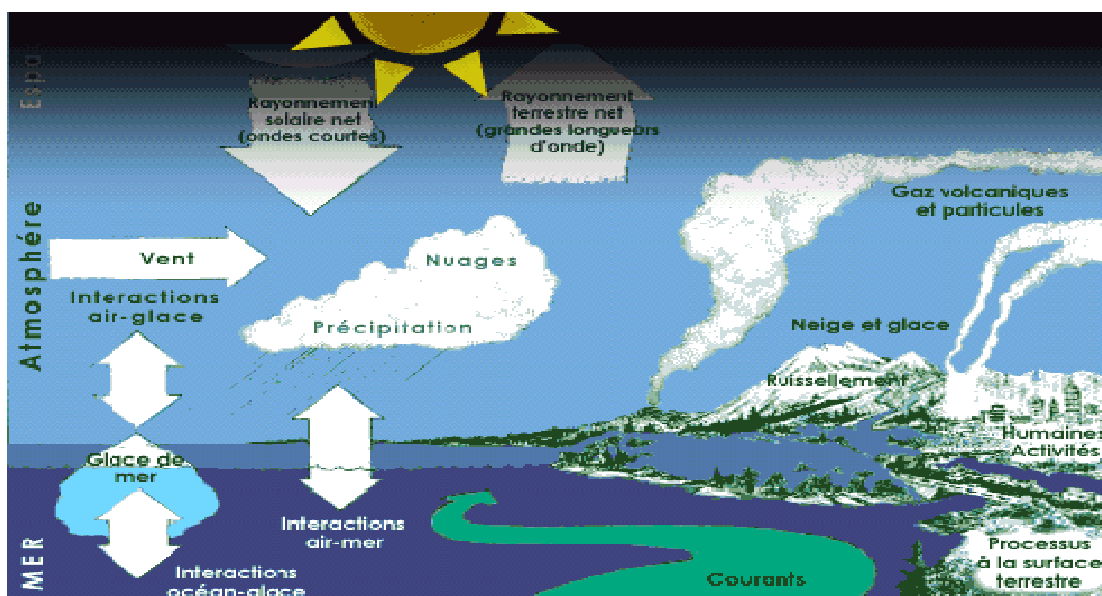


Figure I.6 : Les principaux éléments de la climatologie (Source: El Niño ou La Niña, la N.A.O CNES).

I.7.2 Evaporation et humidité

Une augmentation de la teneur en vapeur d'eau de la troposphère au cours de ces dernières décennies, correspondant au réchauffement constaté et à l'humidité relative quasi constante. La colonne totale de vapeur d'eau a augmenté dans les océans mondiaux de $1,2 \pm 0,3$ % par décennie de 1988 à 2004.

De nombreuses études montrent des hausses de l'humidité atmosphérique à proximité de la surface, mais il existe des différences selon les régions et entre le jour et la nuit. Comme d'autres composantes du cycle hydrologique, les variations interannuelles à décennales sont importantes. Cependant, une nette tendance à la hausse a été relevée dans les océans mondiaux et sur certaines terres émergées de l'hémisphère Nord. La hausse observée de la température de la mer en surface, qui est probablement pour une bonne part d'origine

anthropique, laisse penser que l'action de l'homme a contribué à l'augmentation constatée de la vapeur d'eau atmosphérique au-dessus des océans (Source : http://fr.wikipedia.org/wiki/Changement_climatique le25/04/2014).

I.7.3 Température

La tendance observée lors de la phase de hausse thermique de la fin du XXe siècle montre que la température augmente presque partout excepter sur quelques secteurs très précis dans les océans de l'hémisphère sud et en quelques points de l'hémisphère nord. La hausse est particulièrement marquée sur le centre de l'Amérique du Nord, le nord-est de l'Europe et l'est de l'Eurasie, mais moins importante dans la zone tropicale.

Ceci signifie que l'augmentation moyenne observée au niveau planétaire est à nuancer dans l'espace, et qu'elle ne représente pas parfaitement l'évolution thermique de chaque région du globe, puisqu'il existe des différences aux échelles spatiales plus fines.

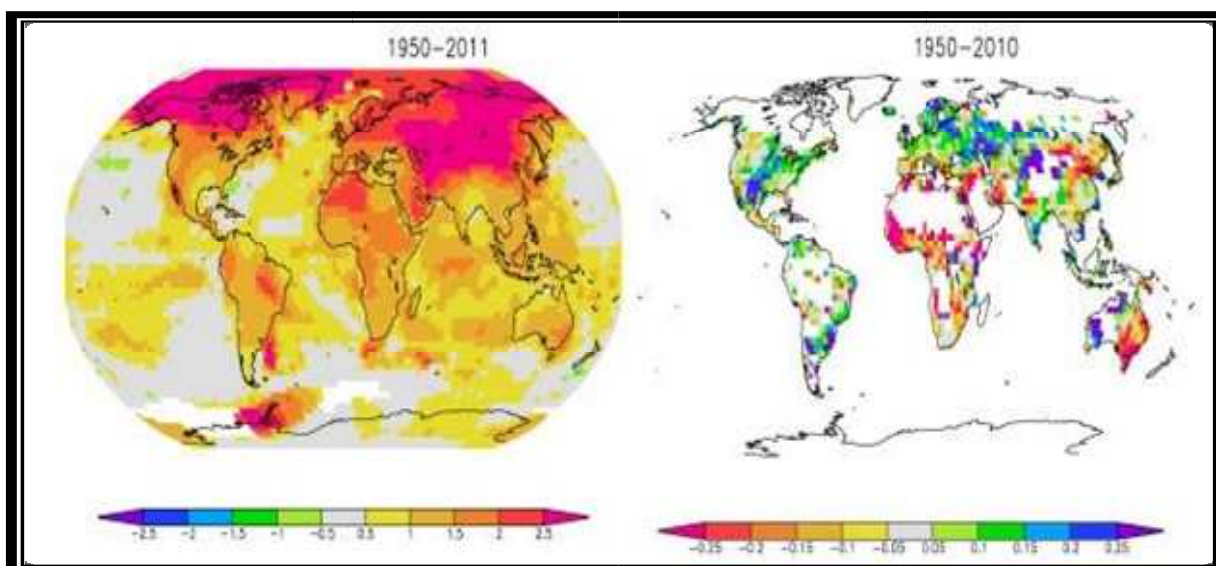


Figure I.7 : Les changements de température et des précipitations moyennes, de 1950 à 2011(Baghdadli. I,2014).

En 1988, l'équipe de climatologie de la Nasa, au Goddard institute for space studies, publie un article dans la revue journal of Geophysical Research. Un article assez long, dont il est vraiment intéressant d'extraire la figure qui présente les résultats des simulations numériques sous la forme très simple des courbes de l'évolution prévue de la température moyenne planétaire en fonction de trois scénarios d'émissions (Climat _ en 1988, 2020 était bien prédit – {Sciences²}.mhtml. Le Monde.fr).

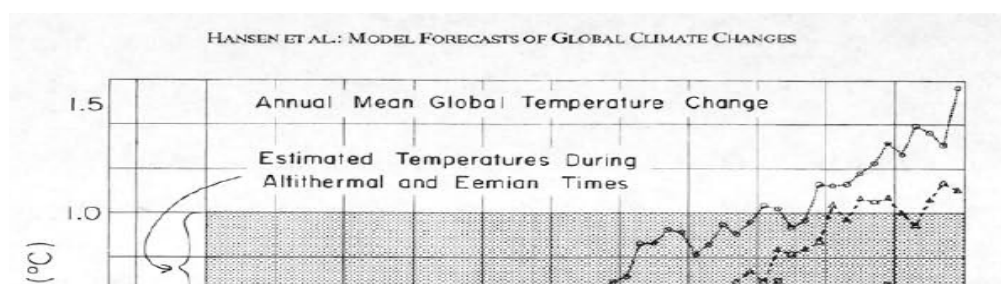


Figure I.8: Simulations et les observations du climat en 1958 (Climat _ en 1988, 2020 était bien prédit – {Sciences²}.mhtml. Le Monde.fr).

Dans cet article, les simulations du climat débutent en 1958, et les observations (la courbe en trait noir continu) s'arrêtent bien évidemment à l'époque de l'écriture de l'article donc en 1987. Les simulations présentées sur la figure vont jusqu'en 2019 (Climat _ en 1988, 2020 était bien prédit – {Sciences²}.mhtml. Le Monde.fr).

I.8 Changement climatique

Les Changement climatiques concernent des transformations générales du climat, y compris la température, les précipitations, les vents et d'autres facteurs ; ils peuvent varier d'une région à une autre. Il est établi par la science que ces changements sont la conséquence du renforcement du phénomène de l'effet de serre du fait du rejet dans l'atmosphère de gaz à effet de serre par certaines activités humaines.

Cette augmentation supplémentaire des concentrations de Gaz à effet de serre induit un réchauffement supplémentaire de la surface de la terre et de l'atmosphère.

I.8.1 : L'augmentation des concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre

Autres que la vapeur d'eau qui se recycle rapidement et en permanence, le gaz à effet de serre est un élément très important, qui doit être observé avec précision sur plusieurs décennies pour donner lieu à une interprétation fiable (info http://www.notreplanete.info/actualites/actu_2569_academie_sciences_rechauffement_climatique.php le 21/04/2014).



Figure I.9 : Processus de l'effet de serre (Saida. N, 2007)

I.8.2 : Le dioxyde de carbone (CO₂)

Sa concentration augmente continûment depuis le milieu du XIX^e siècle, en raison principalement des activités industrielles. Les études montrent que l'origine de cette augmentation est due pour plus de la moitié à la combustion des combustibles fossiles, le reste aux déboisements massifs et d'autre part à la production de ciment (info http://www.notreplanete.info/actualites/actu_2569_academie_sciences_rechauffement_climatique.php le 21/04/2014).

I.8.3 : Le méthane (CH₄)

Dû notamment aux fermentations diverses (zones humides, ruminants, déchets domestiques, biomasse, ...), aux fuites de gaz naturels et à la fonte du pergélisol, sa concentration s'est accrue de 140 % sur la même période. Elle semble cependant stabilisée depuis 2000 (info http://www.notreplanete.info/actualites/actu_2569_academie_sciences_rechauffement_climatique.php le 21/04/2014).

I.8.4 : Le protoxyde d'azote (N₂O)

Dû en grande partie aux activités agricoles (dont la biodégradation des nitrates agricoles dans les milieux souterrains anoxiques), sa concentration a augmenté de 20 % sur la même période (http://www.notreplanete.info/actualites/actu_2569_academie_sciences_rechauffement_climatique.php le 21/04/2014).

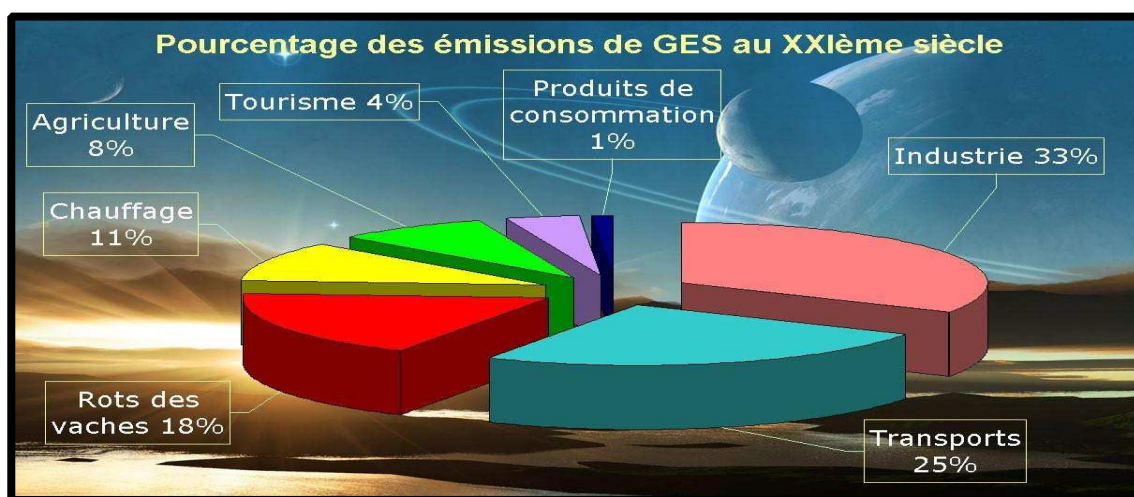


Figure I.10 : Emission de gaz à effet de serre (source : hommesetsoleil.e-monsite.com).

I.9 Les indicateurs du changement climatique

I.9.1 : L'augmentation de la température de surface sur la Terre

L'augmentation de la température de surface sur la terre est de $0,8 \pm 0,2$ °C depuis 1870. Elle reste notablement différente pour les deux hémisphères : plus forte au Nord et plus forte aux hautes latitudes. Une variabilité entre continents est également observée. Une forte modulation sur des périodes annuelles et multi décennales est également constatée, avec deux périodes de plus forte augmentation (approximativement de 1910 à 1940 et de (1975 à 2000) encadrées par des périodes de stagnation ou de décroissance (info http://www.notreplanete.info/actualites/actu_2569_academie_sciences_rechauffement_climatique.php le 21/04/2014).

I.9.2 : La température des océans

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

décennies(http://www.notreplanete.info/actualites/actu_2569_academie_sciences_rechauffement_climatique.php le 21/04/2014).

I.9.3 : La réduction de la surface des glaces océaniques arctiques

La banquise, dont la fonte ne contribue pas à l'élévation du niveau des océans, est un autre indicateur fort de l'accélération de l'évolution du climat : de 8,5 millions de km² stable dans la période 1950-1975, la surface des glaces de mer a connu une décroissance très rapide jusqu'à 5,5 millions de km² en 2010 (http://www.notreplanete.info/actualites/actu_2569_academie_sciences_rechauffement_climatique.php le 21/04/2014).

I.9.4 : Le recul des glaciers continentaux

Le recul des glaciers continentaux est observé de façon quasi généralisée depuis 3 à 4 décennies, avec une nette augmentation au cours des 20 dernières années (info http://www.notreplanete.info/actualites/actu_2569_academie_sciences_rechauffement_climatique.php le 21/04/2014).

I.9.5 : Les calottes polaires de l'Antarctique et du Groenland

Les calottes polaires de l'Antarctique et du Groenland ont un bilan total de masse négatif depuis une dizaine d'années. Si quelques régions élevées de l'intérieur des calottes, en particulier Antarctique, s'épaississent un peu par suite de précipitations neigeuses accrues, la perte de masse domine.

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

I.9.6 : Le niveau moyen des océans

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

consécutives au réchauffement et, pour les deux autres tiers, aux glaces continentales à parts quasi égales, fonte des calottes polaires du Groenland et de l'Antarctique d'une part, et fonte des glaciers continentaux d'autre part (Source : <http://www.pensee-unique.fr/oceans.html> le 22/04/2014).

I.9.7 : Les indicateurs biologiques

Les indicateurs biologiques, tels que les déplacements de populations animales terrestres ou marines et l'évolution des dates d'activités agricoles saisonnières, montrent aussi la survenue d'un réchauffement climatique (Rapport, pdf, consulté le 14/05/2014).

I.10 Conséquences du changement climatique sur les risques naturels

La fréquence, l'intensité et la durée des phénomènes extrêmes (canicules, inondations, sécheresses, cyclones...) seront accentuées, bien qu'il n'est pas encore possible de l'affirmer pour les orages, les tornades ou le grêle par exemple (Source: <https://www.notre-planete.info/terre/risques-naturels>).

I.10.1 Les canicules

Les vagues de chaleur sont de plus en plus fréquentes et intenses. Ainsi, « Des vagues de chaleur aussi intenses et étendues portent la marque des changements climatiques d'origine humaine et corroborent les conclusions scientifiques selon lesquelles les épisodes de chaleur sont plus fréquents, plus longs et plus intenses alors que les concentrations de gaz à effet de serre génèrent une hausse des températures au plan mondial », a expliqué le Directeur du Département du climat et de l'eau de l'OMM, Johannes Cullmann, fin juillet 2019. Début août 2019, le groupe de recherche World Weather Attribution a rendu ses conclusions : "la canicule de juillet [2019] aurait été quasi-improbable dans un climat non-modifié par l'Homme" (Source: <https://www.notre-planete.info/actualies/3044-canicules-france-juillet-2019>).

I.10.2 Les incendies

Conséquence directe de l'augmentation des températures et des vagues de chaleur : de plus en plus d'incendies se déclarent, entraînant l'émission de carbone qui va à son tour réchauffer l'atmosphère. Par exemple, l'année 2019 a été marquée par des records de chaleur en arctique qui ont favorisé d'importants incendies en Arctique entraînant également la fonte accélérée de l'inlandsis du Groenland (Source: <https://www.notre-planete.info/actualies/3041-incendies-forets-records-arctique>). Toujours en 2019, la forêt amazonienne, à cause de l'élévation et de températures plus élevées a été ravagée par des

dizaines de milliers d'incendies (Source: <https://www.notre-planete.info/actualies/3064-incendies-records-amazone-deforestation>).

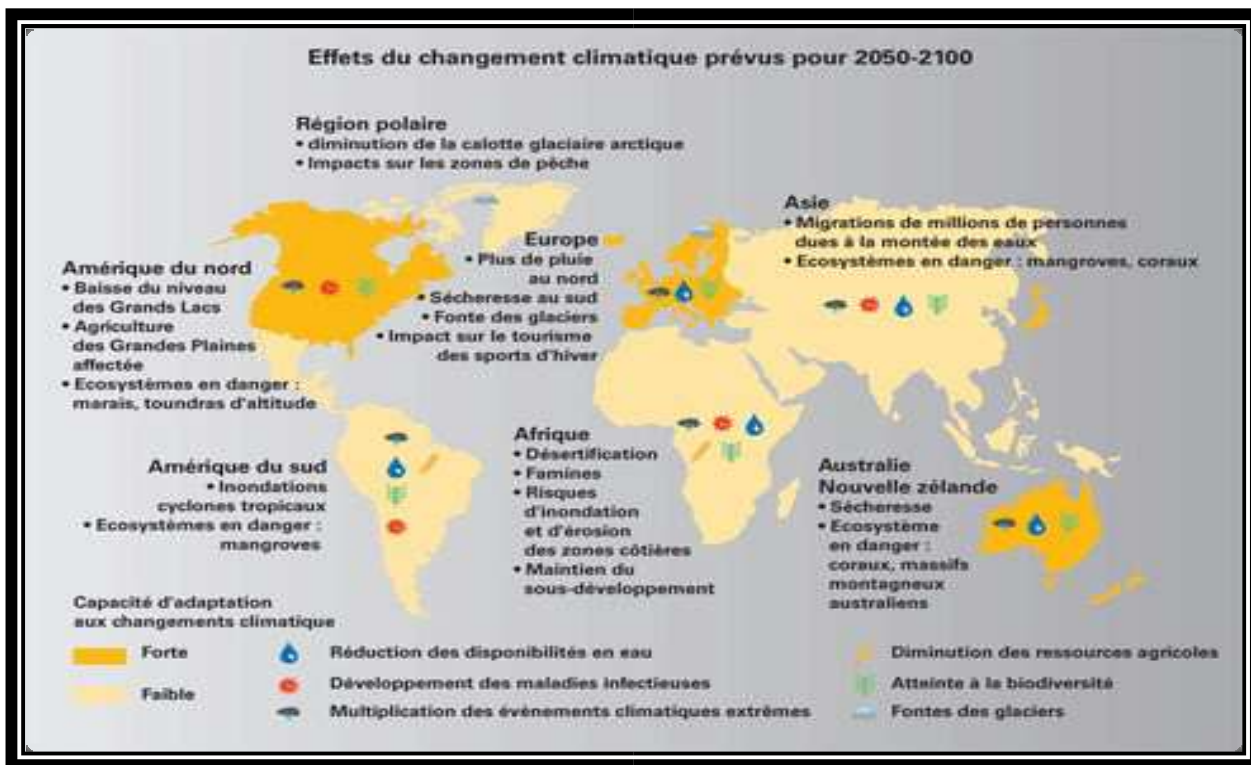


Figure I.11 : Schéma qui indique l'effet du changement climatique prévupour 2050 à 2100 (Source:hommesetsoleil.e-monsite.com).

I.11 L'eau et le changement climatique

Il est largement prouvé par des relevés d'observations et des projections climatiques que les sources d'eau douce sont vulnérables et auront à souffrir gravement du changement climatique, avec de grandes répercussions sur les sociétés humaines et sur les écosystèmes. Le changement observé pendant plusieurs décennies a été relié à la modification survenue dans le cycle hydrologique à grande échelle, Au niveau mondial, la superficie des terres considérées Comme très sèches a plus que doublé depuis les années 1970. Le volume d'eau stocké dans les glaciers de montagne et la couverture neigeuse de l'hémisphère Nord a Considérablement diminué. On a observé des décalages dans les variations saisonnières du débit des rivières alimentées Par la fonte des glaciers et de la neige et dans les phénomènes liés à la glace dans les rivières et les lacs.

Le volume d'eau stocké dans les glaciers de montagne et la couverture neigeuse de l'hémisphère Nord a considérablement diminué. On a observé des décalages dans les variations saisonnières du débit des rivières alimentées par la fonte des glaciers et de la neige et dans les phénomènes liés à la glace dans les rivières et les lacs.

Des changements dans la quantité et la qualité de l'eau attribuables au changement climatique devraient influencer la disponibilité, la stabilité et l'utilisation des aliments ainsi que l'accès à ces derniers. Ceci devrait entraîner une diminution de la sécurité alimentaire et une vulnérabilité accrue des cultivateurs dans les zones rurales pauvres, en particulier dans les régions tropicales arides et semi-arides et dans les méga deltas asiatique et africains.

Vers le milieu du XXI^e siècle, le débit moyen annuel des cours d'eau et la disponibilité en eau devraient augmenter en raison du changement climatique aux latitudes élevées et dans certaines zones tropicales humides, et diminuer dans des régions sèches aux latitudes moyennes et dans les régions tropicales sèches. L'augmentation de l'intensité et de la variabilité des précipitations devrait augmenter les risques de crue et de sécheresse dans plusieurs régions.

L'augmentation de la température des eaux et les variations des phénomènes extrêmes, notamment les crues et les sécheresses, devraient influencer la qualité de l'eau et aggraver de nombreuses formes de pollution aquatique (sédiments, nutriments, carbone organique dissous, organismes pathogènes, pesticides et sel) ainsi que la pollution thermique, avec d'éventuelles conséquences néfastes sur les écosystèmes, la santé publique, la fiabilité des systèmes de distribution d'eau et les coûts d'exploitation (degré de confiance élevé).

De plus, l'élévation du niveau de la mer devrait étendre les zones de salinisation des eaux souterraines et les estuaires, ce qui entraînera une diminution de la disponibilité en eau douce pour l'homme et les écosystèmes dans les zones côtières.



Figure I.12 : les glaciers de montagne (Source <http://www.diapo.ch/ploncheContact.php>).

I.12 Impacts attendus des changements climatiques sur les ressources en eau

Une intensification générale des pluies torrentielles. Cela induirait une augmentation des inondations et du ruissellement tout en réduisant les possibilités d'infiltration de l'eau dans le sol. Des modifications du régime des saisons pourraient affecter la répartition régionale des ressources en eau tant souterraines que superficielles. Dans les climats secs, des modifications relativement faibles des températures et des précipitations pourraient provoquer une évolution relativement importante de l'écoulement. Les régions arides et semi-arides seront donc particulièrement sensibles à une diminution des précipitations et à une augmentation de l'évaporation. De nombreux modèles climatiques prévoient une baisse des précipitations moyennes dans les régions déjà sèches : Asie centrale, Méditerranée, Afrique, Sahel et Australie. Le stockage des eaux de surface pourrait diminuer avec les pluies diluviennes et les glissements de terrain favorisant l'engorgement et la réduction de la capacité des réservoirs. Une augmentation des pluies diluviennes et des inondations pourrait engendrer de plus grandes pertes d'eau sous forme de ruissellement. Cela pourrait influencer à long terme sur les nappes souterraines. La qualité de l'eau pourrait également varier en fonction de la quantité et du moment des précipitations.

Du fait de l'élévation du niveau de la mer, les eaux salées pourraient pénétrer les réserves d'eau douce du littoral.

I.13 Conclusion

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



Chapitre II

***Les changements
climatiques et les
argiles***

II.1 Introduction

L'objectif principal de ce chapitre est d'élaborer une synthèse bibliographique sur les argiles (définition, origine, principale famille, différents types de la structure argileuse.), puis, l'effet de l'eau et les différentes réactions physico-chimiques qui se produisent dans la structure argileuse. Dans ce qui suit, des résultats existant sur le phénomène du retrait-gonflement et le comportement hydromécanique des sols gonflants, ensuite les phénomènes de retrait-gonflement et les causes de la variation de volume des sols gonflants seront définis et les mécanismes du gonflement des sols gonflants, d'autre part les fissures et l'instabilité des fondations par le phénomène de retrait-gonflement des argiles.

II.2 Généralités sur les argiles

II.2.1 Définition et origine des argiles

Les massifs d'argile présentent souvent des instabilités de types (tassement, glissement, retrait-gonflement, poinçonnement, ...), notamment, en présence d'eau (Figure II.1).

Ces sols sont très fréquents en Algérie et à travers le monde, ainsi, l'étude de leur comportement mécanique et hydrique a fait l'objet de plusieurs recherches (Khebizi et Guenfoud, 2008) ; de Souk-Ahras (Charef et al, 2008) ; de Mila (Benaïssa et Belouar, 2008); (Benaïssa et Bellouche, 2009), (Locat et al, 2008 ; Demers, 2008).

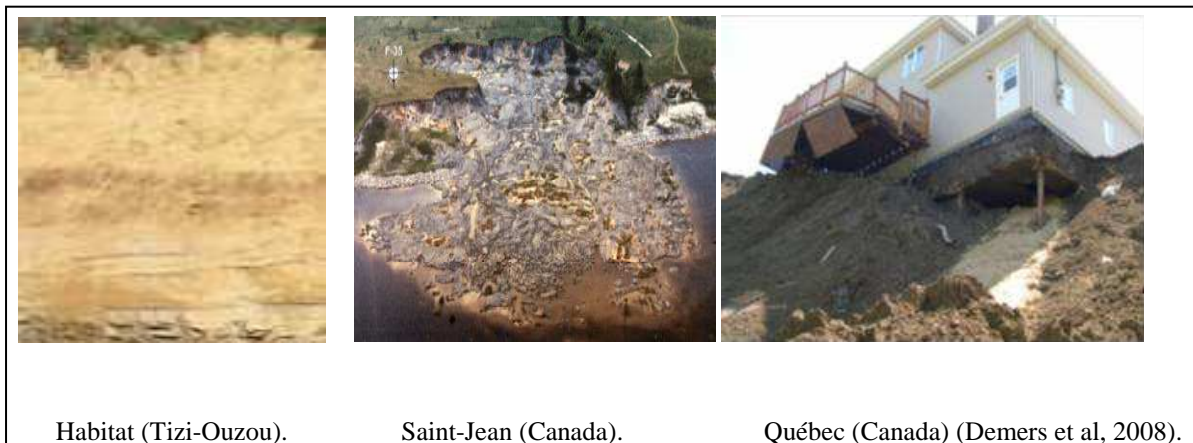


Figure II.1 : Massifs naturels argileux.

D'une manière générale, lorsque la proportion de particules argileuses dépasse 30% le sol est considéré comme une argile. L'argile étant pratiquement imperméable, elle est souvent employée comme matériaux d'étanchéité dans les noyaux de barrage en terre ou de digues. Toutefois, sa compressibilité est élevée, et les charges qu'elle peut supporter sont de loin inférieures à celles que supportent les graviers et les sables. Les particules d'argile, contrairement à celles des autres types de sol, sont attirées les unes vers les autres et se regroupent. Cette attraction qui porte le

nom de cohésion, est à l'origine de la consistance. Dans des conditions d'humidité favorables, la consistance est telle que l'argile devient plastique et qu'il est possible de façonner, une opération pratiquement irréalisable avec le gravier ou le sable. (Xing-ling, 1999). En général des silicates d'aluminium plus ou moins hydratés présentant une structure feuilletée (phyllosilicates) expliquant leur plasticité, ou fibreuse (sépiolite et palygorskite) expliquant leur qualité d'absorption (Chami,2016). Les argiles sont des matériaux sédimentaires de la couche superficielle de l'écorce terrestre, obtenus par dégradation et altération par l'hydrolyse des minéraux des roches éruptives et magmatiques sous l'action physique et chimique des eaux de surface. Ces résidus détritiques sont déplacés par voie glaciaire, fluviale ou éolienne et se déposent dans les bassins de sédimentation. Le terme argile possède différents sens qui ne se recouvrent que globalement. Il peut désigner des minéraux de structures et propriétés particulières, des roches argileuses composées pour l'essentiel de ces minéraux ou bien la partie la plus fine d'une analyse granulométrique d'un sol meuble inférieur à 2 µm, cependant cette dernière sont des minéraux argileux résultant de la destruction des roches (les roches sédimentaires contiennent 50 %, les schistes 50 à 80 % et les roches éruptives donnent, par décomposition, des argiles). On dit qu'un sol est argileux s'il contient plus de 50% de minéraux argileux.

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

Plusieurs facteurs jouent un rôle sur le type d'argile résultant à savoir la nature de la roche mère, la topographie et le climat (Figure II.2).

II.2.1.1 La roche mère

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

II.2.1.2 La topographie

Elle commande le drainage et elle intervient également :

- Sur une pente, où le drainage et le lessivage sont bons, la formation de kaolinite est favorisée.

Dans une cuvette, milieu confiné où se concentrent les solutions, se forment plutôt des smectites.

II.2.1.3 Le climat

En fonction des roches mères et du climat, les minéraux argileux résultant sont différents :

- a) 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.
- b) 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 et des interstratifiés apparaissent à l'exemple des illites et chlorites dégradées et de la vermiculite.

Une transformation des minéraux argileux pourra se produire lors de changement de milieu. 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 :

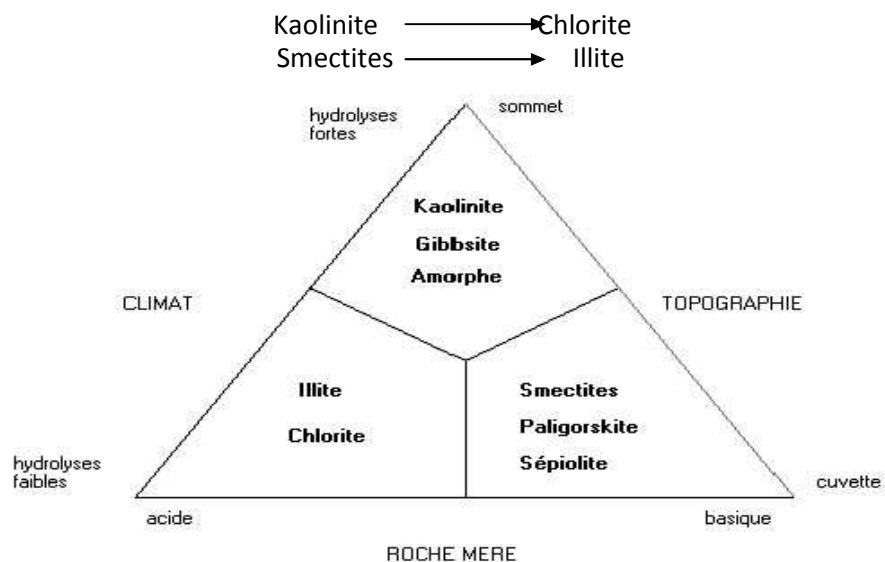


Figure II.2 : Types de phyllosilicates formés au cours de l'altération.

Du point de vu chimique, il s'agit de réactions tendant à faire acquérir aux combinaisons d'éléments chimiques constituant les minéraux ou les roches, un état plus stable que leur état initial, au contact de l'atmosphère. C'est ainsi que les micas se chloritisent, que les feldspaths se

Kaolinisent, que les sulfures se transforment en sulfates. Ce sont toujours des oxydations ou des hydrolyses.

II.2.2 Formation des argiles :

Les argiles proviennent de la désagrégation de roches silicatées : du granite (mica et feldspath), du gneiss ou encore des schistes. Ces particules sont transportées par le vent ou l'eau sous forme de limon ou de vase. Les fleuves véhiculent des argiles qui finissent par se déposer en alluvions, dans le cours d'eau lui-même, à son embouchure, dans un lac ou dans la mer. Les dépôts peuvent alors sédimenter et former une roche argileuse.

II.2.3 Structure et minéralogie des argiles

Les argiles sont des matériaux lamellaires constitués par l'empilement de feuillets, elles ont quatre niveaux d'organisation (Figure II.3).

- Les plans sont constitués par les atomes.
- Les feuillets, tétraédriques ou octaédriques, sont formés par une combinaison de plan.
- Les couches correspondent à des combinaisons de feuillet.
- Le cristal résulte de l'empilement de plusieurs couches.

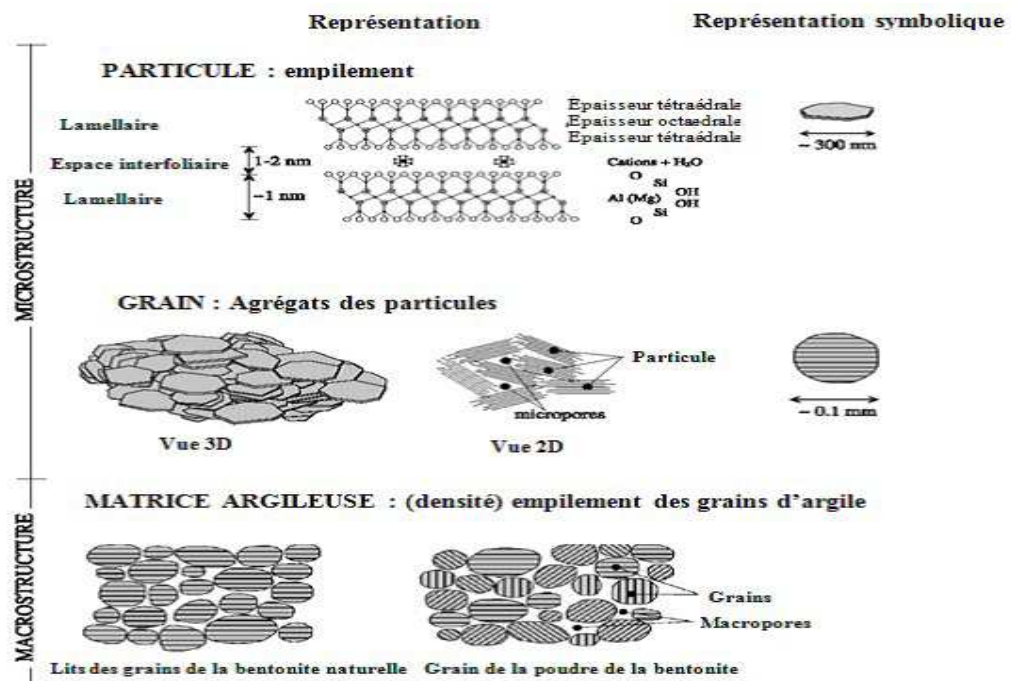


Figure II.3 : Structure de la bentonite à différentes échelles, (d'après Karnland, 1998, Pusch et Yong, 2003, cité par Kröhn, 2003).

Un feuillet est formé par l'association de couche tétraédrique et de couche octaédrique. La couche tétraédrique est formée par un enchainement des tétraèdres (T) constituée par des atomes de Si^{4+} , Al^{3+} , et Fe^{3+} .

La couche octaédrique est constituée par un enchainement de octaèdres (O), dont les sommets sont occupés par des atomes d'oxygène et des groupements hydroxyles et les centres sont occupés par des atomes d' Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} ou Fe^{2+} (Figure II.4).

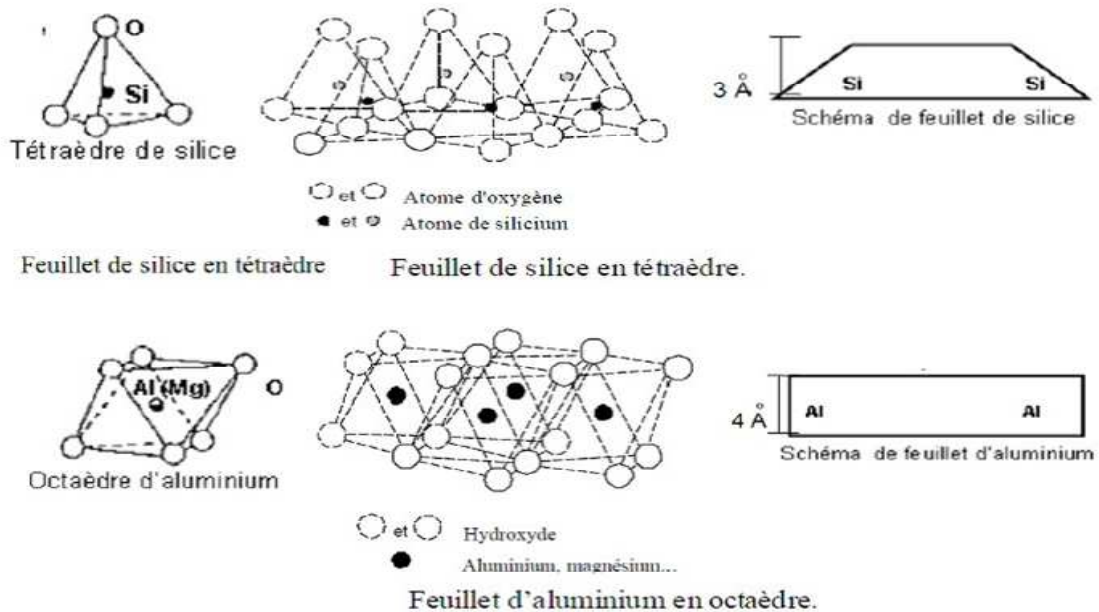


Figure II.4 : Structure de base des phyllosilicates.

Suivant le mode d'agencement des tétraèdres et des octaèdres, on distingue deux grandes familles de minéraux :

a) Les minéraux fibreux qui sont des espèces à pseudo feuillets, par exemple les palygorskites (attapulgite) et les sépiolites (Charradi, 2010).

b) Les minéraux phylliteux à structures lamellaires. Ces derniers sont les plus répandus et les plus étudiés. Leur classification est basée sur le mode d'association des couches structurales et le degré d'occupation des sites de la couche octaédrique (di ou tri octaédrique). Selon la séquence d'empilement des couches tétraédriques et octaédriques, on distingue des minéraux de type : 1/1 (T-O), 2/1 (T-O-T) et 2/1/1(T-O-T-O).

II.2.3.1 Les minéraux 1/1

Ces minéraux sont constitués par l'empilement suivant la normale des feuillets formés par l'association d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique. Les tétraèdres sont liés par trois sommets et le quatrième sommet du tétraèdre sert de lien avec la couche octaédrique

(Figure II.5). La distance basale est de l'ordre de 7 Å. L'ensemble des charges est reparti de telle sorte que le feuillet est électriquement neutre. La cohésion des feuillets est assurée par des ponts hydrogènes. Dans ce sous-groupe d'argiles, on peut citer la famille des kaolinites (la kaolinite, la dickite et la nacrite) et l'halloysite.

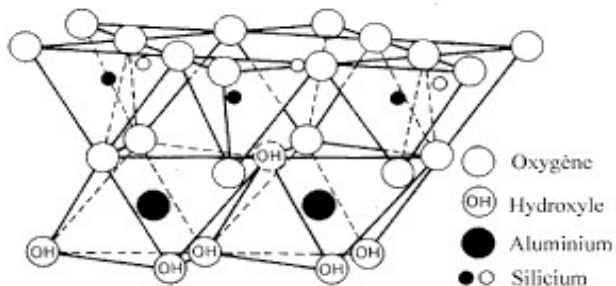


Figure II. 5 : Assemblage d'une couche octaédrique et d'une couche tétraédrique pour une argile TO (1/1).

II.2.3.2 Les minéraux 2/1

Ces phyllo silicates comptent plus de 200 variétés de minéraux différents, parmi lesquelles on trouve les groupes des micas et des smectites (Charradi, 2010). Ces argiles sont composées d'agglomérats, ces agglomérats sont composés de particules, chacune des particules est composée d'un empilement de feuillets ayant une grande extension dans le plan. Un feuillet est composé d'une couche planaire formée par un cation en coordinance octaédrique encadrée de deux couches planaires de silicium en coordinance tétraédrique (le feuillet est dit TOT) (Fig. II.6) Les sites octaédriques, quand à eux, peuvent être occupés soit par des cations trivalents Al^{3+} ou éventuellement Fe^{3+} , ces phyllo silicates 2/1 sont alors définis comme di octaédriques, ou par un cation bivalent, le phyllo silicate est alors appelé tri octaédrique.

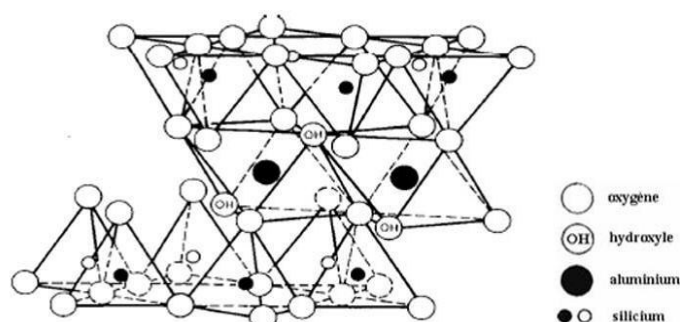


Figure II.6 : Assemblage d'une couche octaédrique et deux couches tétraédriques pour une argile TOT (2:1).

La capacité de gonflement des argiles est influencée par les arrangements et la composition minéralogique de ces feuillets. De même, le gonflement est contrôlé par l'intensité des liaisons

inter feuillets qui peuvent se casser lors de l'hydratation et modifier par la suite la micro texture de l'argile (Wakim, 2005).

II.2.4 Structures cristallines fondamentales des minéraux argileux (Robitaille et Tremblay 1997) :

Les feuillets 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.

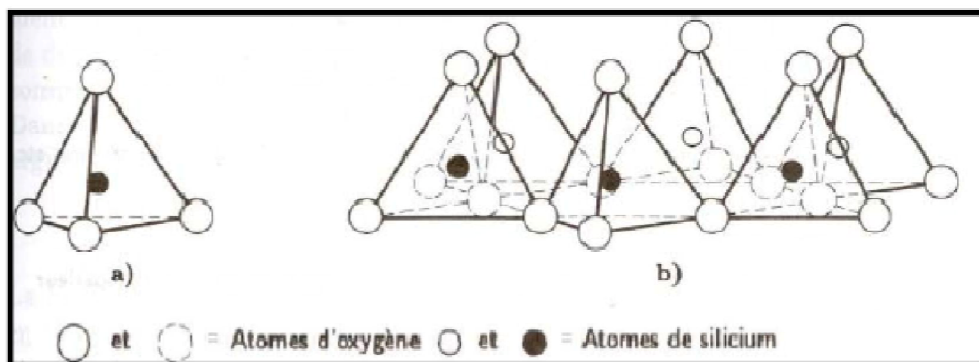


Figure II.7 : a) Tétraèdre de silice (d'après Grim, 1959) ; b) feuillet de silice en tétraèdre (D'après Grim, 1959).

La structure fondamentale **octaédrique** est une combinaison de six atomes d'oxygène (O) ou molécule d'hydroxyle (OH), placés au sommet d'un octaèdre qui renferme un atome métallique l'aluminium (Al) ou de magnésium (Mg). Chacun de ces deux atomes peut être remplacé par un atome métallique de fer (Fe), de titane (Ti), de nickel (Ni), de chrome (Cr) ou de lithium (Li).

Un feuillet octaédrique se forme par l'arrangement de structures fondamentales octaédriques. Lorsque les deux tiers des atomes métalliques sont des atomes d'aluminium, la structure octaédrique porte le nom de gibbsite. Si ce sont pour la plupart des atomes de magnésium, la structure portera le nom de brucite.

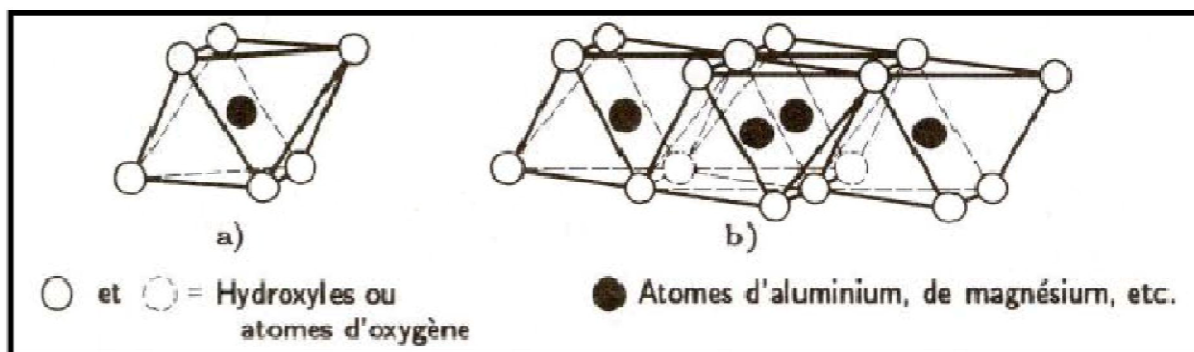


Figure II.8 : a) octaèdre d'aluminium(ou de magnésium) (d'après Grim, 1959) ; b) vue isométrique d'un feuillet en octaèdre (d'après Grim, 1959).

L'insertion des atomes dans les structures fondamentales peut se faire par substitution, lors de la formation des minéraux argileux. Les substitutions surviennent principalement dans les structures octaédriques, où les atomes d'aluminium sont le plus souvent remplacés par des atomes de magnésium ou de fer. Dans les structures tétraédriques, un atome d'aluminium peut parfois remplacer l'atome de silicium. Comme la plupart de ces atomes ont approximativement la même taille, les structures fondamentales conservent sensiblement la même forme ; c'est pourquoi on parle de substitutions isomorphe.

L'illustration ci-après montre la structure d'une montmorillonite (droite et gauche), avec l'alternance des couches T et O, ici une séquence TOT avec l'adsorption d'eau dans l'espace inter foliaire (en vert). La macroscopie du milieu représente un empilement de kaolinite qui est beaucoup moins réactive avec l'eau, c'est pourquoi elle est utilisée pour fabriquer la porcelaine. La montmorillonite, qui peut absorber énormément d'eau, serait inapte à la fabrication de poterie ou de porcelaine en raison du retrait lors de la cuisson.

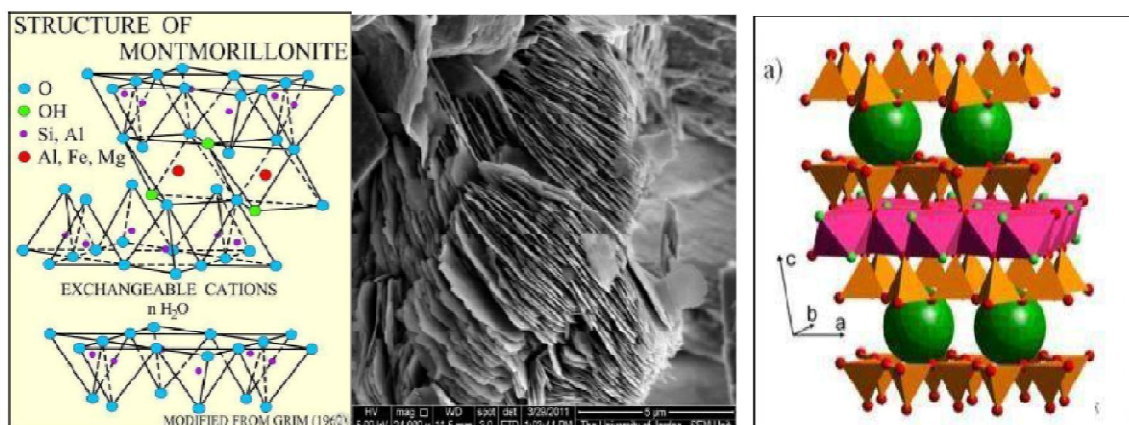


Figure II.9 : structure des argiles.

II.2.5 Structure moléculaire des argiles

Les minéraux argileux sont tous constitués à partir d'un empilement de feuillets tétraédriques et octaédriques entrecoupés par un espace appelé espace inter foliaire. La structure formée en liant une couche tétraédrique à une couche octaédrique est appelée feuillet 1:1 dont l'épaisseur est d'environ 0,7 nm. En liant une couche tétraédrique de chaque côté d'une couche octaédrique, on forme un feuillet 2 :1, dont l'épaisseur est d'environ 0,9 nm.

Les liens de covalence et les liaisons ioniques assurent la structure rigide du feuillet élémentaire; des liaisons moins fortes mais essentielles assurent l'assemblage des feuillets élémentaires pour former la particule d'argile. (Coussy et Dir, 2002).

II .2.6 Les types de minéraux argileux

L'analyse du comportement gonflant des argiles consiste à préciser la nature des liaisons pour chacune des trois familles d'argiles considérées.

Les trois familles les plus connues de minéraux argileux sont la kaolinite, la montmorillonite et l'illite (voir tableau II.1).

II.2.6.1 La kaolinite Ce nom vient du mot Kauling qui désigne le haut sommet d'une colline situé près de Jaucha fu en Chine ou cette argile blanchâtre a été découverte il y a quelques siècles. La kaolinite est formée de couches élémentaires comprenant chaque un feuillet octaédrique qui renferme des atomes de d'aluminium (gibbsite). Les argiles de la famille de kaolinite sont les constituants essentiels de la plupart des argiles utilisés en céramique. Ces minéraux sont relativement inactifs. Non gonflant. La formule chimique de cette famille est du type $[Si_2Al_2O_5(OH)_4]$ pour une demi-maille. Elle est donc assez riche en alumine. La formule structurale est : $(OH)_4 Al_2 Si_2 O_5$, lieu géographique en Chine. Parmi cette famille, nous avons : Kaolinite, Bertierine, Dickite, Nacrite et Halloysite. Une particule d'argile est formée d'un empilement de plusieurs feuillets d'équidistance fixe de 7 \AA^0 , elle est composée d'une couche tétraédrique siliceuse et d'une couche octaédrique alumineuse (Fig. II.10). Le contact entre les feuillets se fait suivant un plan contenant des ions d'hydroxyles OH^- de l'octaèdre et des ions d'oxygène O^{2-} du tétraèdre. Les liaisons inter foliaires, résultant de l'effet combiné de liaisons d'hydrogène et de la force de Van Der Waals, confèrent un lien assez fort avec une grande stabilité vis-à-vis de l'eau. Les feuillets sont alors soudés les uns aux autres par des forces de liaisons très importantes rendant la kaolinite presque insensible au gonflement. Les substitutions isomorphes sont peu fréquentes dans ce type d'argile grâce à la stabilité physique de sa structure et le pouvoir de fixation des cations ne dépasse pas 15 milliéquivalent/100g. Les particules de kaolinite sont de grandes plaquettes rigides de forme hexagonale de quelques dizaines à une

centaine de nanomètres d'épaisseur et de quelques centaines à un millier de nanomètres d'extension latérale (dimension latérale / épaisseur). Les feuillets sont empilés de manière ordonnée et ils sont en contact les uns avec les autres. Théoriquement, l'eau interfoliaire n'a aucune existence dans ce type d'argiles.

La kaolinite est fréquente dans les sédiments argileux provenant de l'altération de roches acides riches en feldspath (granites par exemple). Elle présente une forte teneur en alumine (46 %) et montre des propriétés de plasticité, de faible retrait au séchage et à la cuisson. Elle demande des températures de cuisson élevées et elle est assez réfractaire après cuisson.

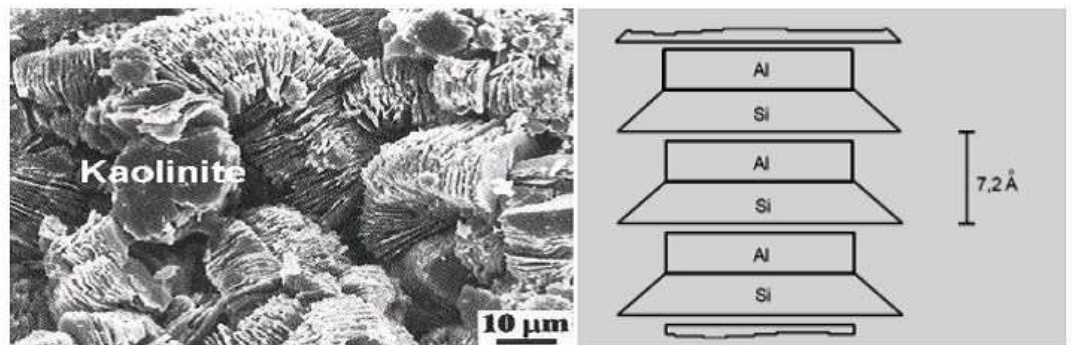


Figure II .10 : Cristaux des particules de kaolinite vus au microscope électronique à balayage.

II.2.6.2 Les illites A été découverte pour la première fois à l'université de l'Illinois (USA) par le professeur R.E. Grim. Les argiles de la famille des Illite sont parmi les minéraux les plus répandus à la surface de la terre. La structure de l'illite est analogue à celle des micas, mais la matière est beaucoup plus finement divisée. Elles sont moyennement gonflantes. La formule chimique pour une demi-maille de l'illite est de la forme : $[Si_{(4-x)}Al_xAl_2O_{10}(OH)_{2x}K]$. Le feuillet élémentaire de l'illite est composé d'une couche d'alumine comprise entre deux couches de silice. L'épaisseur d'un feuillet est d'environ 10 \AA . Les illites sont les plus répandues des minéraux argileux dans la nature. Elles sont des argiles dites potentiellement gonflantes. Les liaisons entre les feuillets sont moins fortes que celles des kaolinites. Les analyses chimiques ont montré dès le début, que moins d'un ion de silicium sur quatre était remplacé par un ion d'aluminium, ce qui diminue d'autant la quantité d'alcalins entre les feuillets. Un remplacement partiel des ions Al octaédriques par des ions Mg, Fe^{2+} et Fe^{3+} , est fréquent. Le déficit de charge qui en résulte est compensé par l'eau et les cations de potassium K^+ (sauf qu'on a plus d'eau, moins de K^+). La présence de ces cations contribue à renforcer les liaisons inter feuillets. Le comportement des illites se rapproche alors de celui des kaolinites. La formule structurale est variable selon le modèle suivant : $(OH)_2 Al_2 Si_{4-x} Al_x K_x O_{10}$ avec $0,5 < x < 0,75$. Le groupe des micas présente aussi des feuillets à trois couches T-O-T. Un exemple de mica est la muscovite $KAl_2[Si_4AlO_{10}](OH)_2$ Elle fait intervenir des ions K^{2+} sont absorbés dans les liaisons

inter foliaires afin de compenser le déséquilibre des charges. Cependant ces ions sont liés de façon très stable et la plupart ne sont pas échangeables. La structure des micas se rapproche de celle des illites sauf qu'elles sont plus grandes. Leur formule chimique est la suivante : $(OH)_2 Al_2 Si_3 Al_k O_{10}$.

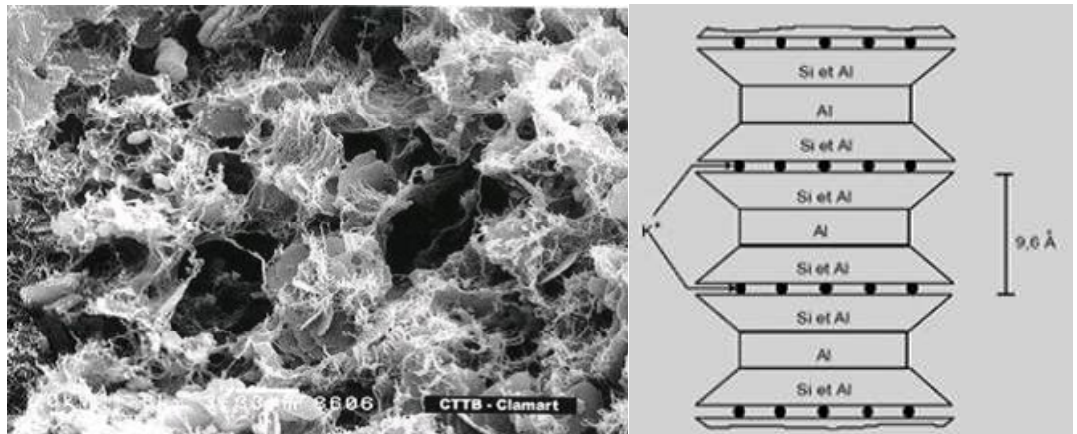


Figure II.11 : Cristaux des particules d'Illite vus au microscope électronique à balayage.

II.2.6.3 La montmorillonite A été découverte à Montmorillon en France. Elle est constituée 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. Les sols de la famille de la montmorillonite (Smectite) peuvent absorber de l'eau dans des proportions considérables, donnant lieu à des gonflements caractéristiques. Ceci est dû au fait que les liaisons d'un feuillet à l'autre sont faibles à cause de la structure floconneuse, et l'eau pénètre facilement entre les feuillets. La montmorillonite est du type $[Si_4Al(2x)Mg_xO_{10}(OH)_{2x}(\text{cations échangeables})_n H_2O](Ait \text{ amrane.T,2018})$. Les Montmorillonites, la Beidellite, la Nontronite, la Hectonite, la Saponite et la Sauconite sont des argiles dites potentiellement très gonflantes. Le représentant le plus important de cette famille des minéraux est la montmorillonite. Le terme de montmorillonite a été proposé par Damour et Salvetat (1847) d'après le nom de la ville de Montmorillon (Vienne, France). La montmorillonite se compose comme suit : une couche octaédrique comprise entre deux couches tétraédriques. Les tétraèdres de la couche tétraédrique sont occupés par le silicium, et l'aluminium de la couche octaédrique est remplacé partiellement par le magnésium. L'empilement des feuillets est désordonné ; chaque feuillet est tourné dans son plan par rapport au précédent et a une extension latérale extrêmement grande par rapport à son épaisseur qui est d'environ 9.6 \AA . Ce désordre est la constitution des faces inférieures et supérieures de ce type d'argile, ne permettent pas le développement d'une liaison hydrogène entre les feuillets, ce qui facilite leur écartement et l'absorption des molécules variées (eau, cations ou molécules organiques) au niveau de l'espace inter foliaire qui s'écarte. De ce fait, parvient la sensibilité de ces argiles à l'eau qui se glisse entre ces feuillets en quantité variable et

donne à la périodicité de l'empilement une valeur également variable souvent voisine de 14 Å°. Ceci crée un déficit de charge compensé par des ions, situés entre les feuillets et qui sont changeables et fréquemment représentés dans la nature par Na et Ca.

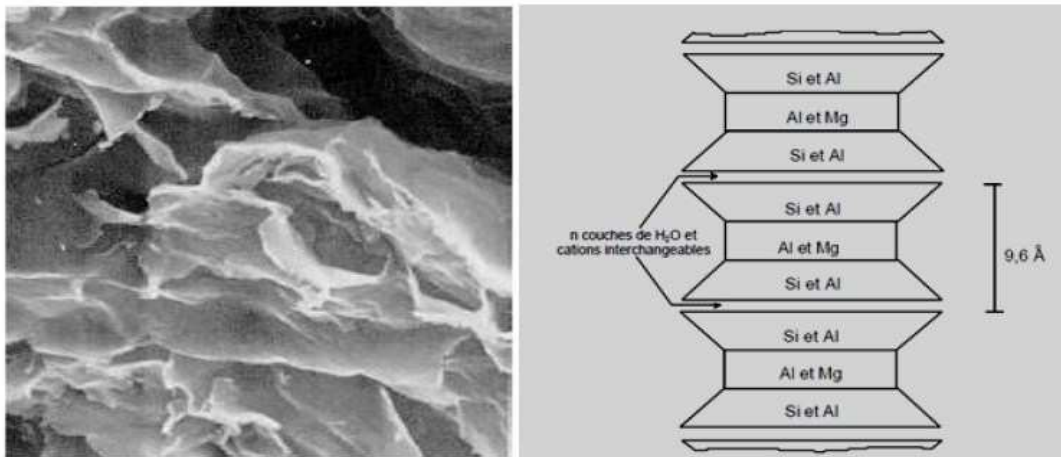
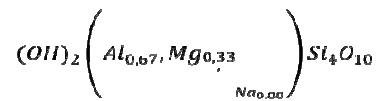


Figure II.12 : Vue microscopique au MEB de la montmorillonite et arrangement des feuillets.

Les peuvent s'intercaler régulièrement ou irrégulièrement avec d'autre feuillets argileux, l'ensemble forme des interstratiés, le comportement peut s'avérer gonflant, c'est le cas de la corrensite, la torudite, la kaolinite-montmorillonite, etc.

Il est nécessaire de citer un autre type d'argile appelé : **chlorites** (Fig. II.13), du fait que leurs propriétés se rapprochent de celles des argiles. Leur structure est cependant plus complexe, et se composent de deux feuillets de micas entre lesquels s'insère un feuillet de brucite. En fait, le déficit du feuillet de mica est rarement comblé par le feuillet de brucite et des cations interchangeables se logent dans les espaces créés au sein du feuillet de mica. De l'eau peut alors pénétrer entre les feuillets, provoquant ainsi un accroissement de l'interdistence et donc un gonflement (Bultel, 2001).

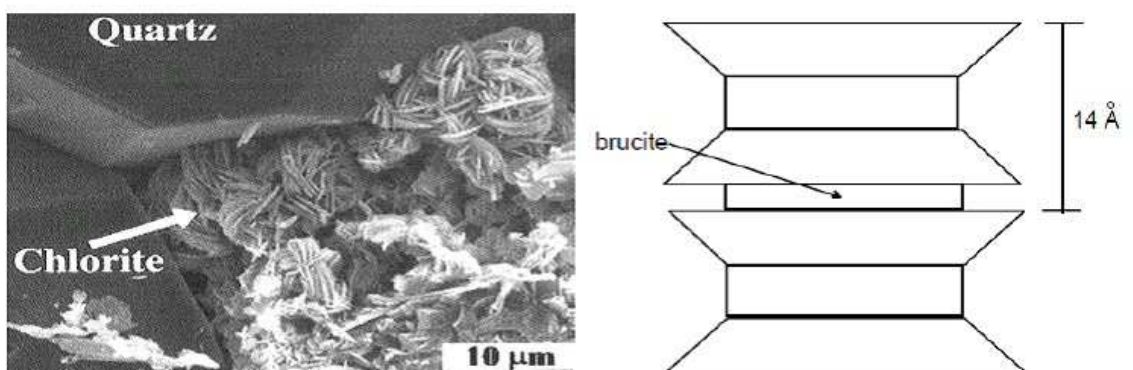





Figure II.13 : Cristaux de chlorite vu au microscope électronique à balayage.

Tableau II.1: Minéraux argileux.

Type d'argile	Feuillets Élémentaires	Nombre de feuillets par particule	Dimensions d'une particule		Surface spécifique en m ² /g
			longueur en µm	épaisseur en µm	
<i>Kaolinite</i>		100-150	1	0,1	20-70
<i>Illite</i>		10	0,3	0,01	65-180
<i>Montmorillonite</i>		1	0,1	0,001	800

II.2.7 Texture des argiles

Tout comme la structure cristalline des argiles, la texture est un paramètre important car il conditionne les propriétés physiques du minéral (Caillère & Hénin, 1959). La texture concerne l'assemblage des minéraux (argileux ou pas) sous forme d'agrégats ainsi que l'arrangement ou la distribution spatiale de ces agrégats (Audiguier, 1979). (Aubouin et al. 1968) définissent la texture comme «la forme, la dimension et la disposition d'un certain nombre de minéraux naturellement groupés en une population au sein de la roche ». Cette organisation peut faire l'objet de différentes classifications (Van Olphen, 1963 ; Collins & Mc Gown, 1974 ; Le Roux, 1975 ; Sergeyev et al, 1978), citées par Maison, 2011, et elles sont valables pour les sols argileux. Gens et Alonso (1992) ont établi une classification pour les sols gonflants, à partir des travaux de Collins et Mc Gown (1974). Cette classification se base sur l'organisation des particules élémentaires argileuses :

- Texture « matricielle » (Fig. II.14 a) : texture dont la base est une pâte homogène avec les particules élémentaires disséminées dans cette pâte. Cette texture est caractéristique des sols naturels ou des sols compactés du côté humide de l'optimum Proctor.
- Texture « agrégée » ou « compactée » (Fig. II.14b) : texture compactée avec les particules élémentaires assemblées sous forme de mottes ou d'agrégats. (Wakim, 2005).

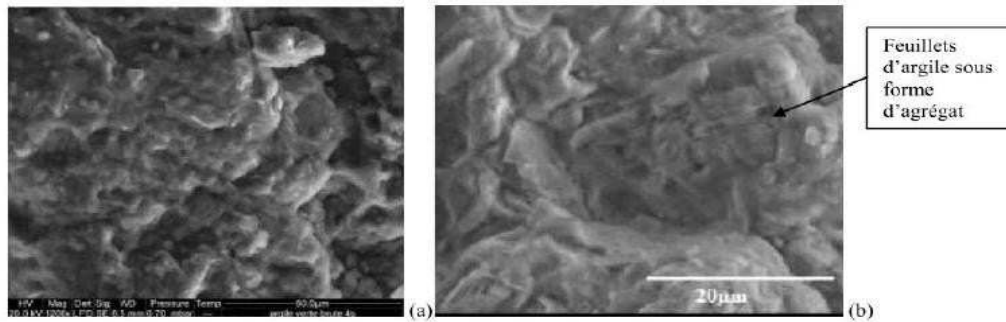


Figure II.14 : Photographie MEB de texture matricielle (a : Argile Verte de Romainville) et texture agrégé (b : Argile de Bavent) (Vincent et al. 2009, cité par Maison, 2011).

Il est rare de rencontrer des sols argileux composés uniquement d'argile, et au sein même de la fraction argileuse, plusieurs types d'argiles peuvent coexister. La texture des sols argileux peut varier fortement en fonction du type de minéraux argileux, du mode de sédimentation et de l'état de consolidation (Windal, 2001). Une roche argileuse qui présente une organisation serrée et orientée des particules d'argiles n'a pas le même gonflement qu'un sol argileux dont la sédimentation a été rapide et récente et pour lequel la distance entre les plaquettes est maximale. Cette organisation des minéraux argileux est la principale cause du gonflement anisotrope.

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

II.2.8 L'eau et les minéraux argileux

L'argile dans son milieu cherche à atteindre un certain équilibre chimique et physique vis-à-vis aux différentes réactions avec l'eau.

II.2.8.1 La forme de l'eau

L'eau est l'élément déterminant dans les propriétés des argiles, elle peut se présenter sous différentes formes dans la structure argileuse grâce à son caractère dipolaire, la molécule d'eau possède la propriété d'être attirée par l'intermédiaire de ses extrémités positives à la surface négative des minéraux argileux. Cette attraction modifie les propriétés hydrodynamiques de l'eau et cela dépend de la distance entre les molécules d'eau et la surface argileuse.

Deux types d'eau, existant dans la matrice argileuse, peuvent être distingués :

II.2.8.1.1 Eau liée

Elle est attachée à la surface des grains par le jeu de forces d'attraction moléculaire. Ces forces décroissent avec la distance entre les molécules d'eau et le grain. Une première couche adsorbée, dont l'épaisseur est de l'ordre de quelques dizaines de molécules (environ 50 Å), correspond à :

- L'eau des arrêtes et des cassures de la surface du réseau cristallin. Les molécules d'eau y sont retenues par des liaisons de coordination avec les éléments superficiels du réseau cristallin ;
- L'eau d'hydratation des cations échangeables ;
- L'eau de surface inter feuillet, répartie entre les différents feuillets des minéraux argileux, reliés entre eux par des liens hydrogènes existant entre les groupes OH^- et O^2- .

Dans cette couche adsorbée les propriétés de l'eau sont très fortement modifiées.

L'eau a la structure de la glace. La viscosité peut être supérieure de quelques dizaines de fois à celle de l'eau normale (Rosenqvist, 1959). La densité varie de 1,2 à 2,4 g/cm^3 (Yong et Warkentin, 1975). L'adsorption des molécules d'eau et des ions dépend en grande partie de la surface spécifique des argiles.

Une zone de transition d'eau dite "diffuse", entre 0,005 et 0,5 μm contient des molécules d'eau fixes et qui supportent encore une attraction non négligeable.

L'eau d'hydratation des argiles gonflantes (type smectites) correspond à de l'eau adsorbée et de l'eau diffuse, ou de l'eau faiblement liée.

II.2.8.1.2 Eau libre

Au-delà de 0,5 μm (Marsily, 1981), l'eau n'est retenue dans l'argile que par les forces capillaires et elle est capable de se déplacer sous l'effet de la gravité ou d'un gradient hydraulique suffisant. C'est l'eau libre, appelée aussi eau interstitielle. D'une façon générale, les forces mises en jeu sur l'eau par les particules d'argiles diminuent avec la distance (Fig. II.15).

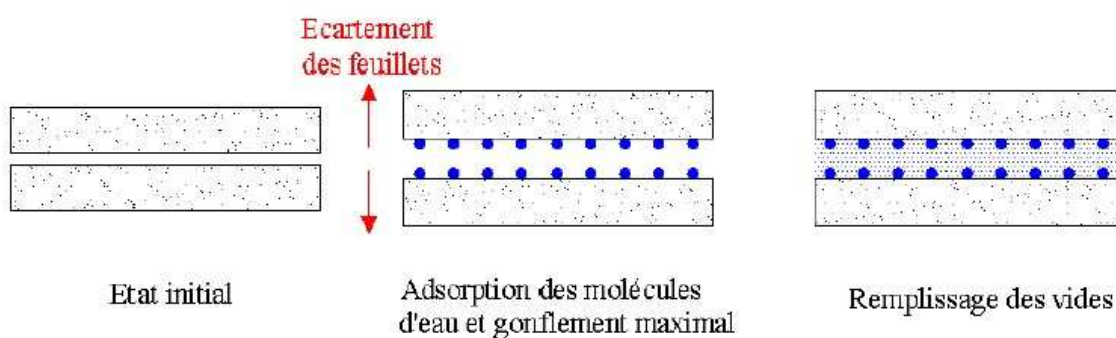


Figure II.15 : Gonflement et hydratation du matériau argileux.

Plus d'électrons d'un côté du noyau d'un atome que de l'autre, d'où la formation de dipôles qui se rattachent par leur côté opposé électriquement, les forces mises en jeu sont faibles mais additives (d'où leur importance) et diminuent très lentement avec la distance. Elles sont suffisamment fortes pour déterminer l'arrangement final de certains solides et elles sont une source majeure de

cohésion dans les sols fins (Mitchell 1976). Les forces d'adhésion dans les sols argileux "humides" sont principalement du type Van Der Waals (Rosenqvist 1959).

II.2.8.2 Interactions eau-argile

Au sein même d'une couche ou entre deux couches successives d'un même feuillet, les liaisons interatomiques sont des liaisons de valence primaire très fortes. Entre deux feuillets successifs, ces liaisons sont en général 10 à 100 fois moins fortes que les précédentes en raison des cations adsorbés. En effet, différents mécanismes d'interactions vont pouvoir s'établir, entre les feuillets chargés négativement et l'eau, dans l'espace inter foliaire (ou au voisinage de la surface externe d'une particule). Ces mécanismes sont les suivants (Low, 1961) ;(Mitchell, 1993) :

1) Liaisons hydrogène Entre les molécules d'eau et les oxygènes ou hydroxyles situés à la surface du feuillet : en effet, les atomes d'oxygène sont susceptibles d'attirer les pôles positifs de la molécule d'eau, de la même manière que les groupements hydroxyles attirent le pôle négatif de l'eau ;

2) Les forces d'attraction de van der Waals Du fait de la charge négative diffuse du feuillet, des liaisons électrostatiques du type van der Waals (attractives) peuvent s'établir entre l'eau et les sites où les charges négatives manifestent leur action attractive. Pour deux atomes, ces forces sont proportionnelles à l'inverse de la puissance septième de la distance d_f qui les sépare :

$F = K \times (d_f)^{-7}$ alors que pour des feuillets, elles s'expriment en $1/d_f^3$ de la distance séparant leur surface :

$$F = K \times (d_f)^{-3} \text{ (K est un constant) ;}$$

3) Hydratation des cations échangeables Les cations présents dans l'espace inter foliaire deviennent des sites privilégiés sur lesquels viennent se fixer les molécules d'eau, l'ensemble forme un polyèdre de coordination (Fripiat et Gatineau, 1984) ; (la fig. II.16) présente de manière schématique ces trois modes de liaisons possibles de l'eau inter foliaire ;

4) Attraction par osmose Plus on se rapproche de la surface chargée négativement du feuillet, plus la concentration des cations augmente ; afin d'annihiler ce gradient de concentration, les molécules d'eau ont tendance à se diffuser vers la surface (fig. II.17.a) ; Il notons que la concentration des cations adsorbés décroît exponentiellement au fur et à mesure que la distance à la particule augmente.

5) Analogie avec un condensateur Les surfaces argileuses peuvent être considérées comme le pôle négatif d'un condensateur ; les molécules d'eau orientent alors leurs pôles positifs en

direction des surfaces négatives ; au milieu de l'espace inter foliaire, les cations compensateurs vont s'interposer afin d'éviter d'avoir des pôles négatifs de l'eau adjacents l'un à l'autre (fig. II.17.b). Selon la force des liens unissant les feuillets d'argiles, ceux-ci autorisent ou non l'arrivée d'eau dans l'espace inter foliaire. Nous allons voir que pour certaines argiles (Kaolinites), l'eau ne peut s'engager entre les feuillets. Ces argiles sont faiblement gonflantes.

En revanche, dans les smectites, la faible liaison entre feuillets fait que chaque espace inter feuillets peut s'hydrater ; les smectites font partie des argiles dites « gonflantes ». L'amplitude du gonflement dépend de l'état initial et bien sûr des contraintes appliquées.

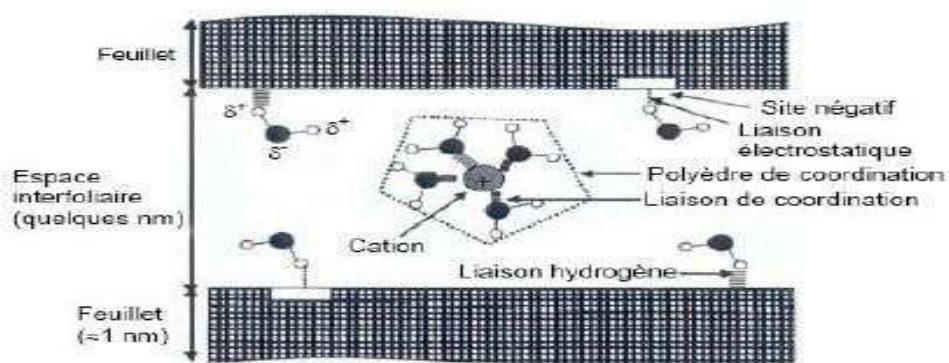


Figure II.16 : Liaisons possibles de l'eau inter foliaire (Morel, 1996).



Figure II.17 : Mécanisme d'adsorption de l'eau sur les surfaces argileuses

a) par osmose, b) Attraction dipolaire (Mitchell, 1993).

II.2.9 Caractéristiques minéralogique des argiles

Les principales caractéristiques des minéraux argileux qui influencent le gonflement sont les suivantes :

II.2.9.1 La surface spécifique (Ss)

La dimension d'une particule est exprimée par de nombreux auteurs par le concept de surface spécifique (Bolt, 1956 ; Komornik & David, 1969, Giroud et Bottéro, 1972.). Ce concept est

défini comme étant le rapport entre la surface (S) de l'ensemble des grains solides constituant l'échantillon et son poids.

$$S_s = \frac{S}{p} ;$$

Etant donné que les argiles sont composées de particules fines (diamètre < 2µm), leur surface spécifique est donc très élevée.

Des argiles sont composées de la surface externe comprise entre les particules et la surface interne correspondant à l'espace inter foliaire. L'augmentation de la surface spécifique donne un pouvoir de gonflement plus important et par conséquent un potentiel de gonflement plus élevé (Wakim j, 2005).

Tableau II.2 : quelques données sur les minéraux argileux

Type de minéraux	Surface spécifique (m ² /g)	Diamètre (µm)	Epaisseur du feuillet (µm)
kaolinite	10 - 20	0,3 - 3	0,7
Montmorillonite (Smectite)	800	0,1 - 2	1
Illite	80 - 100	0,1 - 2	1

II.2.9.2 La capacité d'échange cationique (CEC)

Les minéraux argileux ont la propriété d'interagir avec les cations ou les anions. L'échange des ions se fait autour de la surface extérieure de l'unité structurale. Les cations échangeables les plus connus sont le calcium (Ca⁺⁺), le magnésium (Mg⁺⁺), l'hydrogène (H⁺), le Potassium (K⁺), le nitrate (NH) et le sodium (Na⁺).

La Mesure de la capacité d'une argile à échanger des cations est exprimée en Milli équivalent par 100 grammes d'argiles et varie dans le même sens que la densité de charge surfacique. Donc, pour les argiles ayant une valeur élevée de CEC, elles ont tendance à peu gonfler, et cela à surfaces spécifiques égales (Lefevbre. I et A. Lajudie 1987), (Wakim j, 2005).

<i>Type de minéraux</i>	<i>Surface interne (m²/g)</i>	<i>Surface externe (m²/g)</i>	<i>Surface totale (m²/g)</i>	<i>C.E.C. (milliéquivalent/100g)</i>
kaolinite	0	10 - 30	10 - 30	5 - 15
Illite	20 - 55	80 - 120	100 - 175	10- 40
Montmorillonite (Smectite)	600 - 700	80	700 - 800	80 - 150

Tableau II.3 : Caractéristiques des argiles (Bultel, 2001).

II.2.9.3 La densité de charge spécifique (σ) :

Est égale au rapport entre la capacité d'échange cationique CEC et la surface spécifique S de la particule argileuse (wakim j, 2005).

$$\sigma \left(\frac{meq}{m^2} \right) = \frac{CEC}{s} \quad (1.1)$$

Deux types de charge existent dans les milieux argileux : Une charge permanente ou structurelle liée aux substitutions ioniques (Al³⁺ pour Si⁴⁺ dans la couche tétraédrique ; Mg²⁺ ou Fe²⁺ pour Al³⁺ dans la couche octaédrique), une charge de surface variable selon le pH du milieu liée aux réactions chimiques qui se produisent à la surface des minéraux. La densité de charge spécifique renseigne sur le pouvoir de la particule à repousser les autres, cette répulsion étant la capacité de gonflement des minéraux argileux. L'augmentation de la densité de charge spécifique réduit le gonflement ou la pression de gonflement des matériaux argileux. Cette augmentation entraîne l'attraction des ions, ce qui va provoquer une condensation de la double couche, donc une diminution de son épaisseur. (Wakim j, 2005).

Aussi, plus cette concentration est élevée, plus la couche est mince ou comprimée donc induit une diminution de gonflement.

II.3 Les dégâts que peut engendrer les sols argileux

II.3.1 Le phénomène de retrait-gonflement

Le retrait gonflement qui cause des fissures apparaissant clairement sur les constructions et sur les routes. Ces fissures occasionnent des ouvertures dans les fenêtres et les portes et elles se propagent dans la maçonnerie et la structure de l'ouvrage. Les ouvrages sont sujets au gonflement principalement dans la structure et la maçonnerie du bâtiment. Parmi ces derniers, Les maisons individuelles, construites sans mesures de précaution de construction sur ce type de sol, sont sujettes à des dégradations et des fissures au niveau des poteaux, des murs de remplissage et des

CHAPITRE II : les changements climatiques et les argiles

fondations (radier, semelle superficielle, ou filante et les pieux). Ces désordres résultent du caractère différentiel que prennent les mouvements du sol de fondation (terrassment ou gonflement) sollicitant la structure en flexion ou en cisaillement. Ces différences relatives de mouvement proviennent par ailleurs de l'hétérogénéité des sols de fondation, de celle des forces appliquées par la structure sur le sol, ainsi que des perturbations hydriques que le bâtiment peut engendrer.

Les dégâts causés aux structures des bâtiments reposant sur des sols fins gonflants aux U.S.A(1976) ont été chiffrés à environ 2.25 milliards de dollars.

a). Cas des bâtiments :



Figure II.18 : Fissure sur les murs et Fissures diagonales. Ferrah (2006)

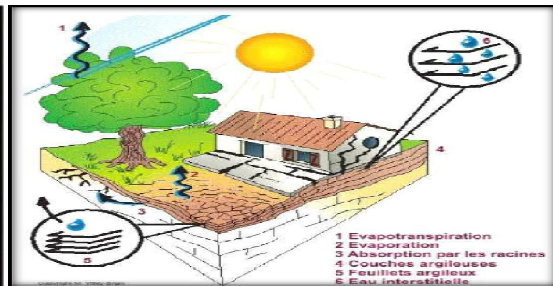


Figure II.19 : Risque à prendre en compte lors de la construction. Ferrah (2006)

b). Cas des chaussées : Le gonflement peut provoquer des désordres importants à la structure de la chaussée. Ce phénomène est causé par des variations de teneur en eau du sous sol. Il peut être attribué au climat et à la surcharge. D'autres auteurs signalent que sur les routes d'importance moyenne, il ya apparition de divers types de fissures. Les désordres subits par la chaussée se résument.

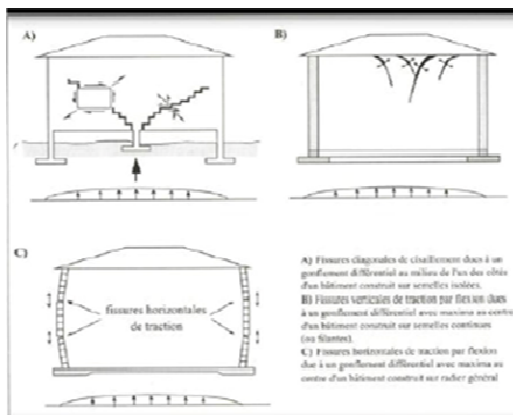


Figure II.20 : Formes de fissuration Sur des Bâtiments Reposant sur des terrains gonflants. Ferrah (2006)

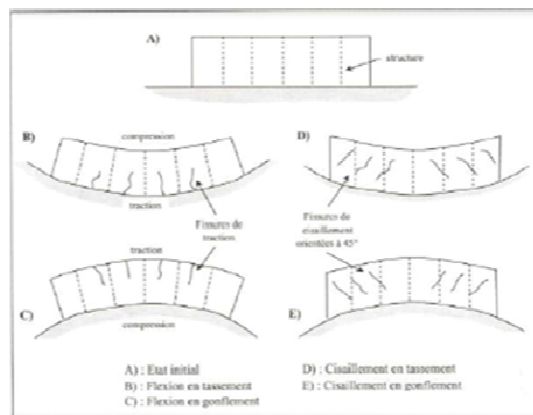


Figure II.21: Formes de Dégâts Sur des Bâtiments Reposant sur des terrains gonflants. Ferrah (2006)



Figure II.22 : Dégradation des routes (freeah 2006).



Figure II.23 : Dégradation de la route RN15, village Soumer.

II.3.1.1 Nature du phénomène :

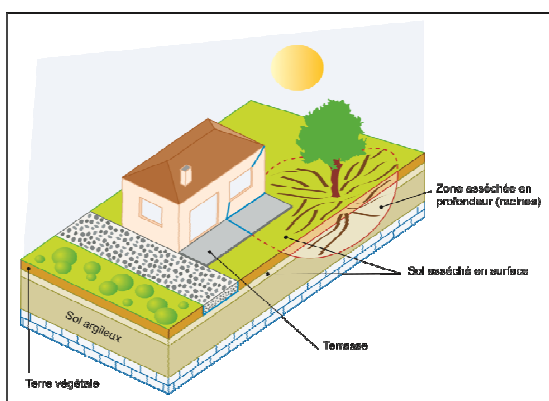


Figure II.24: Vue d'une maison individuelle soumise à des phénomènes de retrait-gonflement (2017-GT14.1 guidetechnique).

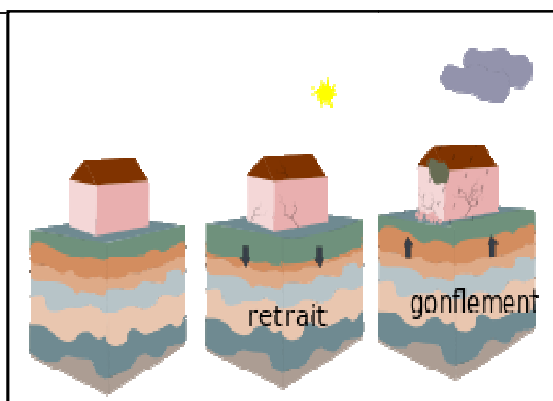


Figure II.25 : Schéma simplifié de deux sources de désordre sur une maison construite dans fondations suffisantes sur un sol argileux. (Philipponnat G (1991))

Comme une éponge sèche mise en contact avec une surface humide, les sols argileux et marneux secs gonflent et deviennent plus mous en présence d'eau. Quand l'eau quitte ces sols, ils sont soumis à un phénomène de retrait, leur volume diminue, ils durcissent et des fentes de dessiccation peuvent apparaître. Ces phénomènes sont liés d'une part à la microstructure et d'autre part à la nature des particules argileuses et des minéraux qui les constituent. Dans la nature, l'alternance de périodes sèches et de périodes humides et la présence d'arbres, de terrasses, de fossés, de constructions Etc. peuvent être à l'origine de ces phénomènes de retrait et de gonflement. Ceux-ci peuvent provoquer des tassements ou des soulèvements différentiels et entraîner des désordres (2017-GT14.1-guidetechnique). En général, le retrait/gonflement des sols se caractérise par des mouvements de terrains différentiels de petite amplitude, provoqués par des variations de volume de certains sols argileux lorsque leur teneur en eau se modifie. Cet aléa ne concerne que certains sols argileux particulièrement en présence de minéraux gonflants. Les sables et les limons sableux présentent également des cycles de retrait et de gonflement suivant les fluctuations de leur teneur en eau, mais d'une amplitude bien plus petite. Ce phénomène est à

l'origine des dégâts importants aux bâtis au cours des périodes de sécheresse prolongée (Figure II.26). En climat tempéré, les argiles sont souvent proches de leur état de saturation, si bien que leur potentiel de gonflement est relativement limité, elles sont donc éloignées de leur limite de retrait, ce qui explique que les mouvements les plus importants sont observés en période sèche. La sécheresse se traduit par une baisse du niveau des nappes. La tranche la plus superficielle de sol, sur 1 à 2 m de profondeur, est alors soumise à l'évaporation. Il en résulte un retrait des argiles, qui se manifeste verticalement par un tassement et horizontalement par l'ouverture des fissures, classiquement observées dans les fonds de mares qui s'assèchent.



Figure II.26 : Désordres de la structure au cours des périodes de sécheresse (Région bordelaise).

Les mouvements du sol qui sont à l'origine des désordres des constructions sont dus essentiellement aux diminutions de teneur en eau. De nombreux facteurs sont susceptibles de modifier les conditions d'équilibre hydrique des sols. Le principal facteur de prédisposition est lié à la nature du sol et à la géométrie des couches. La végétation voisine de la construction exerce un rôle aggravant. En effet, la présence d'arbres accentue l'ampleur du phénomène en augmentant l'épaisseur du sol asséché. Les racines soutirent l'eau du sol, et peuvent s'étendre jusqu'à 1,5 fois la hauteur de l'arbre. Certains facteurs complémentaires interviennent : circulation d'eau, drains, fuite de réseaux, etc. Pour limiter l'effet de ces facteurs secondaires, le principe général sera de rechercher une atténuation des variations d'humidité. Par ailleurs, lors de précipitations, les sols se réhumidifient, ils gonflent et des soulèvements différentiels peuvent être à l'origine de nouveaux désordres. Contrairement aux phénomènes de tassement par consolidation, les effets ne s'atténuent pas avec le temps mais augmentent quand la structure perd de sa rigidité. Les sols gonflants compactés, en raison de leur très faible perméabilité, sont utilisés pour la construction de bassins de rétention ainsi que de barrières ouvragées dans les sites de stockage de déchets nucléaires. En effet, ces matériaux possèdent des propriétés qui répondent favorablement aux exigences posées par le problème d'enfouissement des déchets aussi bien en surface qu'en grande profondeur. Après leur mise en place, ces matériaux sont soumis à des

sollicitations complexes qui peuvent influencer de manière très importante leurs propriétés hydromécaniques (Hossein. N, 2007).

II.3.1.2 Double Structure Des Sols Gonflants

Le comportement hydromécanique des sols gonflants a été directement relié à leur double structure interne. Plusieurs auteurs ont étudié la relation entre la micro- et la macrostructure de ce type de sol et les paramètres hydromécaniques (Pusch 1982, Wan et al. 1995, Pusch et al. 1999, Cui et al. 2002, Pusch & Yong 2003, Lloret et al. 2003). Gens & Alonso (1992) et Alonso et al. (1999) ont considéré le schéma d'organisation comme fondement de leur modèle de comportement des sols gonflants où sont réunies la macro- et la microstructure.

La distribution de taille des pores (Pore Size Distribution - PSD) obtenue par la méthode de porosimétrie par l'intrusion du mercure (Mercury Intrusion Porosimetry - MIP) montre deux niveaux structuraux distincts (Alonso et al. 1987). Cette double structure des sols argileux a été aussi reconnue dans un grand nombre à partir d'études réalisées au microscope électronique à balayage (Collins & McGown, 1974 ; Yong & Warkentin, 1975 ; Gilliot, 1979).

La (fig.II.27-a) présente un matériau constitué d'une matrice homogène formée à partir des argiles et d'autres constituants. Il est alors possible de distinguer deux types de pores :

Les vides intra particulaires et les vides intra matrices. Cette structure est typique des sols compactés du côté humide de l'optimum. La (fig.II.27-b) est représentative de la majorité des sols naturels ou compactés du côté sec de l'optimum, les particules argileuses s'associent aux autres constituants du sol pour former des agrégats. Deux niveaux structuraux peuvent alors être distingués : la microstructure qui correspond aux agrégats, et la macrostructure qui correspond à l'arrangement des agrégats entre eux. Les agrégats contiennent des pores qualifiés de micropores et les macropores sont situés entre les agrégats. Barden & Sides (1970), Sridharan et al. (1971) et Collins & McGown (1974) ont aussi observé une double structure au côté sec de l'optimum et une structure homogène au côté humide de l'optimum.

Remarque: le « micropore » est aussi appelé « pore intra-agrégat », « vide intra particulaire », « vide inter foliaire » et le « macropore » peut être appelé « pore inter-agrégat » et « pore inter particulaire ».

L'ensemble micro- et macrostructure est parfois définie comme « intrapellet ».

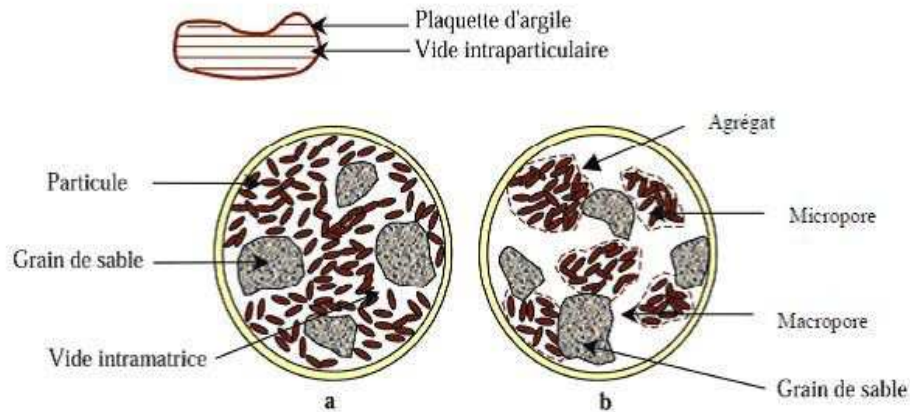


Figure II.27 : Structure des sols gonflants (Gens & Alonso, 1992).

La structure interne des sols argileux est directement liée à certaines caractéristiques du sol telles que : la conductivité hydraulique (Garcia-Bengochea et al. 1979, Juang&Holtz 1986, Lapiere et al. 1990, Romero et al. 1999), les déformations volumiques lors de la consolidation (Delage & Lefebvre 1984, Griffiths & Joshi 1989, Coulon&Bruand 1989, Tessier et al. 1992), les propriétés de la courbe de rétention (Prapahran et al. 1985, Romero et al. 1999, Aung et al. 2001, Simms&Yanful 2002, 2005) ainsi que les variations volumiques des macro pores dues aux influences de chargement mécanique et des succions contrôlées (Al Mukhtar et al. 1996, Qi et al. 1996, Cui et al. 2002, Lloret et al. 2003, Simms&Yanful 2004, Cuisinier &Laloui 2004, Romero et al. 2005, Koliji et al. 2006, Hoffmann et al.2007).

II.3.2 Gonflement des argiles

Dans cette partie, nous allons voir le mécanisme de gonflement hydrique et les paramètres identifiant les sols gonflants. Les différents essais de gonflement très utilisés en géotechnique.

II.3.2.1 Mécanisme de gonflement des argiles

Les analyses minéralogiques montrent que certaines argiles, pour lesquelles les liaisons inter feuillettes sont très faibles, ont la propriété de fixer les molécules d'eau entre deux feuillets voisins. L'eau pénètre à l'intérieur des particules et s'organise en couches mono moléculaires, il s'agit alors d'un gonflement intra particulaire ou inter foliaire. C'est le cas des smectites telles que la montmorillonite sodique et dans une moindre mesure de la montmorillonite calcique (Olson&Mesri, 1971 ; Tessier, 1984) ; Cases et al, 1990). Ce gonflement intervient à l'échelle la plus petite de la structure argileuse mais peut présenter une ampleur très importante.

En dehors de ce cas particulier, qui définit les argiles dites "gonflantes", le gonflement est inter particulaire, c'est-à-dire que l'eau ne pénètre pas à l'intérieur des particules d'argiles. Ce gonflement inter particulaire, contrairement au gonflement inter foliaire, a une ampleur assez

limitée, mais affecte toutes les argiles. Le processus de gonflement inter particulaire met en jeu séparément ou de façon combinée des phénomènes physico-chimiques et mécaniques variés. Compte tenu de la structure ionique, il apparaît d'importantes interactions physico-chimiques entre une particule argileuse et l'eau, généralement illustrées par le modèle de la double couche diffuse (Double Diffused Layer).

Les cations compensateurs ne sont pas maintenus directement à la surface de la particule argileuse mais sont présents à une certaine distance moyenne de la surface. Il s'établit un équilibre entre l'agitation thermique des ions, qui tend à les éloigner de la particule, et l'attraction coulombienne, qui tend à les maintenir près du feuillet. L'ensemble particule chargée négativement plus espace inter foliaire globalement chargé positivement constitue la double couche diffuse (Fig.II.28). Avec des hypothèses très précises, cette théorie proposée par Gouy & Chapman en 1910 permet de quantifier le phénomène de gonflement par rapport aux différents paramètres de l'eau.

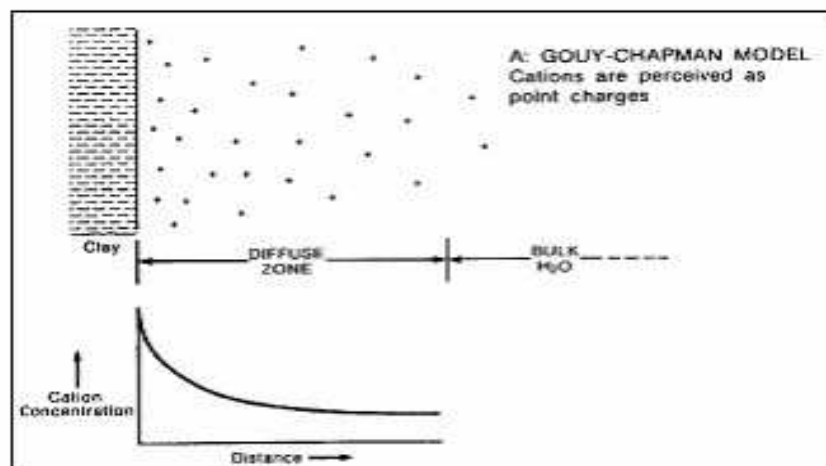


Figure II.28 : Représentation schématique de la double couche diffuse.

De nombreux auteurs se sont intéressés à la validité et aux limites de cette théorie. Dans une étude expérimentale en laboratoire, Didier (1972) et Wong (1998) ont mis en évidence l'influence notable de la salinité du liquide interstitiel sur le potentiel de gonflement des terrains argileux. En effet, Ils ont constaté que plus la concentration en sels (Na-Cl par exemple) est faible, plus les déformations par gonflement sont élevées. Ainsi Yong & Mohamed (1992) montrent un très bon accord entre des mesures expérimentales et la théorie, en se basant sur l'étude de la distance inter foliaire et de la pression de gonflement. Cette théorie a aussi été utilisée avec succès dans le calcul de la compressibilité mécanique des matériaux gonflants (Sridharan & Venkatappa Rao 1973 ; Sridharan & Jayaveda 1982).

La théorie de la double couche reste évidemment limitée, à cause des hypothèses faites sur le milieu (pas d'interaction entre les ions, problème bidimensionnel, particules parallèles, ...). On

peut, en première approximation, dire que la théorie de la double couche est applicable quand la source du gonflement est la pression de répulsion osmotique, c'est à- dire quand on étudie les sols sursaturés en cations en présence d'une eau de circulation à faible concentration ionique. Sposito (1973) indique que la théorie de la double couche ne prédit pas de manière satisfaisante le gonflement lorsque la solution contient des cations bivalents. Low (1980), à partir d'une série d'expériences menées sur 35 montmorillonites sodiques, montre que la théorie de la double couche est, soit fausse, soit inapplicable pour prédire le gonflement des montmorillonites, car leurs doubles couches ne sont que faiblement développées. Le gonflement est alors expliqué par l'interaction entre les feuillets argileux et l'eau c'est-à-dire le gonflement intra particulaire.

De plus, lorsque les argiles ne sont plus saturées, d'autres forces deviennent prépondérantes dans l'hydratation des argiles, notamment les forces d'attraction dues aux charges électriques, les forces de Van der Waals de tension capillaire et les forces dérivant de l'énergie d'hydratation des cations échangeables. L'ensemble de ces forces constitue la force de succion qui agit directement sur les molécules d'eau, polaires par nature.

II.3.3 Les fissures

Les périodes de gel durant l'hiver, ou d'alternance de périodes de sécheresse en été, créent des cycles d'humectation et de dessiccation des sols. Sur un sol contenant au moins 20% d'argiles (type smectites), ces cycles humectation dessiccation permettent de créer de la fissuration, donc une porosité d'origine climatique, aussi appelée fissurale. Cette fissuration, très souvent visible en surface des sols lors de périodes sèches, conduit également à former des agrégats de type anguleux. Le mécanisme responsable de cette fissuration est celui du gonflement-retrait des argiles. En effet, dans certaines familles d'argiles (de type smectites), les feuillets d'argiles ont la capacité à se gonfler sous l'action de l'eau puis de se rétracter lors de période sèche. L'alternance de ce phénomène conduit à une fissuration avec des points d'entrée d'air. La propriété du sol qui détermine le comportement des sols face à ce phénomène est nommé activité structurale ou aptitude à la fissuration.

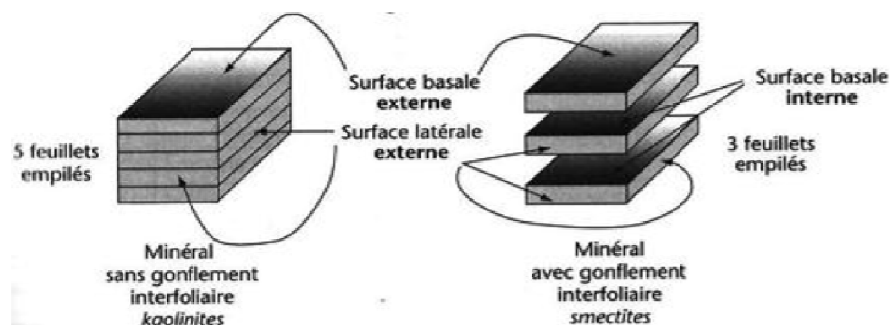


Figure II.29 : Schéma de mécanisme de gonflement - retrait des argiles (Calvet, R, 2009).

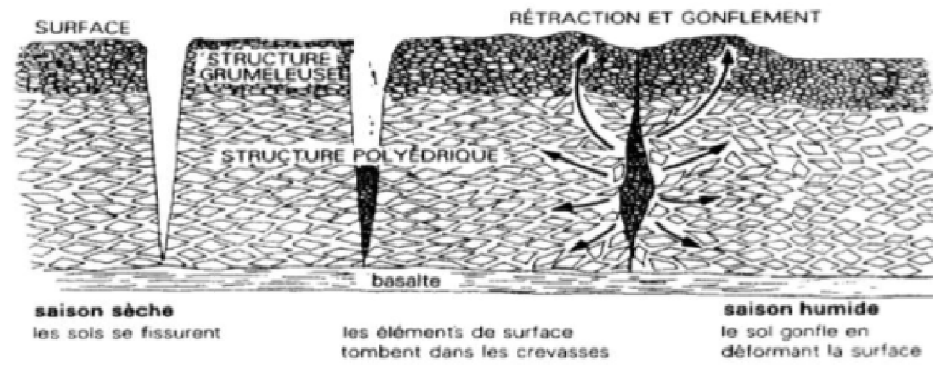


Figure II.30: Conséquence du gonflement des argiles dans la déstructuration d'un sol (Fagel.N, 2005).



Figure II.31: développement des fissures.

II.4 Instabilité des fondations par le phénomène de retrait-gonflement :

Le retrait-gonflement est un phénomène spécifique aux sols fins argileux, il est lié aux variations de teneur en eau des terrains argileux qui gonflent avec l'humidité et se rétractent avec la sécheresse, (Fig. II.32).



Etat initial. Retrait. Gonflement.

Figure II.32 : Phénomène de retrait-gonflement.

Ces variations de volume induisent par la suite des tassements plus ou moins uniformes et dont l'amplitude varie suivant la configuration et l'ampleur du phénomène, ainsi, est perturbée la stabilité des fondations.

D'autres cas d'instabilité peuvent être également rencontrée, à savoir :

- Instabilité des fondations descendues à une profondeur insuffisante.
- Instabilité des fondations due à des bâtiments accolés édifiés à des époques différentes.

-Instabilité des fondations due au phénomène gel-dégel.

Les différentes observations effectuées sur le terrain ont permis de déceler divers indices d'instabilité. Suivant le mécanisme de leur déclenchement, l'importance du volume des terres affectées et les désordres générés, ils ont été distingués le type suivant :

- Retrait et gonflements ; des instabilités superficielles dues au phénomène du retrait-gonflement. La couverture argileuse, produit d'altération de la formation marneuse est régulièrement sujette au phénomène de retrait gonflement, résultant des cycles humidification - dessiccation.

II.5 Effet du temps sur le comportement des argiles

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

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

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

- Les effets de la vitesse ou de la durée de chargement : Crawford (1964) puis Bjerrum (1967) ont montré que la pression de pré consolidation apparente (définie par la limite des petites déformations) d'une argile naturelle est réduite lorsque la durée d'application des

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

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

II.6 Conclusion

Le nombre de cas pathologiques liés au retrait-gonflement des sols argileux est en augmentation à cause des changements climatiques, que la terre ait connu ces dernières années. La prévision et la caractérisation des argiles gonflantes peuvent se faire en rassemblant le maximum de données à partir des études géologiques, minéralogiques et géotechniques et en étudiant les facteurs environnementaux à l'exemple du climat, des venues d'eau, de la contrainte du chargement, etc.

Ces phénomènes induisent des tassements différentiels que se manifestent par des désordres affectant principalement les ouvrages de Génie Civil.



Chapitre III

***Détermination de la
dimension fractale***

III.1 Introduction

La géométrie fractale a été développée pour décrire et quantifier des objets mathématiques, comme les ensembles de Cantor, la courbe de Koch ou le tapis de Sierpinski, dont l'autosimilarité enlève toute signification aux mesures habituelles de longueur, de surface ou de volume, cette nouvelle géométrie fournit des notions applicables aux formes naturelles. En effet ce concept a permis d'expliquer des formes qui semblaient d'autant plus inexplicables qu'elles n'étaient régies par aucune loi. Plusieurs définitions et plusieurs méthodes ont été utilisées pour la dimension fractale dans des domaines différents au cours de son développement.

Dans ce présent chapitre, on va exposer les principales et les plus courantes définitions et lois de la dimension fractale appliquées dans le domaine de Génie civil et plus précisément une méthode fractale bidimensionnelle (2D) et une autre tridimensionnelle (3D).

III.2 Définition de la géométrie fractale

La capacité de la géométrie fractale à décrire de manière quantitative des processus naturels lui a permis d'être appliqué aux arts et technologies virtuelles. Toutefois, sa diffusion et son application sont venues réécrire les définitions apportées par Benoit Mandelbrot, qui elle était beaucoup plus générales. L'application aux systèmes urbains doit donc s'approprier sa définition initiale pour être applicable (Guillemette, P.A, 2016).

III.2.1 Origine de la géométrie fractale

La géométrie fractale permet de caractériser les géométries irrégulières et fragmentées telles que les formes naturelles. (Mandelbrot, 1983). Le concept des fractales apparaît en 1967, quand Benoit Mandelbrot répond à un problème posé précédemment par J.F Richardson : comment mesurer la longueur de la côte maritime d'un pays si elle dépend directement de l'unité de mesure (G) utilisée? Son équation démontrait que la mesure de la longueur (L(G)) est fonction de l'unité de mesure (G) ainsi que deux constantes : une constante positive (F) et une seconde supérieure à 1 (D) (Richardson, 1961).

$$\log(L(G)) = (1-D) \log(G) + \log(F) \quad \text{(III.1)}$$

Mandelbrot note alors que lorsque les valeurs de G restent les mêmes et que la valeur de la constante D dans l'équation présentée par Richardson varie, plusieurs courbes irrégulières distinctes sont dessinées. La constante D dans l'équation évoque la perception humaine de l'irrégularité, En géométrie euclidienne, on travaille avec des dimensions entières 0, 1, 2, 3,

Par exemple, pour une surface lisse, la valeur serait de 1.00 alors que pour la côte d'Angleterre qui est très irrégulière, elle est de 1.25, La dimension d'un point est zéro (0), une ligne droite a pour support un espace de dimension un (1), un plan est un espace de dimension deux (2), un volume est inscrit dans un espace de dimension trois (3).

Les fractales sont des formes géométriques dont les dimensions se situent entre deux dimensions topologiques : elles sont irrégulières. Dans le cas du problème de Richardson, ce n'est pas l'unité de grandeur qui fait varier la mesure finale mais plutôt l'échelle de mesure de son irrégularité (Mandelbrot, 1967). La valeur de D dans l'équation de Richardson indique alors qu'il est possible d'utiliser une valeur aux numériques approximant les mesures avec les échelles de mesures inférieures à l'unité de mesure utilisée dans l'équation (Pentland, 1984). La dimension fractale permettait donc de limiter le biais associé à l'unité de mesure utilisée pour mesurer le périmètre de la côte d'un pays.

III.2.2 Mesure de la dimension fractale

Afin d'éviter les limites de la dimension de Hausdorff-Besicovitch, plusieurs techniques ont donc émergé pour mesurer la dimension fractale de formes irrégulières (Mandelbrot, 1983; Jin et al, 1995). La dimension de Minkoswky-Bouligand, communément appelé le *box counting method* est la plus utilisée car elle est la plus versatile. Il s'agit de la méthode la plus simple et son calcul peut être automatisé. (Li et Al, 2009). Il s'agit aussi d'une méthode qui peut être utilisée pour toutes les sortes de fractales (Foroutan-pour et Al., 1999). Elle est généralement associée à une mesure de la densité (Smith et al, 1996).

La méthode consiste à couvrir une surface de boîtes mutuellement exclusives pour ensuite compter la quantité de boîtes qui contiennent des points de l'ensemble fractal (Yadov et al, 2010). Deux valeurs sont alors prises et enregistrées : la dimension des boîtes, ϵ , avec lesquelles on couvre le territoire et la quantité de boîtes qui sont couvertes par l'ensemble géométrique, $N(\epsilon)$ (Foroutan-pour et al, 1999). La dimension des boîtes change sur plusieurs échelles de grandeur. Ensuite, la dimension fractale pour chaque échelle de grandeur est calculée en utilisant l'équation (III.2). La moyenne des différentes échelles de grandeur est ensuite calculée pour estimer la dimension fractale sur une échelle globale. Toutefois, pour la calculer, il faut prendre en compte certains paramètres.

$$D_f = \log(N(\epsilon) / \log(1/\epsilon)) \quad \text{(III.2)}$$

La mesure de la dimension fractale par la méthode du comptage de boîtes est remplie de problèmes pratiques (Gonzato et Al, 2000). Dans l'analyse de données réelles, même avec la même méthode, si les échelles de grandeur choisies pour mesurer la dimension fractale sont

différentes, le résultat sera différent (Jin et Ong, 1995). Il faut donc pour faire des analyses comparatives, utiliser toujours les mêmes échelles de grandeurs. Sinon, les résultats n'exprimeront pas les mêmes mesures. La manière dont l'image est circonscrite dans l'espace a aussi un effet important sur la mesure de la dimension fractale. Pour prendre une bonne mesure, il faut que les limites de l'espace mesurées coïncident avec la largeur de la forme. Il est donc important que la forme géométrique touche aux limites de l'espace mesuré, sinon, la dimension fractale est sous-estimée par la mesure du vide qui entoure l'ensemble géométrique. Le biais occasionné par une mauvaise calibration est généralement limité à quelques pour cent (Gonzato et al, 2000). Le choix des dimensions des boîtes qui seront utilisées pour calculer la dimension fractale est un autre paramètre qui fera varier la qualité et la précision de la mesure. Leurs grosseurs doivent être incluses entre deux contraintes limites: de la saturation au point ponctuel. Autrement, la densité de de l'occupation du territoire fera varier la valeur de la dimension fractale et la mesure perd en précision. La limite supérieure de la dimension des boîtes utilisées dépend du point de saturation. Si les boîtes sont toutes saturées, la valeur de la dimension fractale sera modifiée, car elle sera de 2 pour toutes les autres mesures subséquentes (Halley et al, 2004). Généralement, il s'agit d'une surface d'environ 25 % de la surface totale, mais cela peut varier dans le cas d'ensembles géométriques qui sont plus dispersés (Foroutan-pour et al, 1999). Pour la frontière inférieure, c'est à l'évaluateur de mesurer la plus petite dimension : elle doit se résumer à une ponctualité contextuelle si l'on mesure des objets. Ainsi, dans un système comme un écosystème forestier, un arbre est une ponctualité dans une échelle d'un kilomètre. L'usage d'une échelle de boîtes d'un mètre de côté agit alors plutôt comme une mesure de remplissage, il faut ajuster la dimension des boîtes en fonction des objets mesurés (Kunin et al, 2000). Cependant, si l'on cherche à mesurer la distribution de la biomasse par exemple, la limite inférieure est beaucoup plus fine, car on cherche la couverture du territoire et non l'individu. (Halley et al, 2004). Le choix de la dimension des boîtes pour chacun des extrêmes est donc un facteur important qui va varier en fonction du type de mesure désiré.

L'orientation des formes géométriques peut aussi mener à un biais dans certains cas. Comme la distribution des boîtes est sous la forme d'une grille, lorsque l'on mesure des courbes, la valeur peut varier en fonction de l'angle de mesure. La variation de la valeur obtenue par rapport à l'angle de la forme est due au format numérique de la mesure. L'approximation de la forme géométrique en angle par des pixels, donne une courbe en forme d'escalier créé par les doubles pixels, un peu comme un escalier et non une droite. Dans le cas de la mesure de lignes brisées ou de géométrie fine, il peut donc s'agir d'une cause d'incertitude importante.

Ce biais est alors généralement d'environ 11 % supérieur à la valeur réelle (Gonzato et al, 2000). Finalement, différentes configurations spatiales peuvent avoir la même dimension fractale (Dong, 2000, Mandelbrot, 1983). Il s'agit de la limite principale de la dimension fractale : une même valeur peut avoir différentes dispositions spatiales, mais un seul indice d'occupation de l'espace (Plotnick et al, 1993; Hanen et al 2009). La dimension fractale ne peut discriminer les ensembles géométriques dans ces cas.

III.2.3 Surfaces fractales

L'extension aux surfaces du concept de dimension fractale relève généralement de la modification de la forme d'une surface par un processus physique d'actions locales. Il existe trois catégories de surfaces fractales présentées dans la figure III.1 (Boutot. A, 1993; Russ.J.C, 1994).

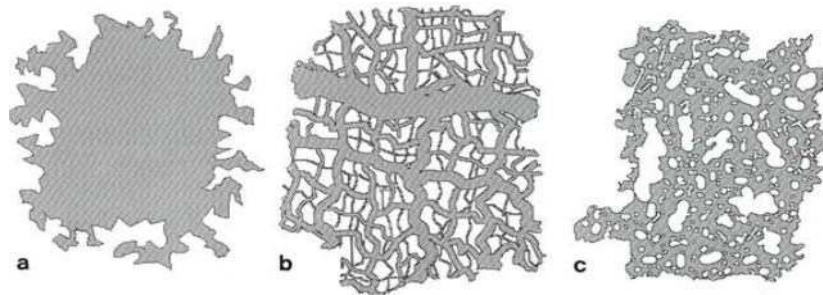


Figure III.1 : Classification de surfaces fractales en trois catégories (Boutot. A, 1993 ; Russ. J.C, 1994).

a) Les fractales de surface ou "contour fractal" peuvent être de type réseau de fibres (par exemple le système vasculaire et nerveux humain), ou plutôt sous la forme d'un ensemble de différents types de fibres, comme le serait par exemple, l'ensemble de celles utilisées pour filtrer les matériaux absorbants. La perméabilité, la capacité d'absorption et d'autres propriétés de telles structures sont liées probablement à la structure fractale. Toutefois, cette classe d'objets n'a pas de surface (dans le sens commun de l'ingénierie) qui puisse être mesurée. Par contre, les faisceaux de particules agglomérées par des processus de diffusion, engendrent le même type de réseau ramifié, et peuvent être décrits par la géométrie fractale.

b) Les fractales de masse (réseau ou faisceaux de particules résultant d'un phénomène d'agglomération) représentent, quant à elles, une structure dans laquelle différentes surfaces présentent une invariance au changement de l'échelle de représentation. Ces surfaces peuvent être auto-similaires (lorsqu'elles peuvent résulter, dans un grand nombre de cas, de l'addition

ou de l'éloignement de matériaux) ou auto-affinées (lorsqu'elles résultent de la suite de processus industriels). La notion d'autosimilarité ou d'autosimilarités régissant certaines fractales est particulièrement importante. Elle signifie, comme d'ailleurs pour certaines courbes fractales, que toute partie de la surface, excepté sa taille, a la même forme que le tout. Par contre, l'auto-affinité traduit, pour la surface étudiée, un agrandissement égal dans toutes les directions. Du fait de sa lacunarité, une fractale de masse doit vérifier la relation : $1 < DF < 3$. Plus elle est lacunaire plus sa dimension fractale est petite, tout en restant supérieure à 1, parce que l'objet est continu. Si la structure est discontinue, celle-ci pourra être assimilée à un ensemble de points de dimension fractale $DF > 0$.

c) La fractale de porosité représente un objet dense contenant des pores, comme par exemple, les céramiques poreuses, les sols sédimentaires et les pierres qui contiennent des réserves souterraines de pétrole. Ce sont les caractéristiques fractales de son réseau de pores qui déterminent sa perméabilité.

Il est à noter que les mesures sur une surface, bien que parfaitement définie, d'une fractale de porosité, n'en dévoilent nullement l'aire totale ; encore moins l'importance de la typologie tridimensionnelle ou les dimensions de la structure du pore.

III.2.4 Dimension

L'analyse de la texture d'image d'un grain ou d'un échantillon du sol donné peut être essentielle pour plus d'une raison. Nous pouvons avoir besoin de trouver différentes régions dans une image d'un grain qui sont séparées par leurs textures distinctives. On peut utiliser l'analyse de texture pour déterminer si une texture particulière, connue a priori, est présente ou non dans une image donnée. Ceci est connu comme « la classification de texture ». Une telle classification a des applications où il est souvent besoin d'égaliser ou de comparer deux textures différentes et d'identifier le degré de similarité ; par exemple, le critère de classification peut avoir pour objectif de différencier entre les textures d'un grain avant et après écrasement.

Mandelbrot a développé plusieurs modèles mathématiques fractals. Le premier paramètre caractérisant est la dimension fractale. Pour le cas d'une surface, cette dimension est une notion très proche de celle de la rugosité. En effet, si on génère des surfaces avec une même forme mais avec des dimensions fractales différentes, on remarque une croissance de la rugosité du sol avec cette dimension (Figure III.2).

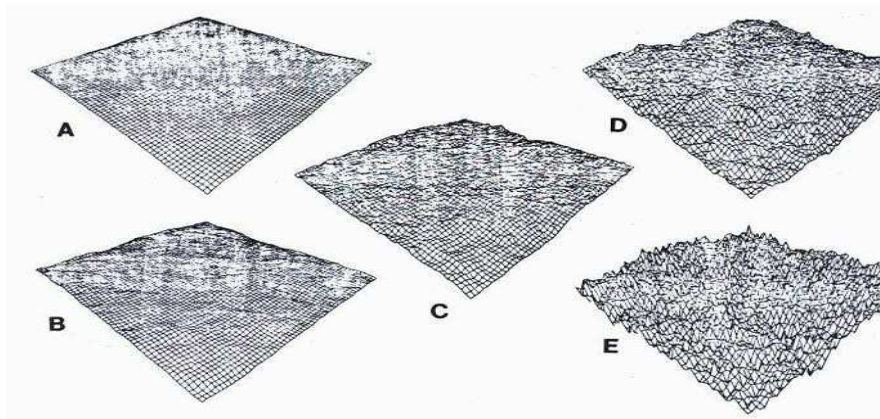


Figure III.2: La rugosité de la surface augmente avec la croissance de la dimension fractale, A ($D \approx 2$), B ($D \approx 2.1$), C ($D \approx 2.3$), D ($D \approx 2.5$), E ($D \approx 2.8$) (Petland, 1984).

Les résultats montrent l'utilité de ce paramètre dans une description précise d'une surface naturelle. Les possibilités d'imagerie rapides de plus en plus performantes ont conduit à la mise au point de séquences d'acquisition 3D. De ce fait, les méthodes d'analyse de texture ont été contraintes à s'adapter. Or, aujourd'hui encore la plupart des calculs de la géométrie fractale ont été testés uniquement en 2D. Il y a encore peu d'applications concernant leur utilisation sur les images 3D.

Une autre application peut être l'extraction ou la construction de surfaces 3D à partir des variations des propriétés texturales d'une image. Une telle application nous aide à recréer la surface 3D dont la projection sur une image 2D est la texture donnée (Figure III.3). Comme la texture ne peut être complètement décrite en une définition particulière, nous ne pouvons pas non plus trouver juste une seule manière qui nous permette de caractériser complètement une texture donnée et d'extraire ses traits caractéristiques avec succès pour toutes les différentes applications. En conséquence, il y a différentes approches pour analyser la texture selon le genre d'application et le type de texture qui doit être analysée.

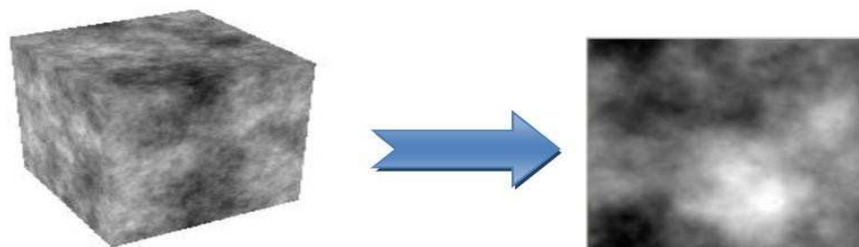


Figure III.3: Une fractale 3D et sa projection 2D (Lemineur. G et al, 2003).

Pour ce faire et dans le but de surmonter la contrainte rencontrée par la méthode de Comptage de Boîtes (CB, méthode de Russel), Sarkar et Chaudhuri ont proposé en 1992 la méthode dite Comptage Différentiel de Boîtes (CDB) (Sarkar. NetChaudhuri. B.B, 1992).

III.3 Application à la dimension fractale

- ✚ **Le flocon de Von Koch** La courbe de Von Koch a été décrite et démontrée en 1906 par le Mathématicien Suédois Helge von Koch (1870-1924). Elle est définie comme quatre copies d'elle-même trois fois plus petites. Sa dimension fractale s'exprime selon la dimension de Hausdorff-Besicovitch, elle est $D=1,269$ (Coralie.A, 2013/2014).
- ✚ **Calcul de la dimension fractale du flocon de Von Koch par la méthode de compactage des boîtes** Le carré initial a des côtés de longueur L . En faisant des pas 3 fois plus petits, c'est à dire en divisant ce carré en neuf carrés de même surface, le nombre de pas à faire est 3^D fois plus grand, où D est la dimension de l'objet fractal: le flocon de Koch.
- ✚ **Le triangle de Sierpinski** Connue sous le nom de triangle de Sierpinski,

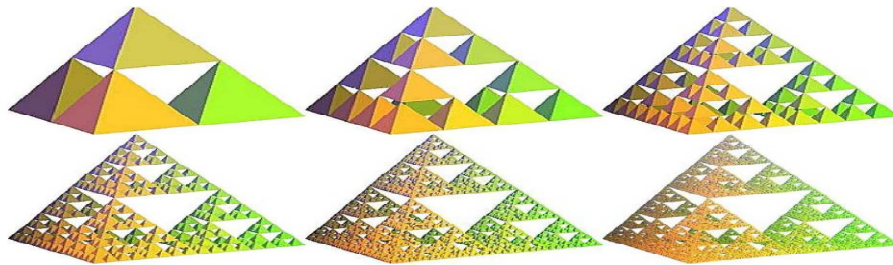


Figure III.4 : le triangle de Sierpinsky (Mandonnet.J 2013).

- ✚ **Eponge de Menger** Parfois appelée **éponge de Menger-Sierpinski**, elle fut décrite pour la première fois par le mathématicien autrichien Karl Menger en 1926.

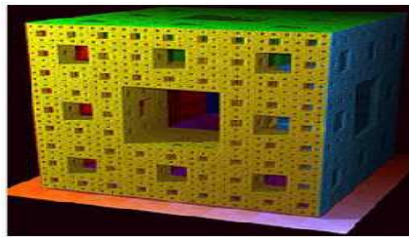


Figure III.5 : L'éponge de Menger (Karl Menger, 1926).

III.4 Le calcul de la dimension fractale en génie civil

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

Les méthodes du calcul les plus courantes sont :

- La méthode des masses;
- La méthode des lignes parallèles;
- La méthode de Line Divider (méthode du diviseur) Selon Mandelbrot (1983);
- La méthode Surface-Périmètre (Area-Perimeter).

Dans ce travail ce sont la méthode de comptage des boîtes (Box Counting) et la méthode de comptage différentielle de boîtes tridimensionnelle DBC (3D) qui sont choisies à utiliser et elles sont définies dans ce qui suit.

- **La Méthode de comptage des boîtes (Box Counting) bidimensionnelle BC (2D)**

La méthode de Box Counting est l'une des méthodes les plus intéressantes et les plus utilisées pour de nombreuses structures fractales, la méthode de comptage des boîtes est couramment utilisée en particulier pour les structures auto-affines.

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 (figures III.6).

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

$$N(X > x) = Kx^{-DF_{FR}} \quad \text{(III.3)}$$

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 :

$$DF_{FR} = -m \quad \text{(III.4)}$$

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

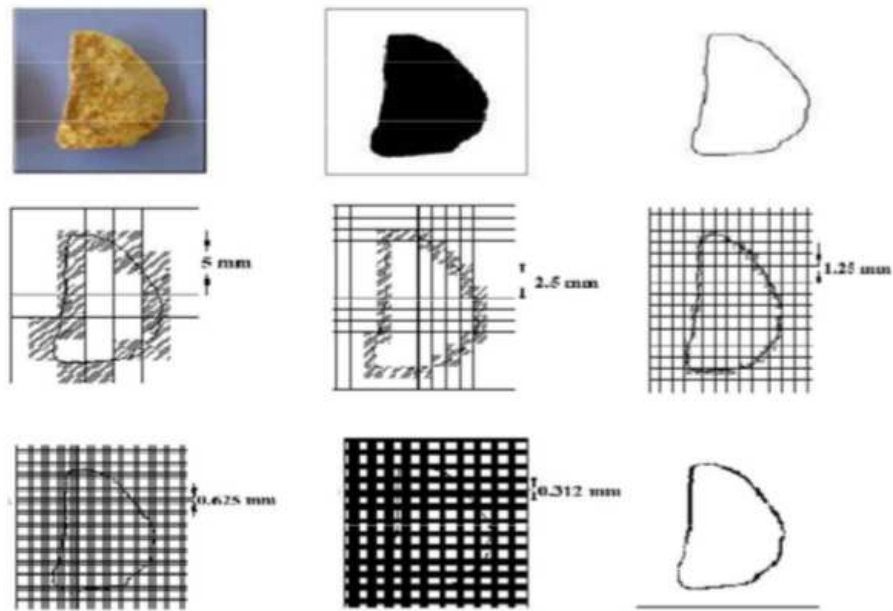


Figure III.6: Différentes étapes de maillage de l'image du grain et illustration de la méthode de Box Counting (Outayeb. S, 2016).

- **Méthode de comptage différentielle de boîtes tridimensionnelle DBC(3D)**

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

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

$$\frac{M}{2} \geq s > 1 \quad (\text{III.5})$$

Le rapport de partitionnement est alors :

$$r = \frac{s}{M} \quad (\text{III.6})$$

Des cubes de taille $(s \times s \times s)$ où $G/s' = M/s$ sont empilés sur chaque pavé (l, k) , de la grille pour qu'ils soient alignés verticalement le long de l'axe des intensités et prenant de bas en haut des étiquettes chiffrées comme suit : 1, 2, 3, ... Il existe ainsi sur chaque pavé de la grille, une colonne quadratique comme le montre la figure (III.7).

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

$$n_r(l, k) = t - k + 1 \quad (\text{III.7})$$

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

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

Dans l'exemple de la figure (III.8), nous avons :

$$s = s = 3 \text{ et } n_r(l, k) = 6 - 1 + 1 = 6 \text{ cubes.} \quad (\text{III.8})$$

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

$$N_r = \sum_{l,k} n_r(l, k) \quad (\text{III.9})$$

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

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

$$DF = \frac{\log(Nr)}{\log(1/r)} \quad (\text{III.10})$$

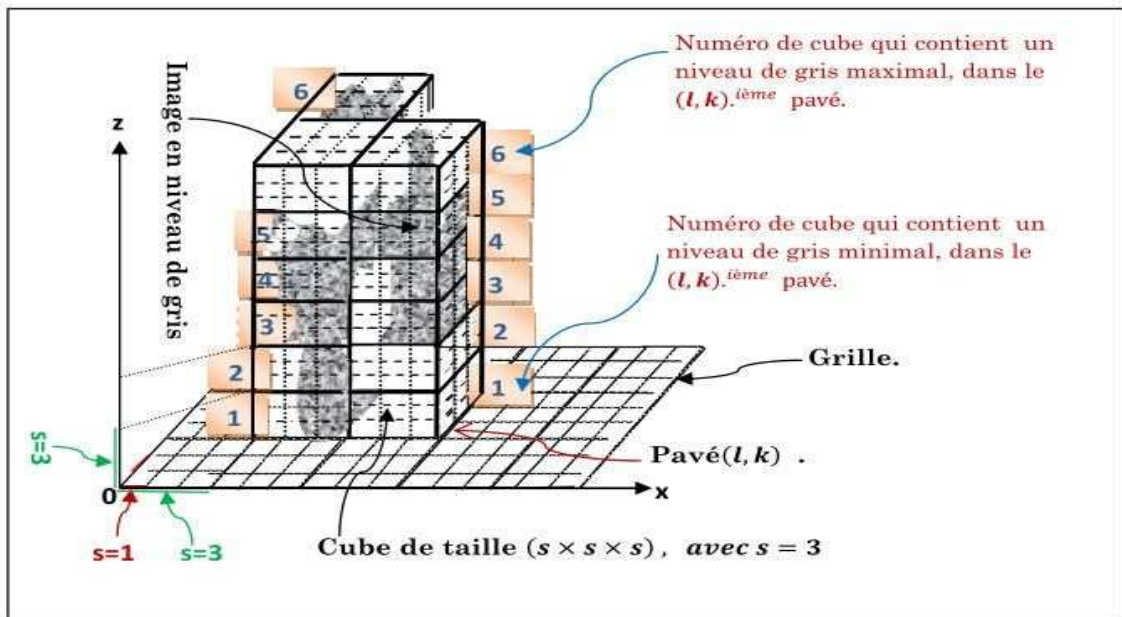


Figure III.7 : Technique de Comptage Différentiel de Boîtes (CDB).

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

$$s = (s \times G) / M \quad (\text{III.11})$$

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

En effet, si on considère deux pixels A et B appartenant au même pavé (même bloc). La méthode (CDB) construit sur ce pavé une colonne à base des cubes ayant les mêmes dimensions. Supposant que la taille de chaque cube est $3 \times 3 \times 3$, alors les pixels A et B sont assignés respectivement aux cubes numéros 2 et 3 (Figure III.8). Dans ce cas, il faut deux cubes pour couvrir ces pixels, alors qu'en réalité il ne faut qu'un seul cube puisque la distance entre ces deux pixels suivant la direction (oz) est inférieure à 3. Cette quantité produit alors une erreur lors du calcul de la quantité totale N_r puisque cette dernière ne sera pas égale au nombre minimum (optimum) de cubes qui peuvent couvrir l'objet.

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

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

$$\left(\frac{M}{2}\right) \geq s > 1 \text{ et } s' = \frac{s}{\alpha} \quad (\text{III.12})$$

α : un entier supérieur ou égal à 1.

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

$$n_r(l, k) = \begin{cases} \text{ceil} \left[\frac{(l-k)'}{s'} \right] & \text{si } (l \neq k). \\ 1 & \text{si } (l = k). \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

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

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

$$\left(\log \left(\frac{1}{r} \right), \log (N_r) \right) = \left(\log \left(\frac{1}{s} \right), \log (N_s) \right) \quad (\text{III.14})$$

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

$$s' = s = 3 \text{ et } n_r(l, k) = \left[\frac{(3-2)}{3} \right] = 1 \text{ cube} \quad (\text{III.15})$$

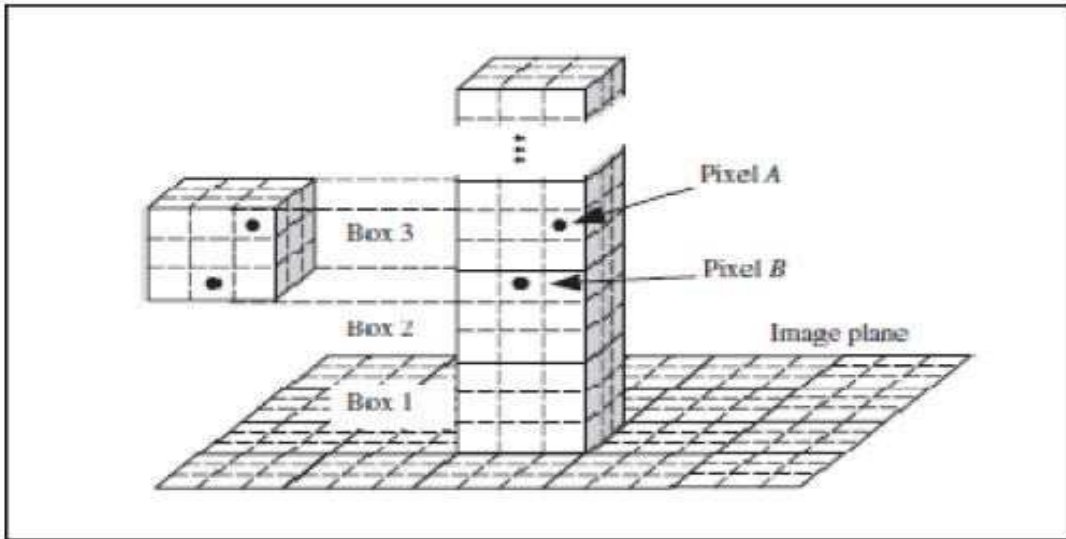


Figure III.8 : Deux pixels appartenant à deux cubes différents d'altitude 3 alors que leur distance suivant (oz) est inférieure à 3.

Le choix du nombre et des valeurs de « s » constitue un autre problème. En effet, le nombre de paramètres peut influencer sur la valeur de DF . Dans ce cas, la solution proposée par Pleshanov (Pleshanov. V.S et al, 2010) se définit comme suit : pour une image de taille ($M \times M$) prenant pour $\frac{M}{2} \geq s > 1$, des cubes de taille ($s \times s \times s$) tel que :

$$r = s \text{ (III.16)}$$

$$s = 2^g \text{ (III.17)}$$

$$g = 1, 2, \dots, \log(M) - 1 \text{ (III.18)}$$

$$G/s = M/s \text{ (III.19)}$$

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

D'autres modifications de la méthode de Comptage Différentiel de Boîtes ont été apportées par Cheng (Cheng. Q, 1999), Du (Du. G et Yeo. T.S, 2002) et Lee (Lee. W.L et Hsieh. K.S, 2010). L'une d'elles a été proposée par Jin (Jin. X.C et al, 1995) ; elle est connue sous le nom de Relative Differential Box Counting (RBCD). Le nombre $n_s(l, k)$ est calculé comme suit :

$$n_s(l, k) = g_{max}(l, k) - g_{min}(l, k) \text{ (III.20)}$$

Où : $g_{max}(l, k)$ et $g_{min}(l, k)$ sont respectivement le niveau de gris minimal et le niveau de gris maximal des pixels du pavé de taille ($s \times s$) et de coordonnées (l, k) (Figure III.9).

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

$$N_s = \sum_{l,k} \text{ceil} \left[\frac{M \times (n_s(l,k))}{s \times G} \right] \quad (\text{III.21})$$

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

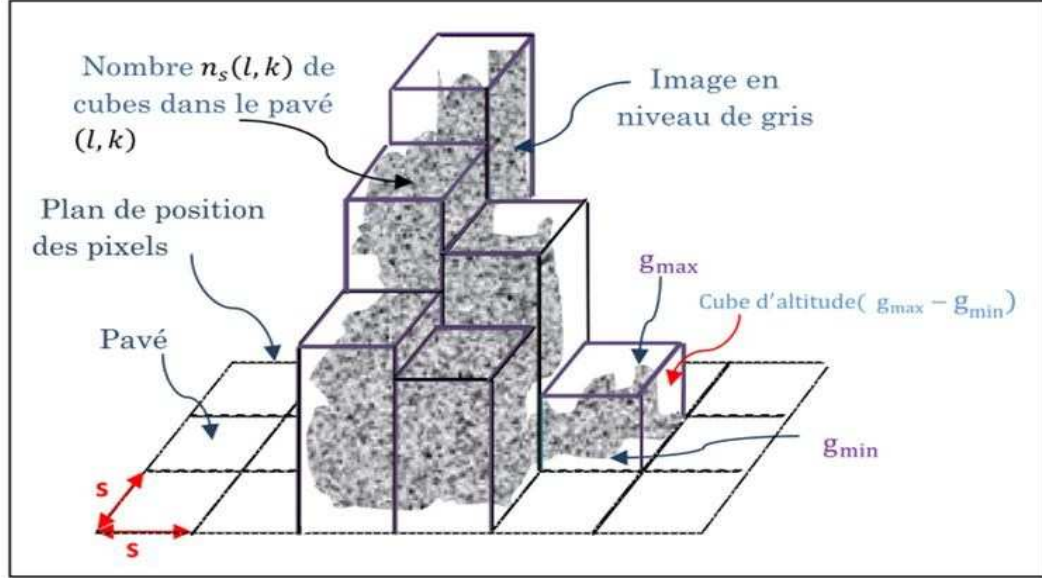


Figure III.9 : Nombre N_s de cubes qui couvre l'image.

Cheng (Cheng. Q, 1999) a proposé d'utiliser une fenêtre glissante de taille $(r \times r)$, centrée sur chaque pixel de coordonnées (i, j) d'une image de taille $(M \times M)$. Il détermine ensuite $n_r(i, j)$ et N_r de la même manière que dans la méthode de CDB. Quant à Du et Yeo (Du. G et Yeo. T.S, 2002), ils combinent la méthode de Jin (Jin et al, 1995) avec celle de Cheng (Cheng. Q, 1999) de la manière suivante :

Un pavé de taille $(r \times r)$ est déplacé et centré sur les pixels (i, j) de la fenêtre de voisinage de taille $(M \times M)$ avec $r < M$. Le nombre $n_r(i, j)$ est déterminé comme suit :

$$n_r(i, j) = g_{max}(i, j) - g_{min}(i, j) \quad (\text{III.22})$$

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

$$N_r = \sum_{i,j} \text{ceil} \left[\frac{M}{g} (n_r(i, j)) / r \right] \quad (\text{III.23})$$

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

$$n_r(l, k) = 2 \left(\frac{\sigma(l,k)}{s'} \right) + 1 \quad (\text{III.24})$$

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

$$\sigma(l, k) = \sqrt{\frac{\sum_{i,j} (g(i,j) - m)^2}{N}} \quad (\text{III.25})$$

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

$\overline{g(i,j)}$: niveau de gris d'un pixel du pavé (l, k) , m : niveau de gris moyen des pixels du pavé (l, k) .

III.5 Conclusion

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



Chapitre IV

***Les essais réalisés
sur les sols étudiés***

IV.1.Introduction

Identifier les sols expansifs, qualifier leur potentiel de gonflement et de retrait est une préoccupation fondamentale pour l'investigation géotechnique des sites. Les risques causés par les sols gonflants à travers le monde, sont plus élevés que ceux causés par d'autres risques naturels (Jones et Holz, 1973; Chen, 1988 ; Nelson et Miller, 1992). C'est à partir de ces principales causes que les sols peuvent être considérés comme des risques potentiels. Les essais d'identification permettent de qualifier le sol par un nom plus précis (argile, sable, limon argileux...). Ces dernières sont d'un grand intérêt, ce qui met à notre disposition des informations d'une extrême importance quant aux possibilités d'utilisation en construction civile.

Ce chapitre représente les résultats détaillés de tous les essais d'identification et d'effets climatiques réalisés sur les échantillons d'argile, par Ourrad. K, 2018 et Zeta. M, 2017, au laboratoire de recherche Géo-matériaux, Environnement et Aménagement, L.G.E.A, et le laboratoire MDS de l'université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, (les essais d'identification, l'essai de Gel-Dégel et l'essai de Dégradabilité et l'essai de Canicules...).

IV/1 Les résultats des essais d'identifications des sols étudiés

IV/1.1 Origine des matériaux utilisés :(d'après Ourrad. K, 2018 et Zeta. M, 2017)

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

- 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 et 9.70 m
- L'échantillon N°03 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.
- L'échantillon N°04 est prélevé d'un site à Freha (date de prélèvement : 02/2017, LCTP Tizi-Ouzou); pour une réalisation de bâtis, la profondeur de sondage est entre 4.40

m et 4.90 m.

- L'échantillon N°05 prélevé d'un site au centre-ville de Tizi-Ouzou (le03/2017, LNHC Tizi-Ouzou) ; pour une réalisation d'un mur de soutènement devant l'hôpital, Avenue AbaneRamdane, la profondeur de sondage est entre 5.10 m et 5.60 m.

IV/1.2Caractéristiques physiques etminéralogiques

IV/1.2.1Caractéristiquesphysiques

Les résultats des différents essais d'identifications réalisés aux laboratoires sont résumés sous forme d'un tableau (Tableau IV.1).

Site	W %	ρ_s (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_h (g/cm ³)	e	Sr %	Ip%	Ic	AC	VBS	WL %
Azazga	32.101	2.70	1.61	2.13	0.677	39.442	36.96	0.737	1.41	9.96	59.35
Appréciation	élevée	/	Moyenne	Humide	Moins Compacte	Humide	Très Plastique	mi-dur	Actif	Très Argileux	/
Tigzirt	14.925	2.55	1.78	2.044	0.432	15.769	21.44	1.622	0.609	4.08	49.7
Appréciation	Faible	/	Moyenne	Légèrement Humide	Moins Compact	Légèrement humide	Peu Plastique	Dur	Moyennement actif	Limoneux-Argileux	/
Centre-ville (compacté)	22.140	2.80	1.96	2.70	0.418	37.366	24.26	0.808	0.594	5.58	41.75
Appréciation	Moyenne	/	Moyenne	Légèrement Humide	Compacte	Humide	Peu Plastique	Mi-Dur	Moyennement actif	Argileux	/
Freha	18.806	2.31	1.717	2	0.345	93.494	33.96	1.311	0.632	8	63.34
Appréciation	Moyenne	/	faible	humide	compacté	détrempe	Très plastique	Dur	Moyen actif	Argileux	/
Centre-ville	12.491	2.22	1.449	1.85	0.532	34.016	14.46	1.92	0.1921	3.8	40.25
Appréciation	moyenne	/	faible	humide	moins compacte	humide	peu plastique	Dur	faible actif	sol limoneux argileux	/

Tableau IV.1 : Résultats finals des expériences pour les différents échantillons.

- **Interprétation des résultats**

On remarque de suite que le sol de Azazga a une teneur en eau élevée comparant aux sols de Tizirt et Centre-ville, L'argile de Freha et centre-ville ont des teneurs en eaux moyennes; 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 Tizirt. Le sol de Centre-Ville représente une perméabilité moyenne ; l'argile de Freha et l'argile de Centre-Ville ont un volume des vides important et une perméabilité élevée, d'où la facilité d'infiltration d'eau, sachant que les échantillons sont prélevés en période hivernale. Les résultats des indices des vides pour les cinq sites (voir le tableau IV.1) ce qui nous permet de connaître la proportion des vides, et de conclure que le sol de Tizirt 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 et de conclure que l'argile étudiée de centre-ville est moins compactes par rapport à celle de Freha qui est plus compactée, ce qui confirme les résultats obtenus précédemment dans la mesure de la teneur en eau naturelle. Le degré de saturation des échantillons est inférieur à 40 %, ce qui permet de dire qu'on est en présence de sols non saturés. Par contre l'argile de Freha est un sol partialement saturé. La granulométrie de ces sols est de plus 65% qu'est inférieure à 80 μm , ce qui permet de classer les deux sols (Fréha et Centre-ville) dans la catégorie des sols fins. Les résultats des limites de liquidités et de plasticités montrent que : Les sols de Tizirt, Centre-ville (Ech Compacté), centre-ville, ont un comportement peu plastique, mais l'argile de Azazga et Fréha ont un comportement plastique. Pour les résultats de l'indice de consistance I_c , on a conclu que l'argile d'Azazga et Centre-Ville (Ech Compacté) ont une consistance de sol Mi-Dure, par contre le sol de Tizirt, Fréha et Centre-ville2 sont Dur. Les valeurs obtenues au bleu de méthylène montrent que le site d'Azazga et Freha représentent un sol argileux très plastique, et celui de Centre-ville compacté présentent un sol argileux peu plastique, tandis que le site de Centre-ville2 représente un sol limons peu plastique, et celui de Tizirt présentent un sol limoneux-argileux peu plastique ce qui est confirmé par l'abaque de Casagrande (Figure IV.1).

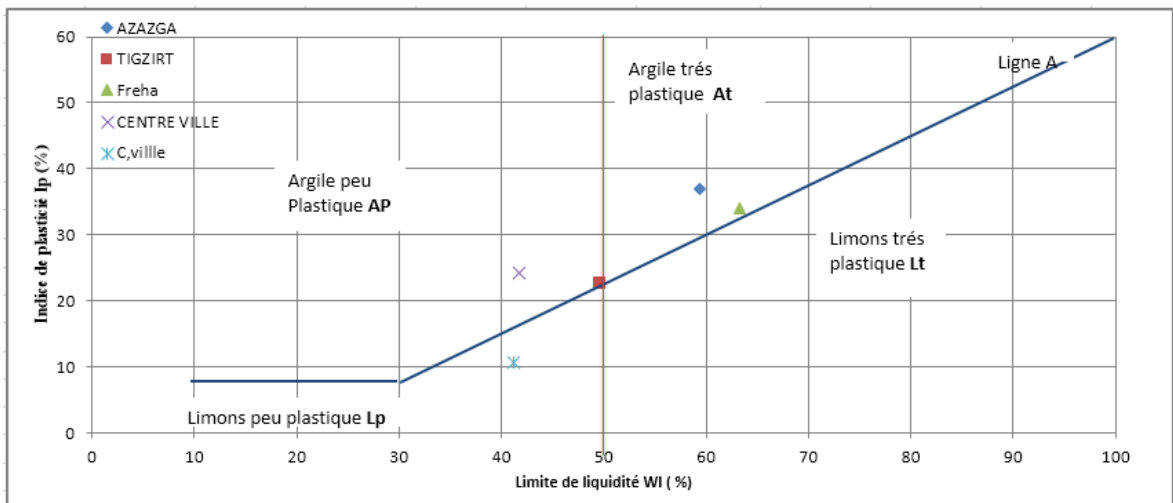


Figure IV.1:Présentation des sols étudiés dans l'abaque de Casagrande.

IV/1.2.2 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 (Figure IV.2, IV.3 et IV.4). Ces poudres sont obtenues par la méthode de broyage (Ourrad. K ,2018).

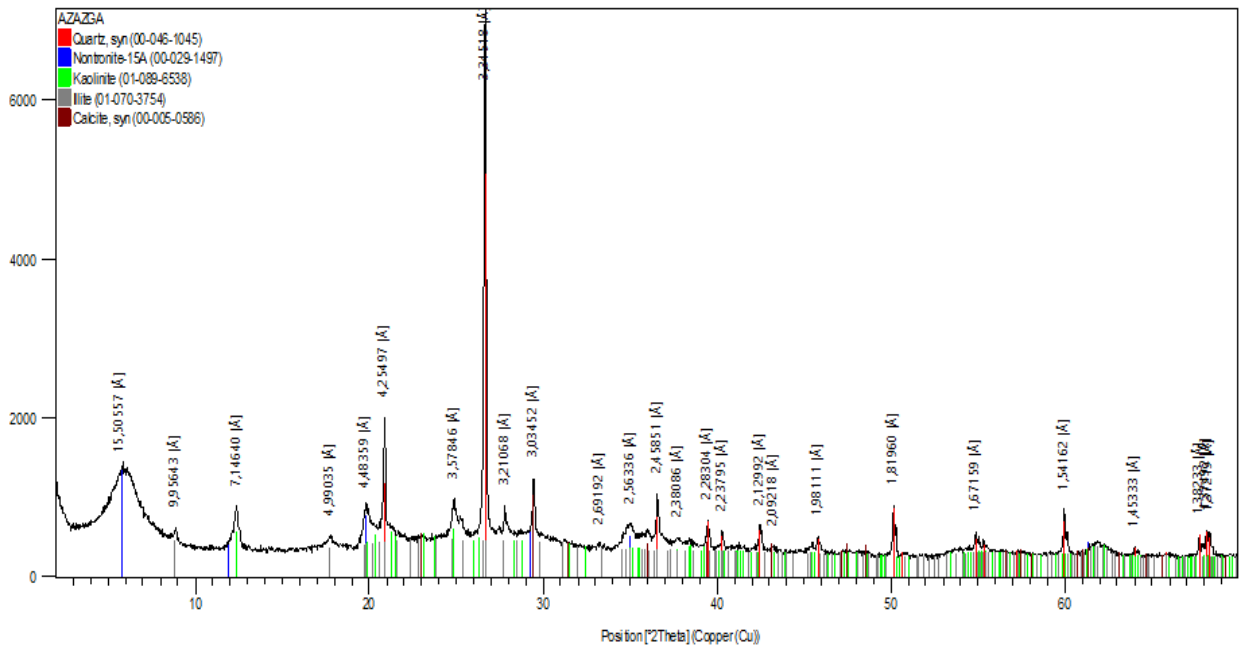


Figure IV.2 :Diffractogramme aux rayons X de l'échantillon d'Azazga.

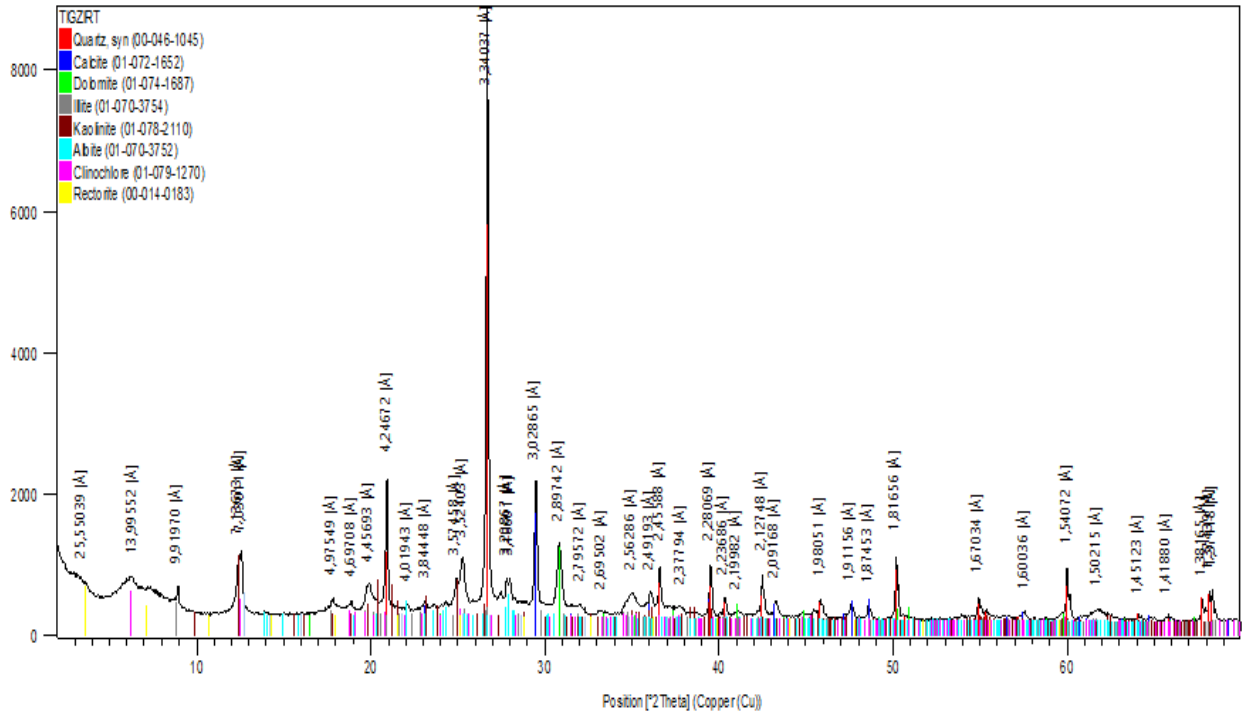


Figure IV.3 :Diffractogramme aux rayons X de l'échantillon de Tizgirt.

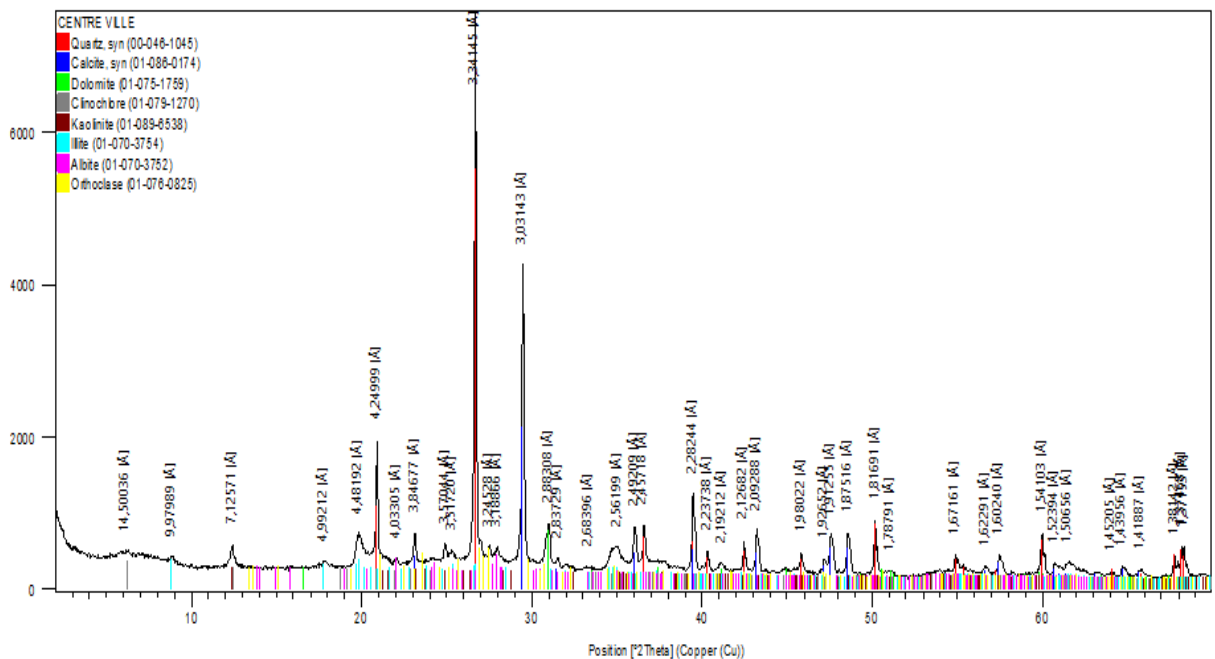


Figure IV.4 :Diffractogramme aux rayons X de l'échantillon de C.V (Ech Compacté).

Une autre étude minéralogique et pétrographique est effectuée au laboratoire de la Faculté de Chimie de l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, l'USTHB, située à BAB EZZOUAR. Les essais sont réalisés sur des échantillons sous

forme de poudres d'argiles d'un diamètre inférieur à $2\mu\text{m}$ (Tableau IV.2). Ces poudres sont obtenues par la méthode de broyage.

Tableau IV.2 : La composition minéralogique estimative semiquantitative(Zeta.M ,2017).

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

- **Interprétation des résultats**

L'analyse des échantillons 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 Tizgirt est principalement composé de : Quartz, Rectorite, Dolomite Illite, Kaolinite, Albite, Clinochlore et Calcite ; l'échantillon de Centre-ville est principalement composé de : Quartz, Calcite, Dolomite, Clinochlor, Kaolinite, Illite, Orthoclase et Albite. Les résultats des analyses minéralogiques montrent que les échantillons des deux sites étudiés de la région de Tizi-Ouzou ont une composition minéralogique un peu différente. On constate une présence des minéraux non argileux tels que : le quartz et la calcite et d'autre ; et des minéraux argileux tels que : la montmorillonite, illite et la kaolinite, dans les deux sites.

IV/1.2.3 Images au Microscope Électronique à Balayage (MEB)

Afin d'obtenir des informations sur la structure et l'état de surface des sols, des images au MEB (Microscope Électronique à Balayage) ont également été effectuées sur des échantillons sous forme de lames minces séchées à l'air sec, au Microscopie Electronique à Balayage de Laboratoire de Chimie de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Les différentes images obtenues sont représentées dans les figures IV.5 et IV.6(Zeta.M,2017).

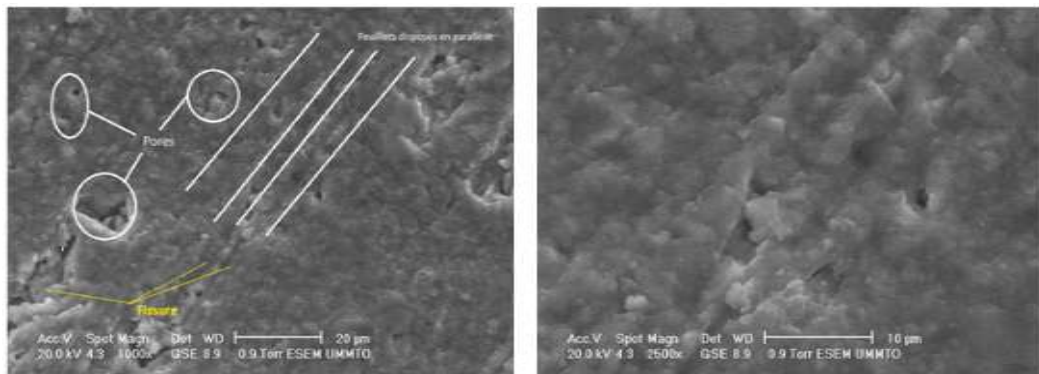


Figure IV.5 : Images au MEB réalisées pour un échantillon extrait de Fréha.

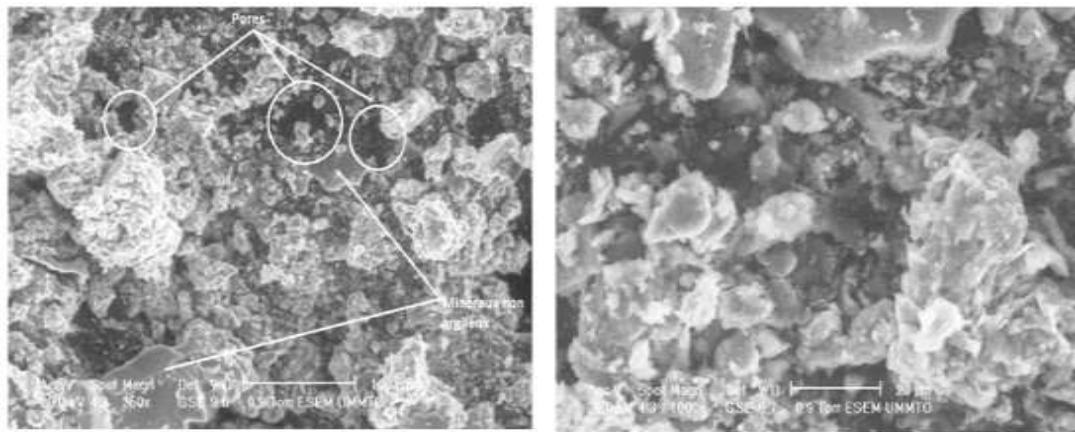


Figure IV.6 : Images au MEB réalisées pour un échantillon de Centre-ville de Tizi-Ouzou.

- **Interprétation des résultats**

La Figure IV.5, des images faites au MEB pour les échantillons prélevés du site de Fréha, montre que la microstructure est représentée par une matrice argileuse relativement homogène et compacte. Le plan de litage montre clairement un arrangement parallèle compact des particules argileuses. La Figure IV.6 des images faites au MEB pour les échantillons prélevés du site de centre-ville de la wilaya, montre les différentes microstructures des textures des argiles étudiées selon le plan horizontal. Les textures des figures se ressemblent dans la distribution ainsi que dans la présence des feuillets à différentes largeurs. Cependant, la porosité et la nature des minéraux sont différentes. La texture comporte un mélange de minéraux argileux et non argileux ce qui permet d'avoir un milieu hétérogène moins compact.

IV/2 Résultats des essais des effets climatiques réalisés au laboratoire

IV/2.1 Préparation des échantillons

IV/2.1.1 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 IV.7).

- 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 IV.7 : 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 à 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 à 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 à l'état naturel (sans passé aux conditions).
- F : Argile de Freha (passé par les conditions initiales de chaque essai).
- F.N : Argile de Freha à l'état naturel (sans passé aux conditions).

- C.V : Argile de Centre-Ville de Tizi-Ouzou (passé par les conditions initiales de chaque essai).
- C.V.N : Argile de site de centre-ville de Tizi-Ouzou (sans passé aux conditions).

IV/2.2 Les essais réalisés

Les essais réalisés sont choisis suivant l'influence climatique désirée à étudier sur le sol :

IV/2.2.1 Essai gel-dégel

IV/2.2.1.1 Principe d'essai

Après avoir imbibé les échantillons à la température ambiante du laboratoire, ils sont soumis à 10 Cycles de gel-dégel (Ourrad.K,2018).Les cycles de températures choisis c'est suivant la nature du climat de nord algérien plus précisément lawilaya de Tizi-Ouzou, 45°C de dégel et -2°C au refroidissement.

IV/2.2.1.2 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 est réalisé comme suit :

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

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

Les échantillons étudiés sont:

- 2 du site 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 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 ;
- Tigzirt N ;
- C.V.N.Compacté.

et

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

On a choisi deux échantillons naturels comme des échantillons témoins.

✓ Les Spécificités du cycle :

Gel :Dégel :

45C°

Température : -2C°	Température :
Humidité : 90%	Humidité : 90%
Ventilation : 50	Ventilation : 50

IV/2.2.1.3 Images des échantillons

Les images des échantillons N°01 avant et après essai, de Azazga, Tigzirt, C.V.Compacté retenues pour cet essai sont représentées sur les figures IV.8,IV.9,IV.10. Les autres images sont dans l'ANNEXE(d'après Ourrad.K ,2018) :

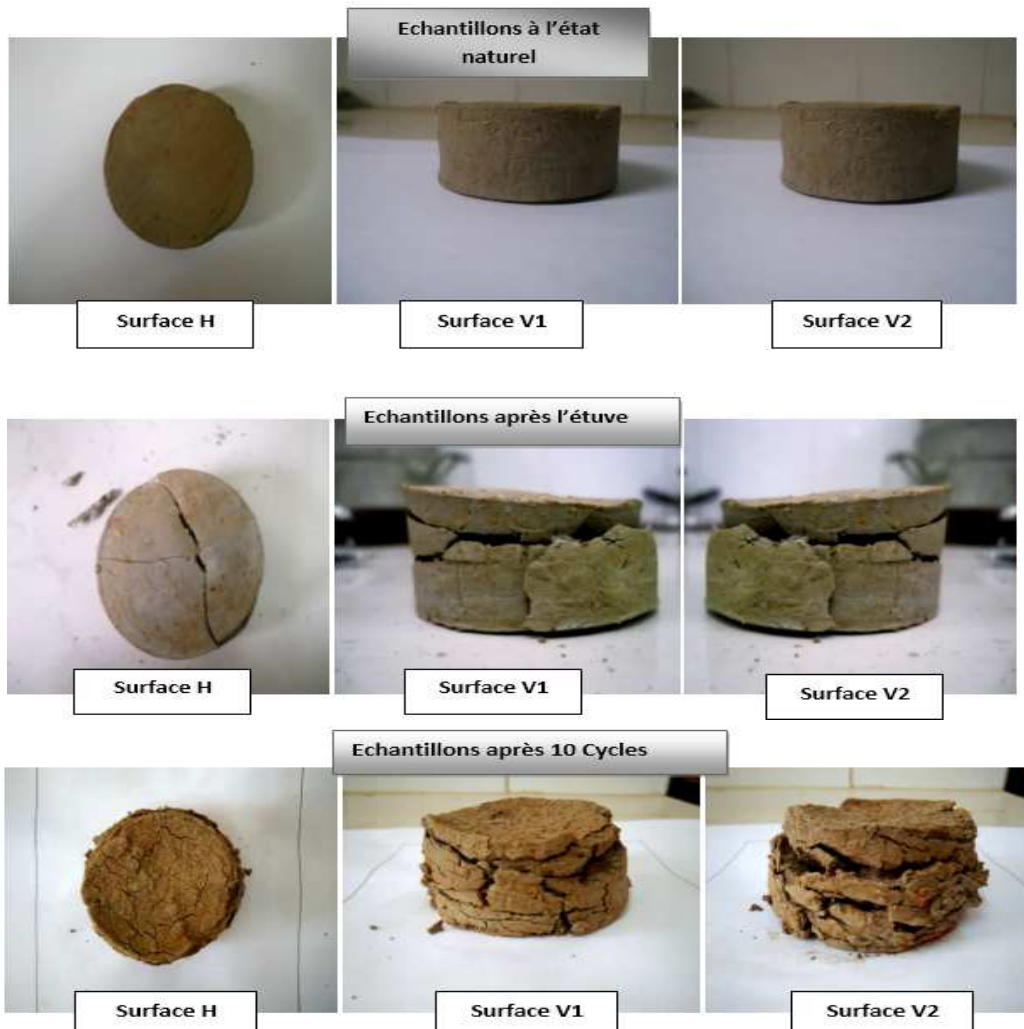




Figure IV.8 :Les images de l'échantillon N°01 d'Azazga à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.



Figure IV.9 : Les images de l'échantillon N°01 de Tizirt à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.

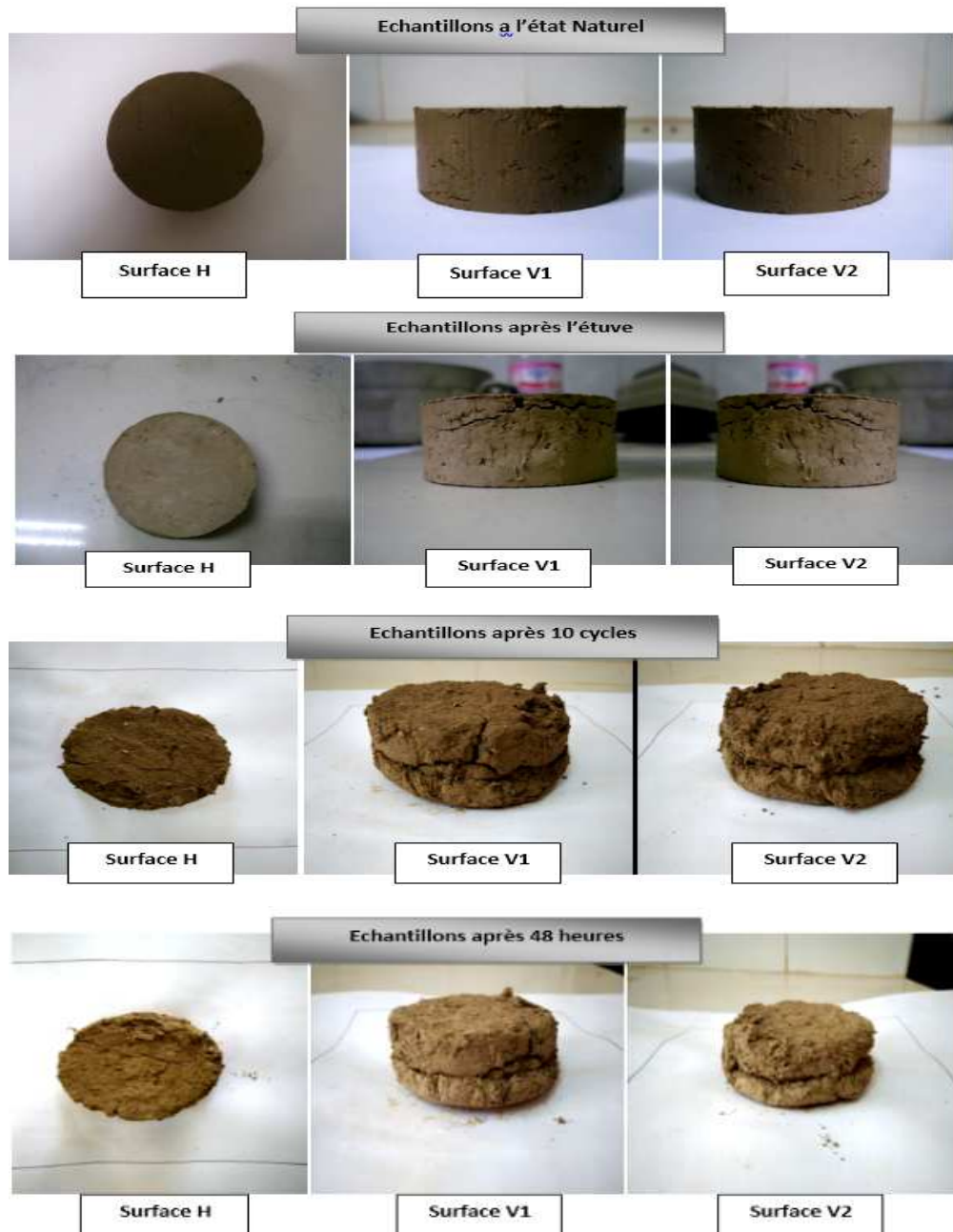


Figure IV.10 : Les images de l'échantillon N°01 de C.V. compacté à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.

Les images des échantillons, avant et après essai, de centre-ville à l'état naturel (C.V.N) et de Freha N°1(F) retenues pour cet essai sont représentées sur les figures IV.11 et IV.12.

Les autres images sont dans l'ANNEXE B, les figures B.5 et B.6 (Fréha N°2, Fréha naturel, Centre ville N°1, Centre ville N°2)(D'après Zeta.M,2017) :

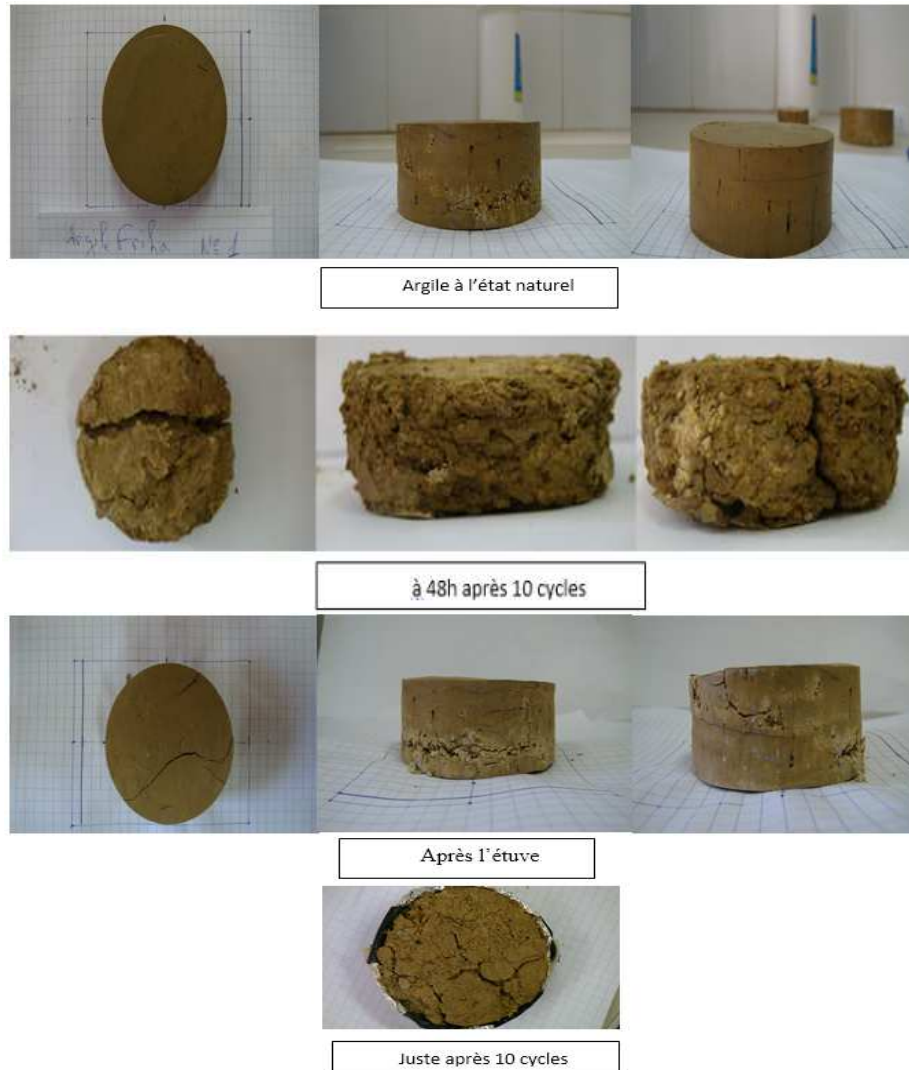


Figure IV.11 : Les images de l'échantillon N°1 de Freha à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.





Figure IV.12 : Les images de l'échantillon de (C.V.N) à état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.

- **Interprétation des résultats des échantillons**

L'étude est réalisée sur des échantillons d'argile intacte prélevée de 5 sites différents de la wilaya de Tizi-Ouzou. 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 IV.8, IV.9, IV.10, IV.11, IV.12, B.3, B.4, B.5 et B.6. Et dans l'ANNEXE aux Figures de I.1 à I.6. (Ourrad.K,2018 et Zeta.M,2017). 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 sensible 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.

IV/2.2.1.5 Les résultats obtenus

Les résultats de la pesée 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 (d'après Ourrad.K,2018 et Zeta.M,2017) :

Tableau IV.3 : Variation de la masse des échantillons avant et après l'essai Gel/Dégel.

ECH(g)	Etat naturel	Après étuve	Fin de l'essai
ECH01 (Azazga)	144,069	108,525	138,379
ECH02 (Azazga)	143,67	107,911	146,565
ECH TEMOIN (Azazga)	142,772	106,242	146,066
ECH01 (Tigzirt)	157,947	142,526	169,229
ECH02 (Tigzirt)	161,242	146,052	157,049
ECH TEMOIN (Tigzirt)	171,326	156,236	170,527
ECH01 (C.V)	151,957	124,526	150,985
ECH02 (C.V)	153,551	126,586	151,757
ECH TEMOIN (C.V)	156,749	129,589	147,966
ECH01 (Freha)	158,946	133,786	173,722

ECH02 (Freha)	163,339	141,558	166,933
ECH01(C.V)T.O	161,841	143,87	158,746
ECH02(C.V)T.O	167,732	150,26	172,923

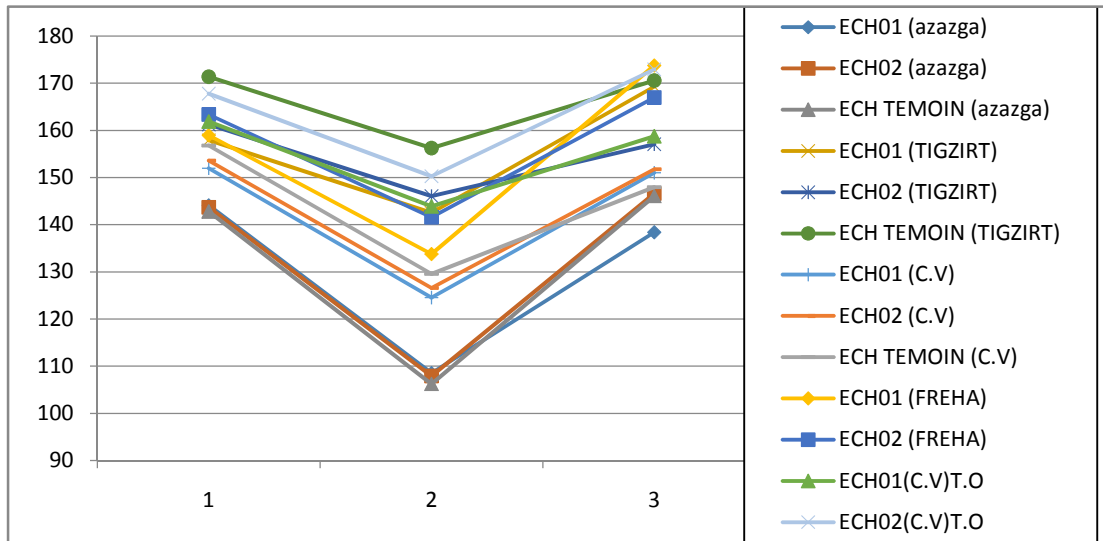


Figure IV.13 : Variation de la masse des échantillons au cours d'essai Gel/Dégel.

Tableau IV.4 : Variation de la masse de l'argile C.V.N et F.N pendant l'essai.

ECH (g)	Etat naturel	Fin d'essai
ECH (F.N)	158,247	165,136
ECH (C.V.N)	164,136	171,528

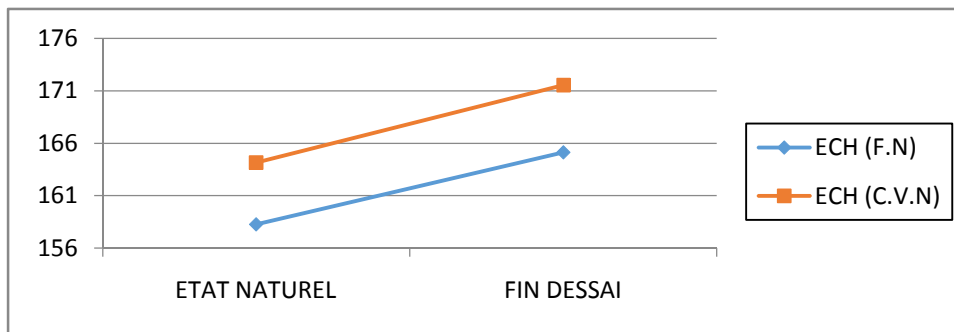


Figure IV.14: Variation de la masse des deux échantillons d'argile à l'état naturel.

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.

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

IV/2.2.2 Essai de Dégradabilité

IV/2.2.2.1 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 : 8 heures de séchage et 16 heures d'immersion (suivant la norme P94-067).

IV/2.2.2.2 Le déroulement de l'essai

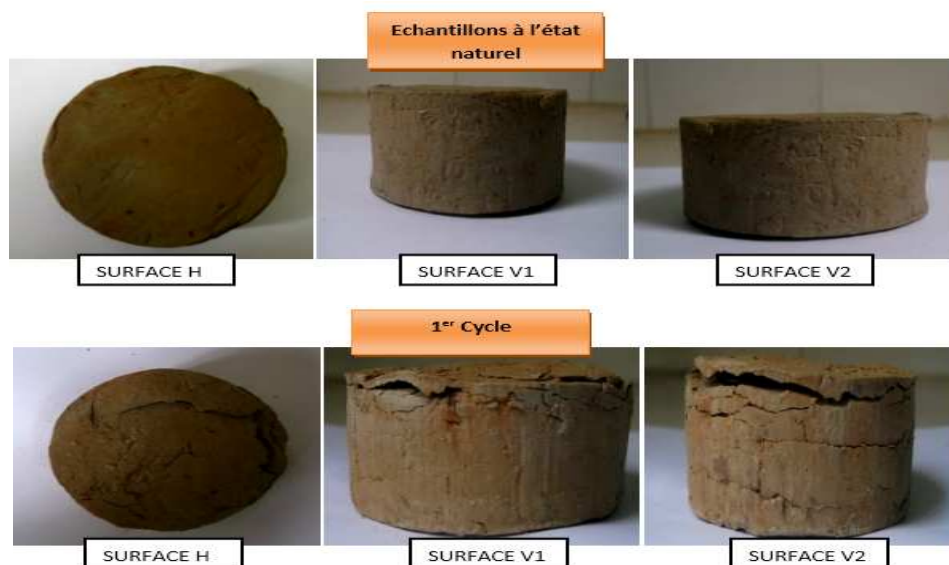
Le 1er cycle débute par une mise en immersion et le 4^{em} cycle se termine par un séchage, un cycle est réalisé comme suit :

- Imbiber les échantillons pendant 8h ; la quantité d'eau ajoutée est alternative comme une pluie avec une seringue chaque 30 mn à 45 mn en fonction de l'absorption des échantillons.
- 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.

IV/2.2.2.3 Les images retenues des échantillons

Les images des échantillons de l'argile de Azazga, Tizirt, C.V. Compacté sont représentées sur les figures suivantes (d'après Ourrad.K, 2018) :



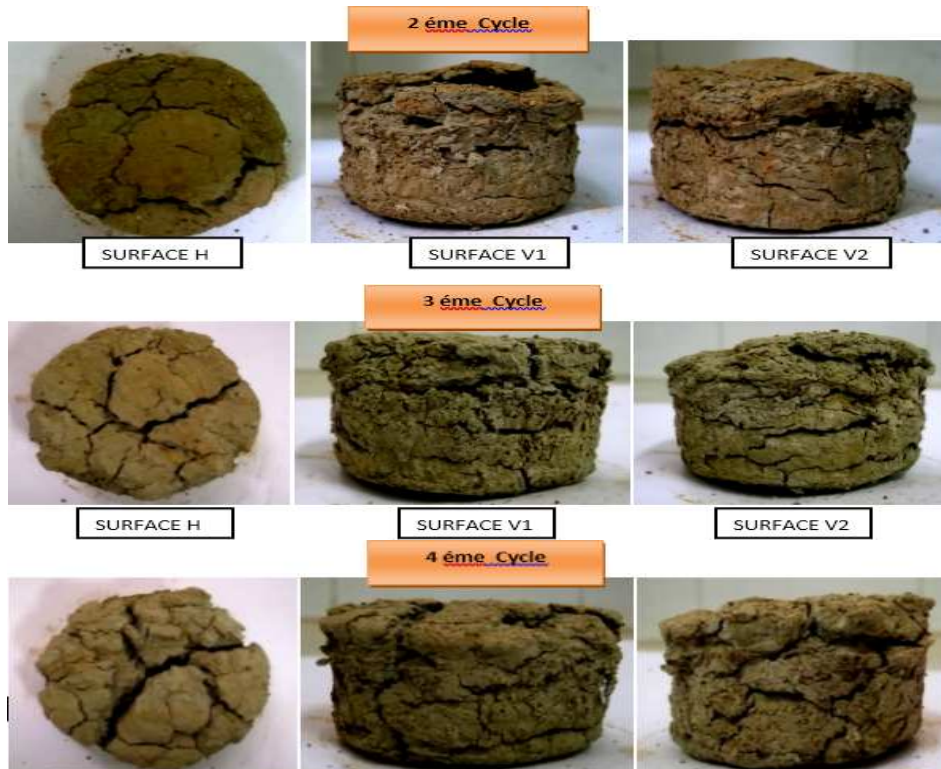


Figure IV.15 : Images de l'échantillon d'argile d'Azazga pendant l'essai de Dégradabilité, à l'état naturel et après chaque cycle.



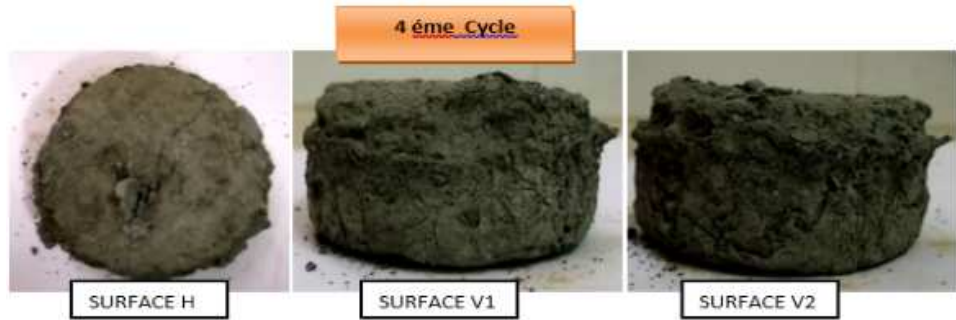


Figure IV.16 : Images de l'échantillon d'argile de Tizgirt pendant l'essai de Dégradabilité, à l'état naturel et après chaque cycle.

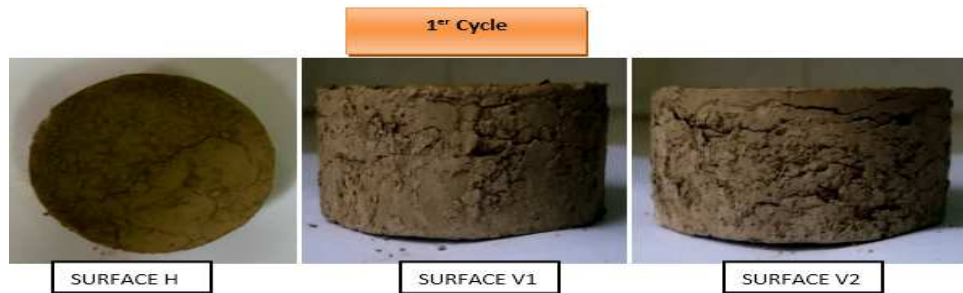




Figure IV.17 : Images de l'échantillon d'argile de centre-ville (c.v compacté) pendant l'essai de Dégradabilité, à l'état naturel et après chaque cycle.

Les images des échantillons de l'argile de centre-ville N°1 (C.V) et de l'argile de Freha N°1(F) retenues pour cet essai sont représentées sur les figuresIV.18 etIV.19.

Les autres images sont dans l'ANNEXE B (Figures B.1 et B.2)(Zeta.M ,2017).

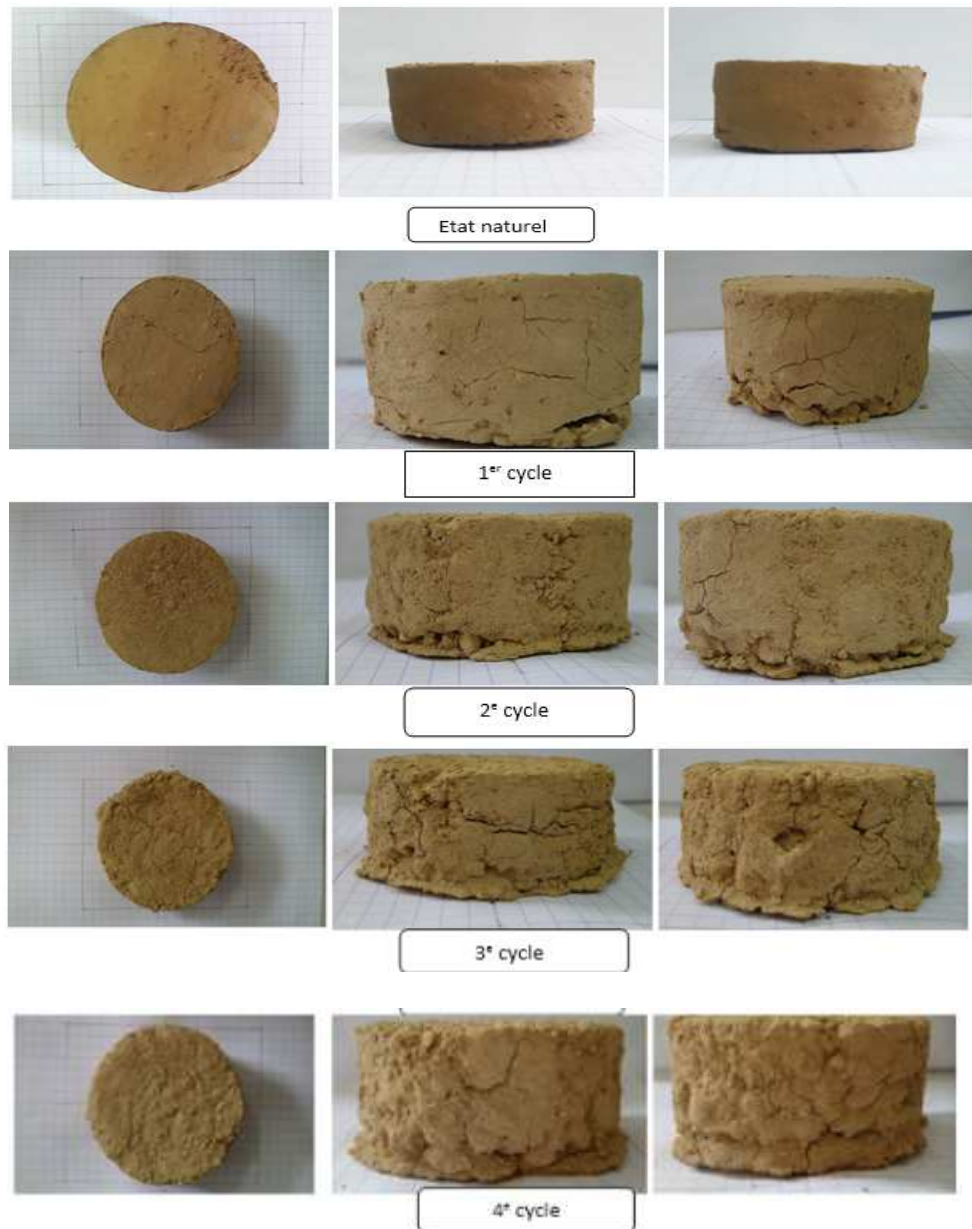


Figure IV.18 : Images de l'échantillon N°1 d'argile de centre-ville (C.V) pendant l'essai de Déggradabilité, à l'état naturel et après chaque cycle.

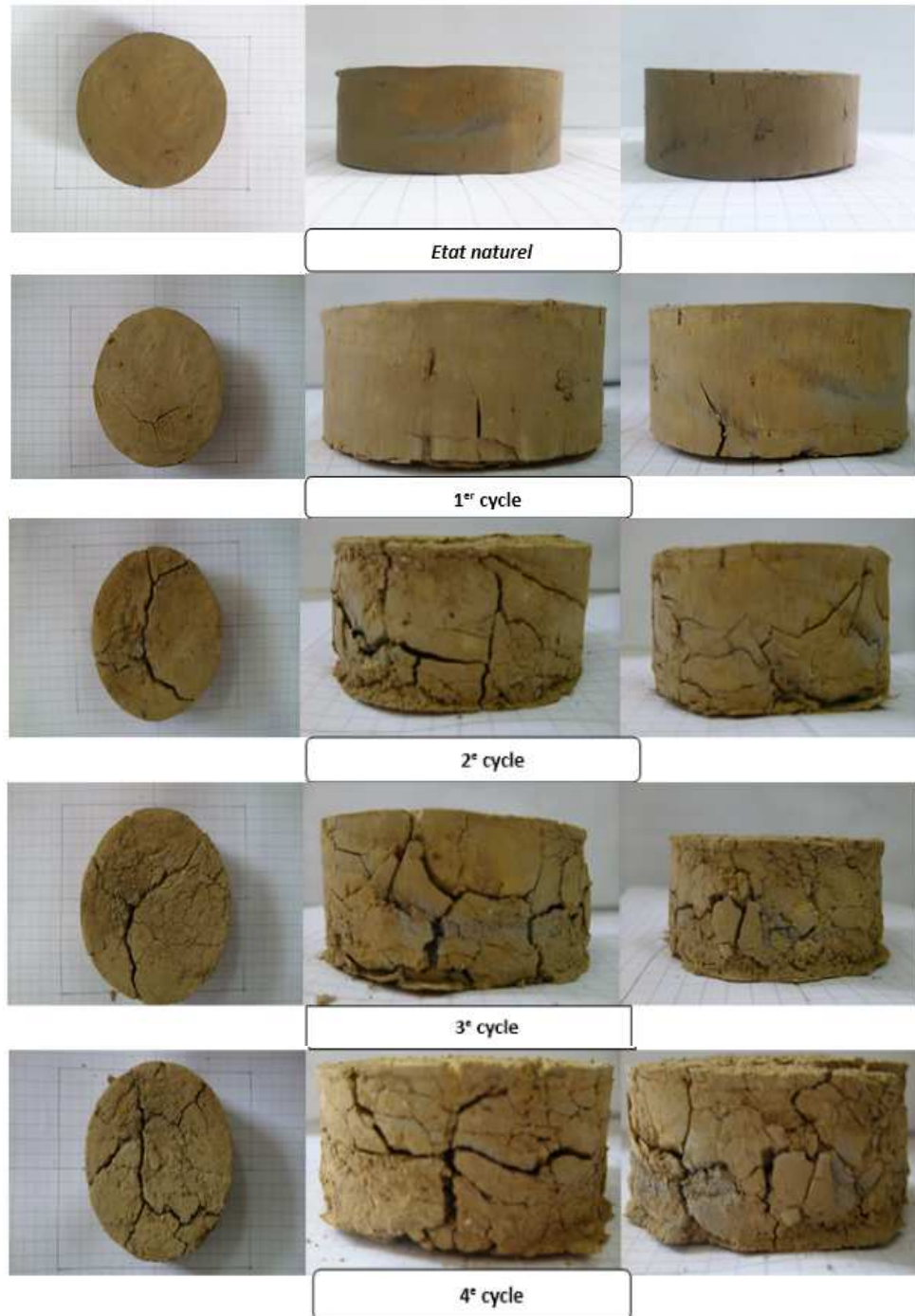


Figure IV.19 : Image de l'échantillon N°1 d'argile de Fréha (F) pendant l'essai de Déggradabilité, à l'état naturel et après chaque cycle.

- **Interprétation des résultats**

On peut dire que ces résultats ont été engendrés lorsque les minéraux se transforment et déclenchent le phénomène de retrait-gonflement (généralement montmorillonites et les illites qui ont des potentiels élevés pour le gonflement). Les observations ont montré un gonflement volumique irréversible des échantillons N°1 et N°2 de (C.V) durant le premier et le deuxième cycle (Figures IV.18 et B.5), L'échantillon N°1 et N°2 de (F) (Fig. IV.19) ont subi un retrait volumique dans le premier cycle (Ourrad.K, 2018 et Zeta.M, 2017).

IV/2.2.2.5 Les résultats obtenus

Les résultats relevés avant l'essai (à l'état naturel) et après chaque cycle de mouillage-séchage, sont présentés ci-dessous (d'après Ourrad.K, 2018 et Zeta.M, 2017) :

Tableau IV.5: Variation de la masse des échantillons au cours de l'essai.

Site	Etat naturel	1 ^{er} cycle	2 ^{ème} cycle	3 ^{ème} cycle	4 ^{ème} cycle
Azazga	142,173	106,929	105,931	105,332	104,732
Tigzirt	172,324	156,749	156,748	156,35	155,751
C.V.Compacté	148,462	121,406	121,306	121,106	120,507
Freha 01	169,529	138,179	137,58	137,377	136,28
Freha 02	166,933	132,588	131,789	131,387	130,789
CentreVille 01	181,51	147,664	147,163	146,562	145,764
CentreVille 02	171,825	145,268	145,367	144,867	144,268

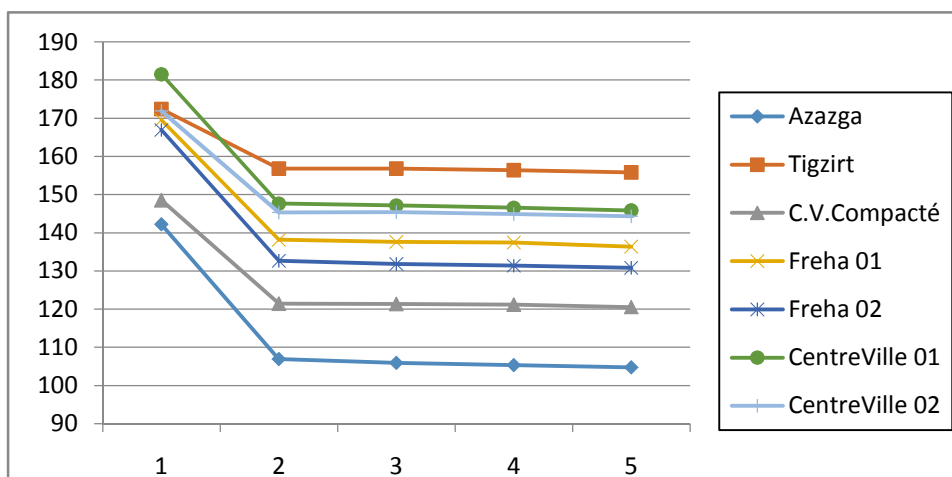


Figure IV.20: Variation de la masse des échantillons au cours de l'essai de Dégradabilité.

- **Interprétation des résultats**

Les résultats obtenus (Tableau IV.5) 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.

IV/2.2.3 Essai de Canicules

C'est un essai réalisé seulement dans le travail de fin d'étude (Ourrad.K, 2018).

IV/2.2.3.1 Principe d'essai

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

✓ Les spécificités du cycle

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

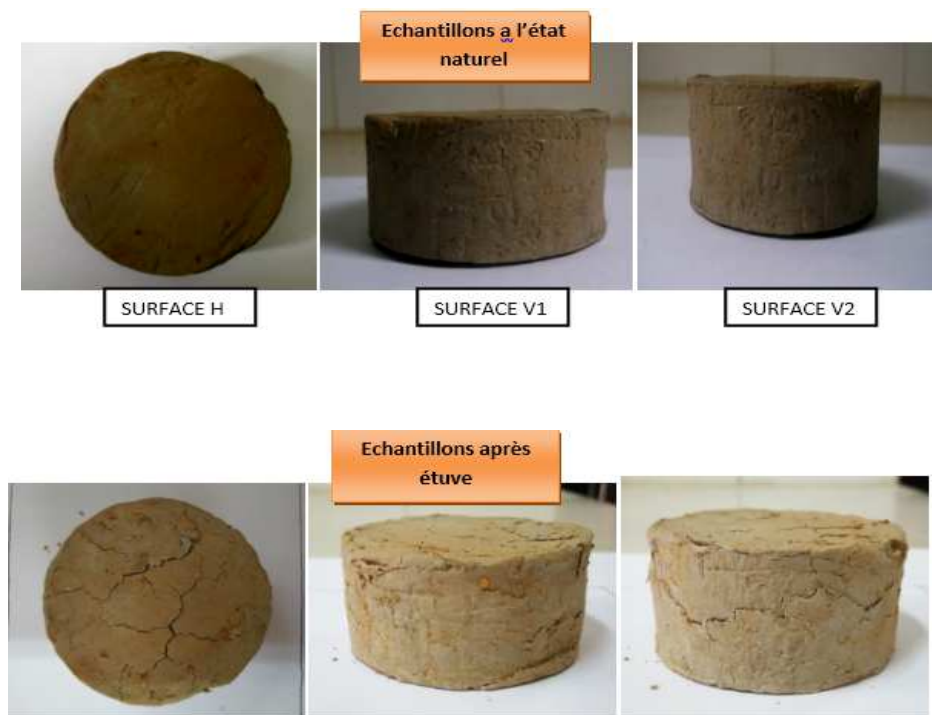
IV/2.2.3.2 Le déroulement de l'essai

- 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.

IV/2.2.3.3 Les images retenues des échantillons

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



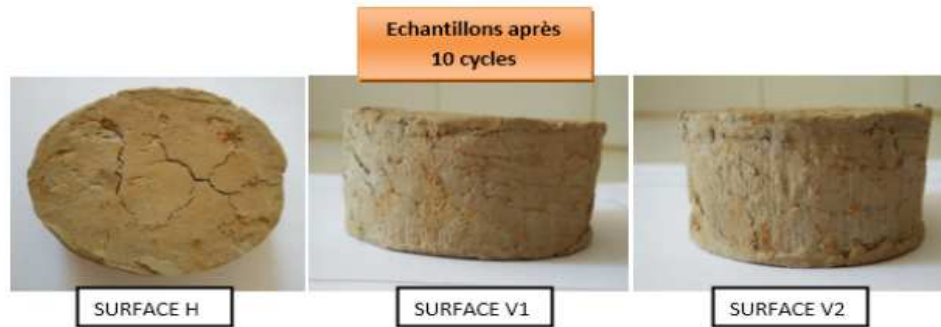


Figure IV.21 : Images de l'échantillon d'argile N°01 d'Azazga pendant l'essai de canicule.

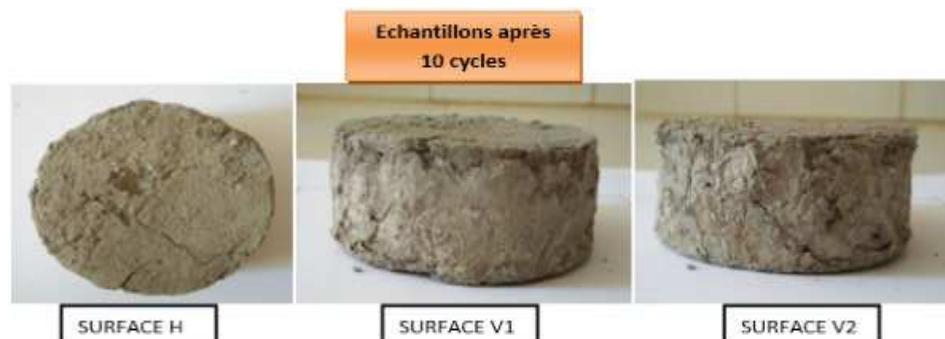


Figure IV.22 : Images de l'échantillon d'argile N°1 de Tizirt pendant l'essai de canicules.



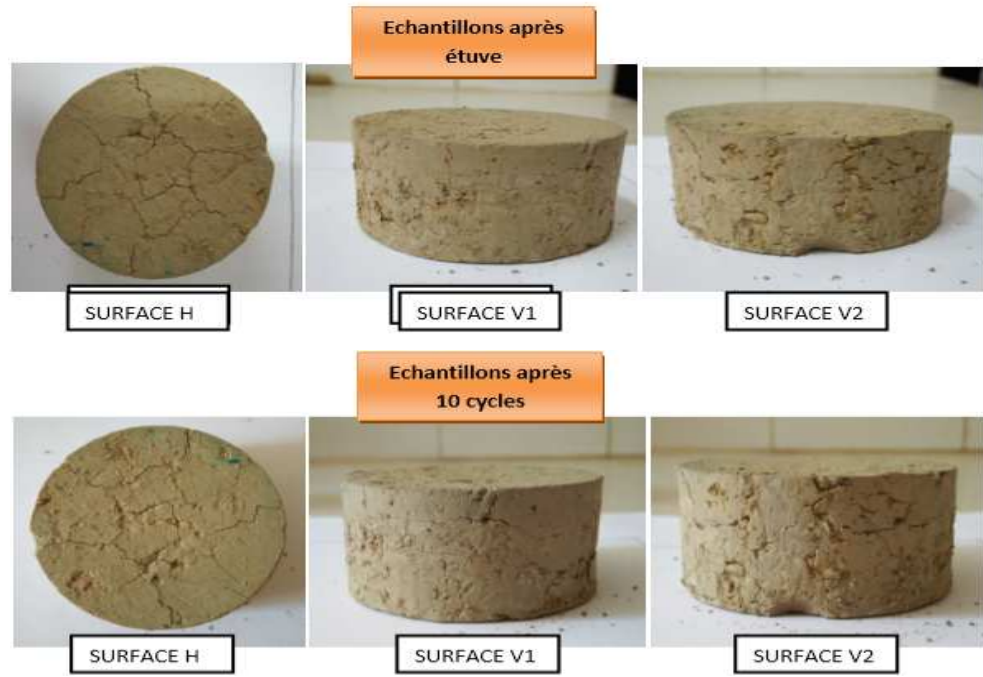


Figure IV.23 : Images de l'échantillon d'argile N°01 de C.V compacté pendant l'essai de canicules.

IV/2.2.3.4 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 IV.6 : Variation de la masse des échantillons pendant l'essai de canicules.

ECH(g)	Etat naturel	Après étuve	Fin de l'essai
ECH01 (Azazga)	141,673	110,623	112,52
ECH02 (Azazga)	143,071	111,522	113,818
ECH01 (Tigzirt)	160,543	145,367	147,065
ECH02 (Tigzirt)	172,524	157,847	158,145
ECH01 (C.V)	147,543	128,395	130,092
ECH02 (C.V)	145,667	116,014	117,612

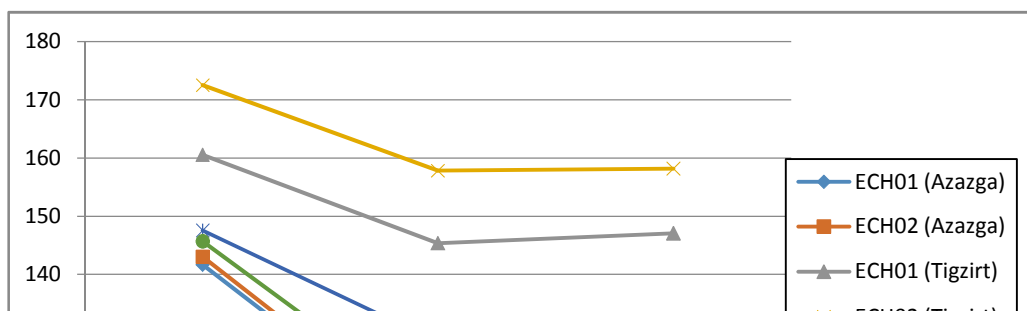


Figure IV.24 : Variation de la masse des échantillons sous l'effet des canicules.

- **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 laquelle 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 plan vertical et horizontal (Figures IV.22 à IV.24).

IV.2. Conclusion

Ce chapitre a représenté les résultats des essais d'identification et les sollicitations des essais climatiques saisonnières cycliques appliquées et réalisés au laboratoire pour les échantillons étudiés, ont permis d'avoir une idée sur leurs natures physiques et minéralogiques, qui ont progressé pendant le déroulement des essais, les effets de retrait-gonflement, les fissures et même le changement de la texture et de la structure des échantillons.

La présence des minéraux a joué un rôle très important dans le changement de comportement des échantillons.

Dans le chapitre suivant, on va confirmer les résultats obtenus dans ce chapitre par les résultats d'étude de la variation de leurs dimensions fractales en (2D) à l'aide d'un logiciel MATLAB.



Chapitre V

***Calcul de la
dimension fractale***

En 2D

V.1 Introduction

Mandelbrot a introduit une nouvelle géométrie dite « fractale ». Les objets fractals sont des figures géométriques, qui sont caractérisés essentiellement par leur irrégularité. Le sol qui est à la fois un milieu fragmentaire et poreux à structure assez complexe où une représentation fractale pourrait lui être particulièrement appropriée. Il est nécessaire alors de caractériser la texture et la forme des grains et des échantillons de sol à l'aide de la dimension fractale. Des techniques de mesure de la dimension fractale ont été utilisées et de nombreuses méthodes ont été inventées et sont à disposition, comme la méthode de Box Counting, utilisée dans cette étude par les deux étudiants Ourrad. K, 2018 et Zeta. M, 2017, qui prend en considération les changements de forme et de surface au niveau des échantillons étudiés.

V.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 de Box Counting est définie dans le chapitre III. Un exemple du calcul est représenté ci-dessous (Figure V.1), un échantillon d'argile de forme cylindrique, de $\varnothing = 63.4$ mm.

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

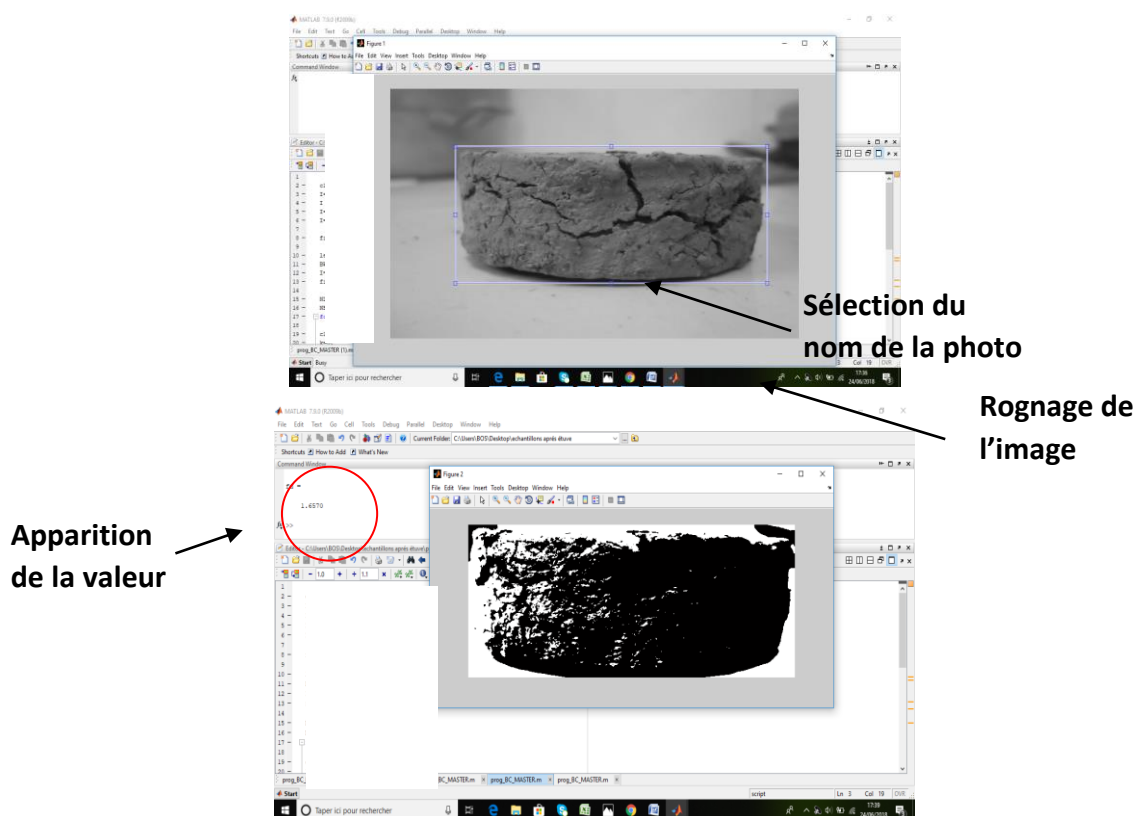


Figure V.1 : Exemple du calcul de la DF_R par le logiciel MATLAB R2009b.

V.3 Résultats et interprétations

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

<i>Echantillon N°01 d'Azazga.</i>			
Étapes	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

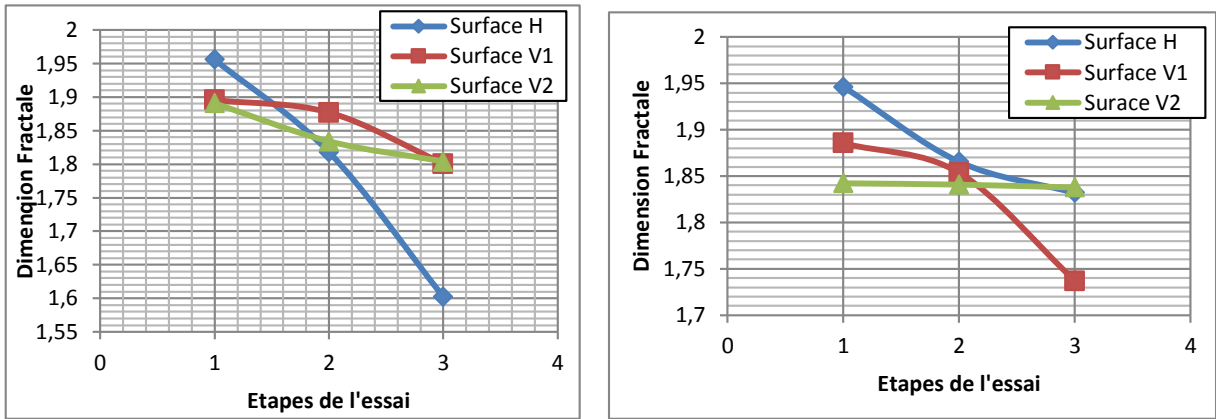


Figure V.2 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour les échantillons N°1 et N°02 d'Azazga, respectivement.

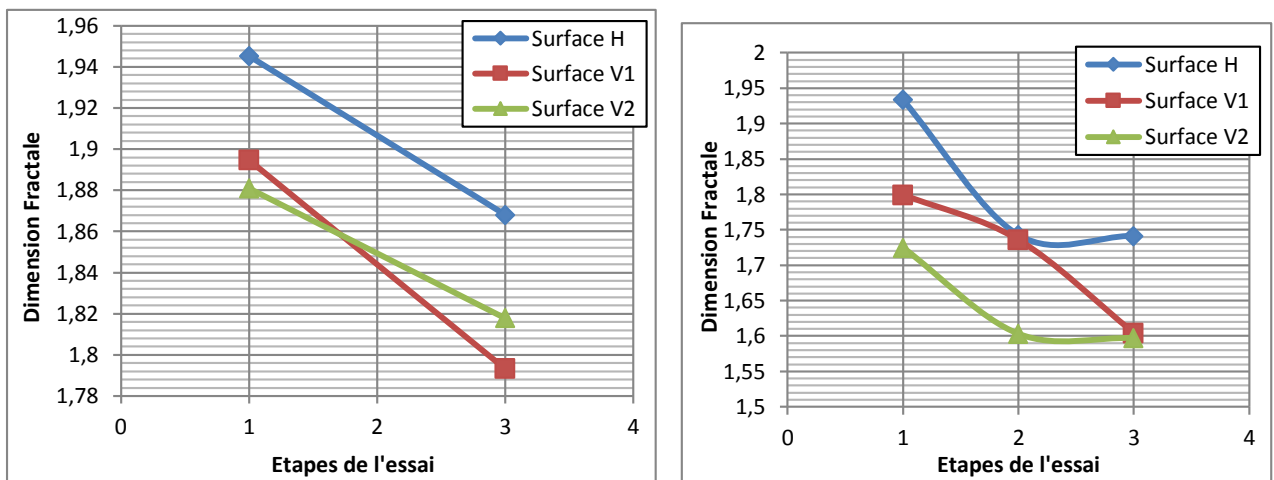


Figure V.3 : Résultats du calcul de la dimension fractale les échantillons Azazga.N et N°01 Tizirt, respectivement.

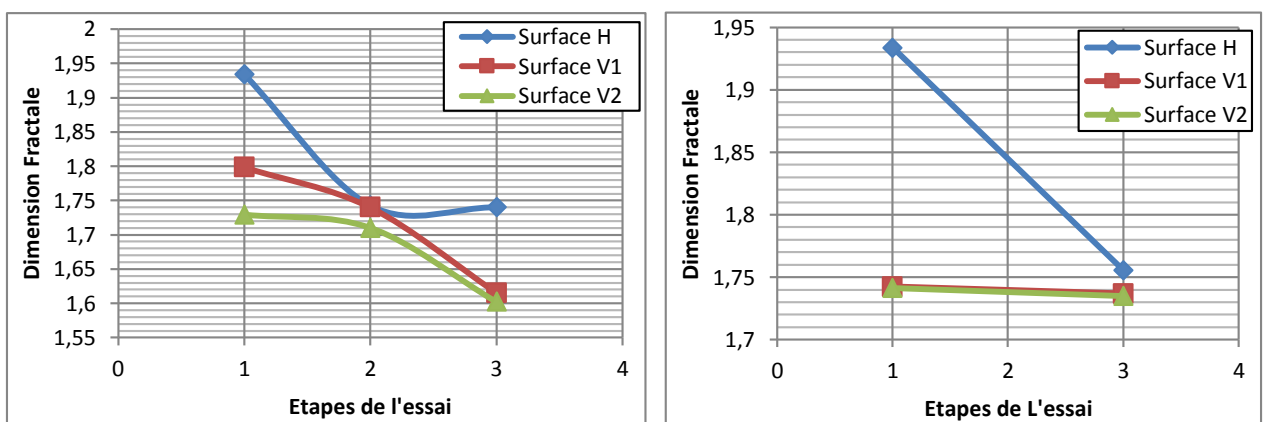


Figure V.4 : Variation de la dimension fractale en fonction des etapes de l'essai pour les échantillons N°02 Tizirt et Tizirt.N, respectivement.

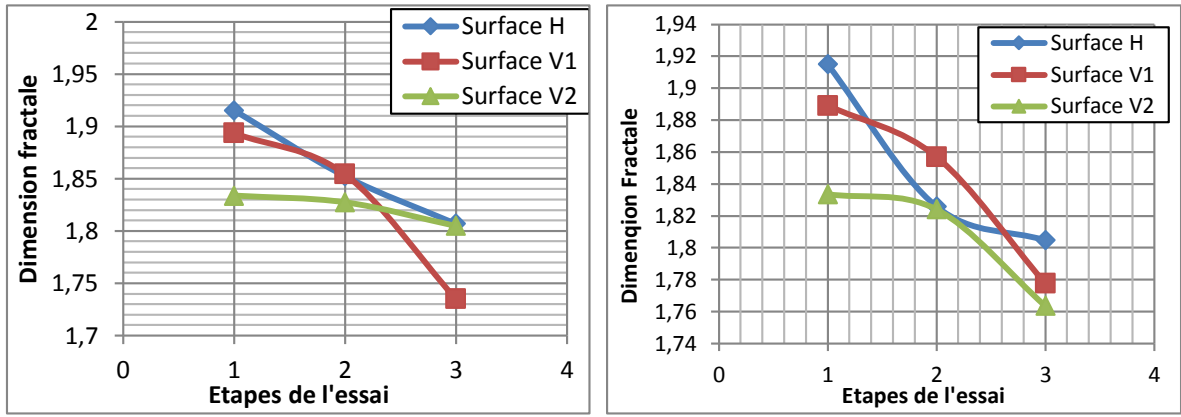


Figure V.5 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour les échantillons N°01 et N°02 de centre-ville, respectivement.

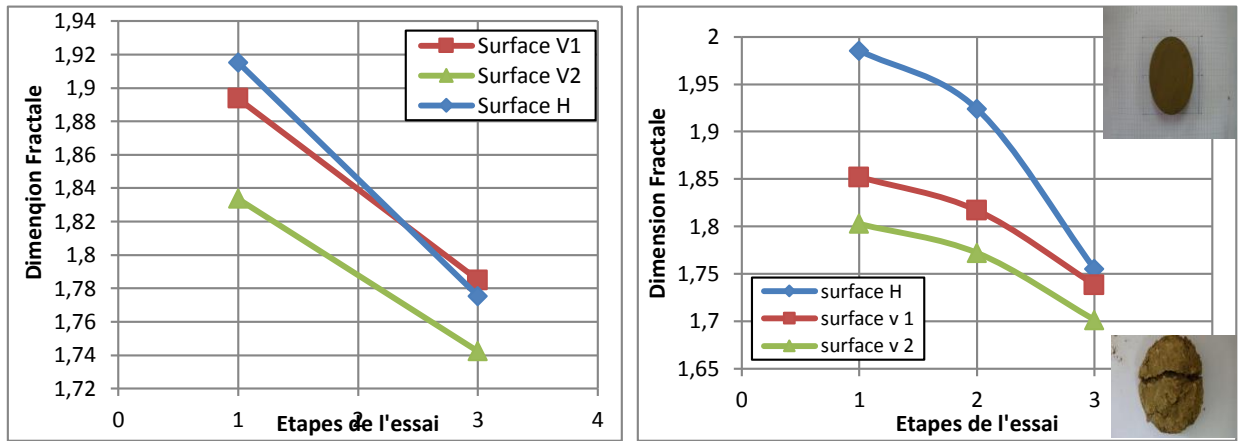


Figure V.6 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour les échantillons C.V.N.Compacté et N°1 de F, respectivement.

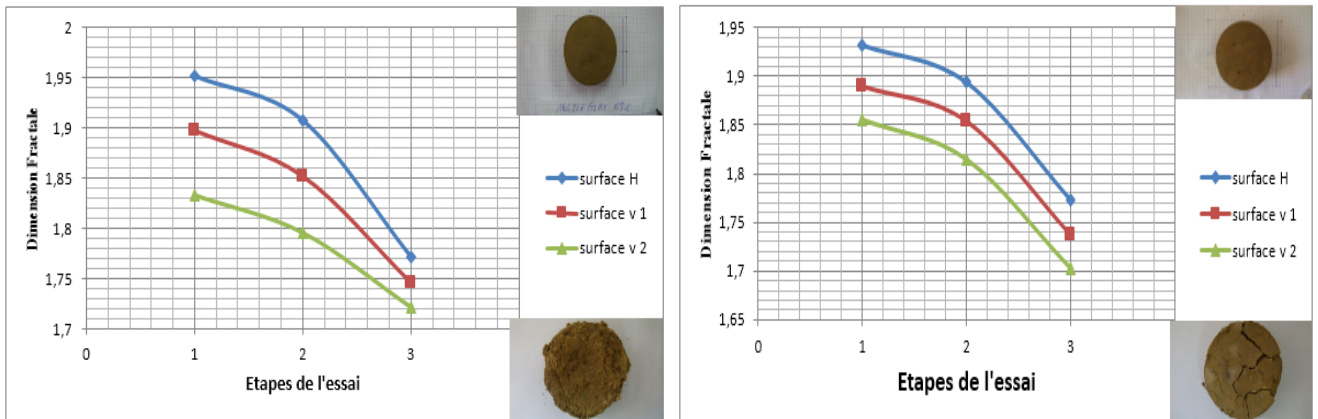


Figure V.7 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour les échantillons N°2 de F et N°3 de F.N, respectivement.

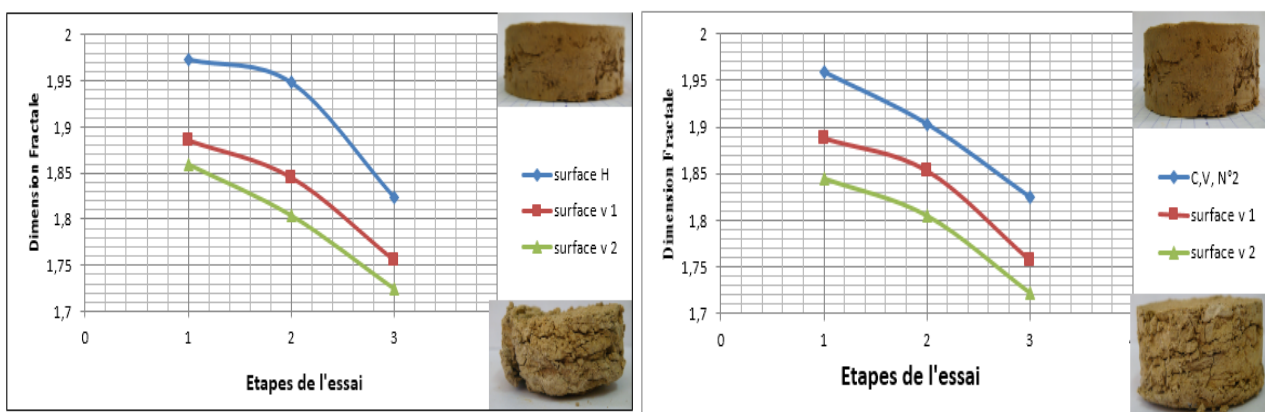


Figure V.8 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour les échantillons N°1 de C.V et N°2 de C.V, respectivement.

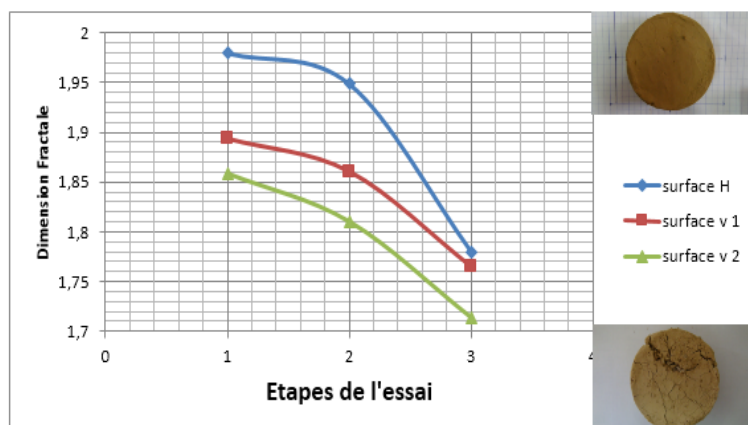


Figure V.9 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon N°3 de C.V.N.

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

Tableau V.2 : 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

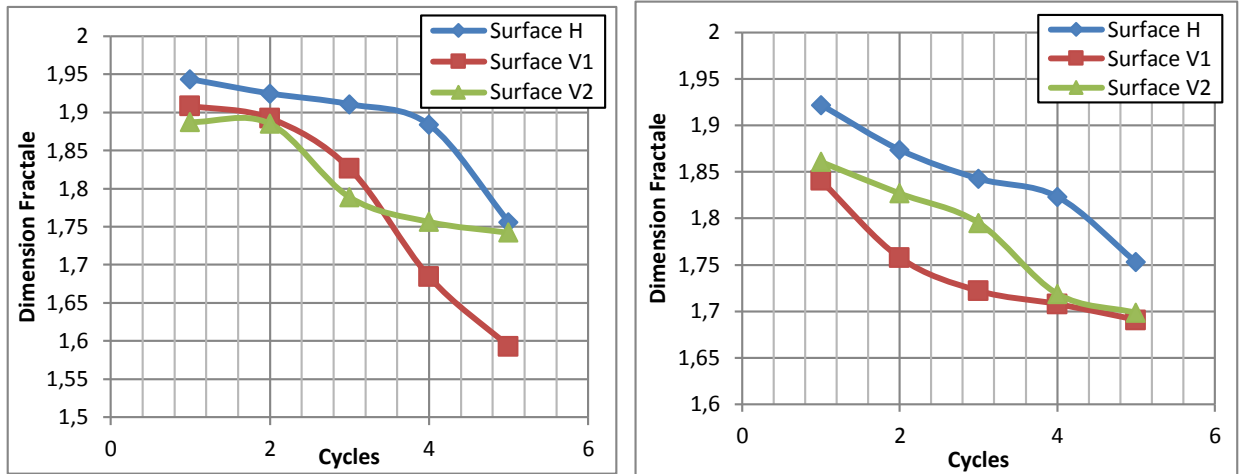


Figure V.10 : Variation de la dimension fractale des échantillons d'Azazga et de Tizirt, respectivement, en fonction des cycles de Dégradabilité.

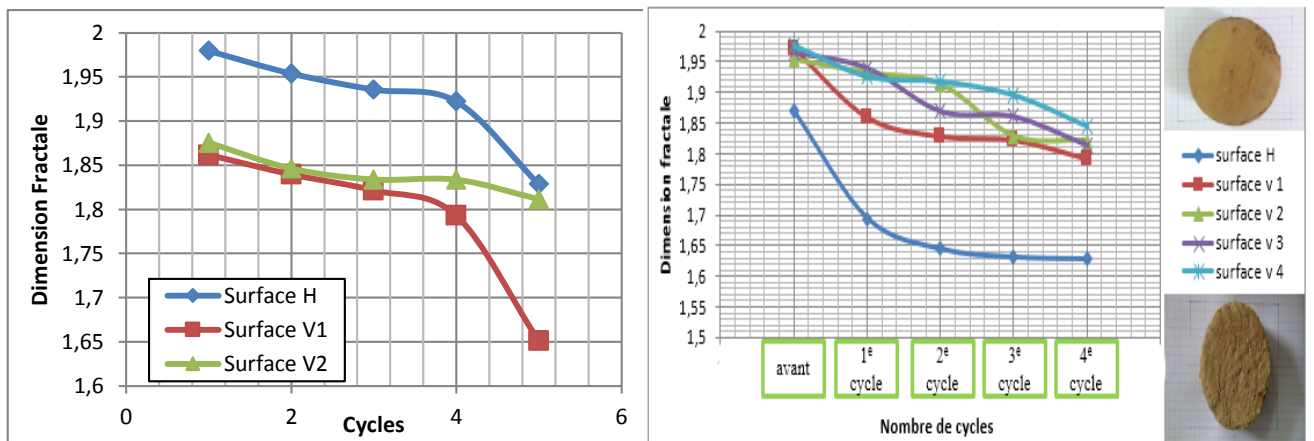


Figure V.11 : Variation de la dimension fractale des échantillons de C.V.Compacté et N°1 de C.V, respectivement, en fonction des cycles de Dégradabilité.

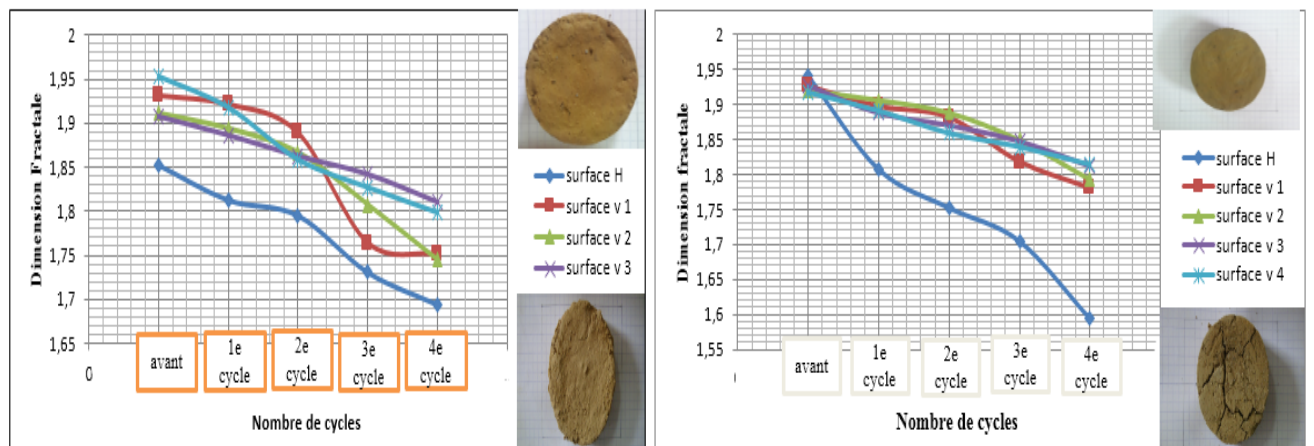


Figure V.12 : Variation de la dimension fractale des échantillons N°2 de C.V et N°1 de F, respectivement, en fonction des cycles de Dégradabilité.

Tableau V.3 : Variation de la dimension fractale en fonction des cycles pour l'argile F.N°2.

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

Remarque

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

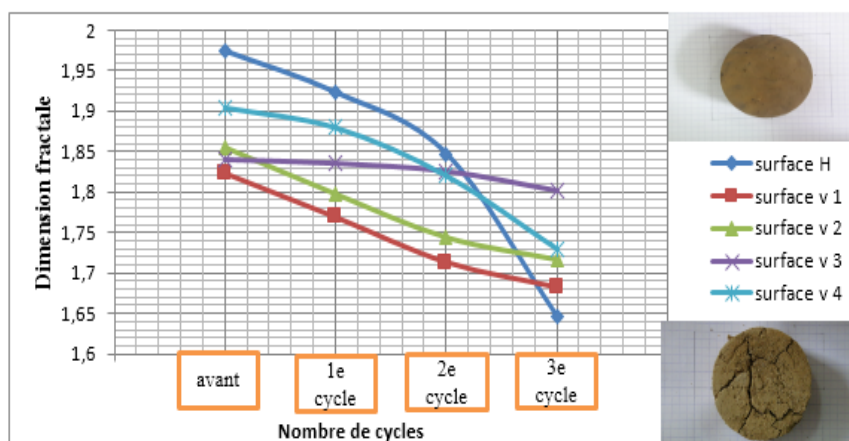


Figure V.13 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon N°2 de Fr en fonction des cycles climatiques de l'essai Dégradabilité.

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

Tableau V.4 : Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile d'Azazga N°01.

Echantillon d'Azazga N°01			
	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

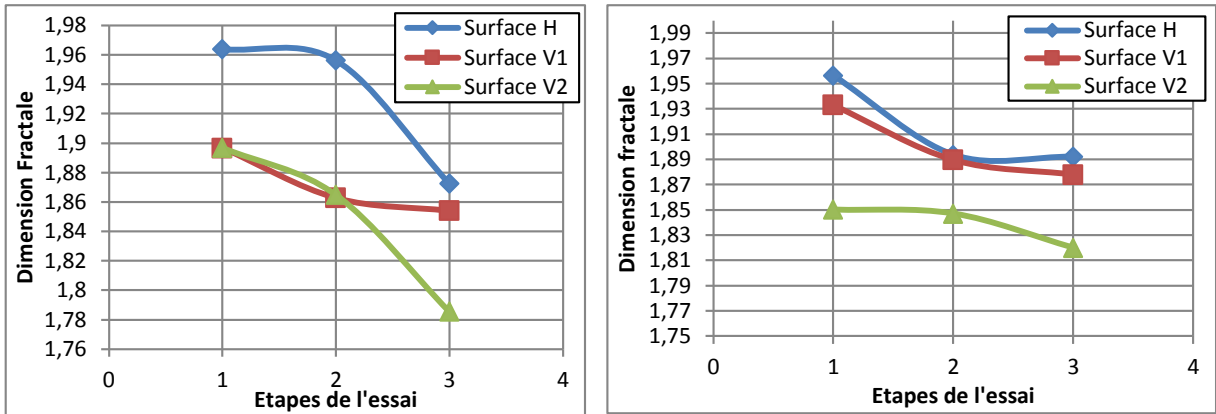


Figure V.14 : Variation de la dimension fractale des échantillons N°01 et N°02 d'Azazga, respectivement, en fonction des cycles de Canicules.

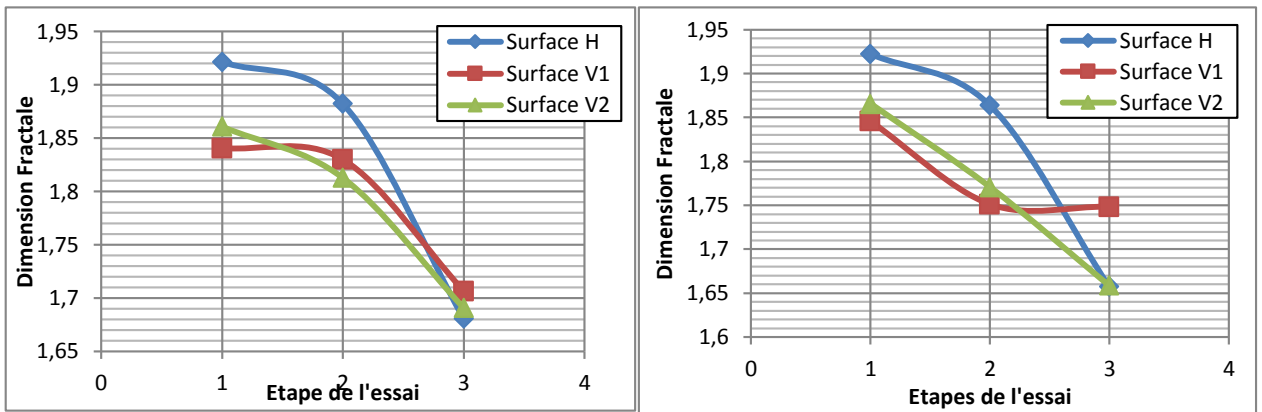


Figure V.15 : Variation de la dimension fractale des échantillons N°01 et N°02 de Tizirt, respectivement, en fonction des cycles de Canicules.

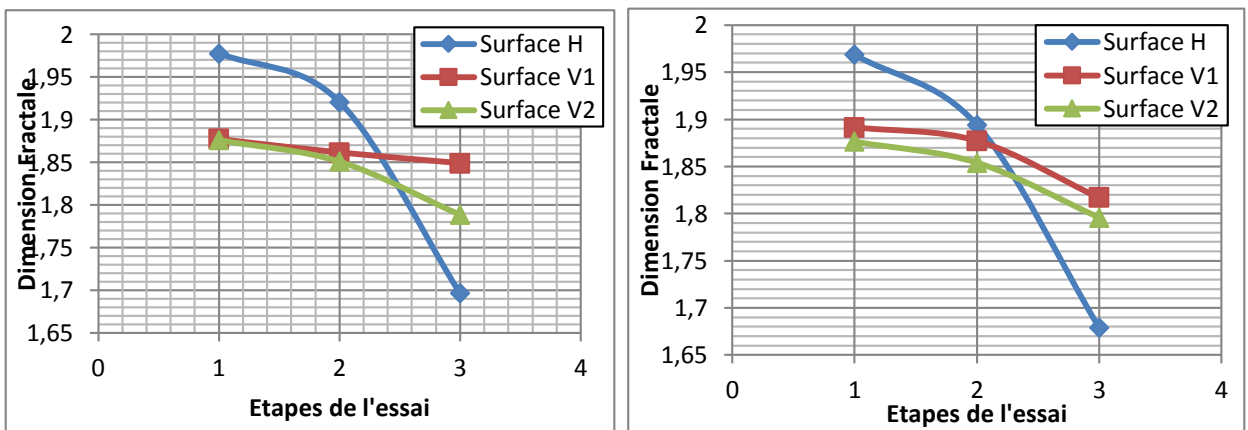


Figure V.16 : Variation de la dimension fractale des échantillons N°01 et N°02 de C.V.Compacté, respectivement, en fonction des cycles de Canicules.

- **Interprétation des résultats des trois essais**

Les figures des échantillons présentées ci-dessus 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'étapes de l'essai.

Les figures (V.2...V.16) montrent que la valeur de DF_R diminue avec l'augmentation du nombre de cycles appliqués, durant les trois 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 sont une cause de cette augmentation et de la diminution de la DF_R calculée.

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

- Durant l'essai de canicules une diminution subite a été observée surtout sur la surface horizontale des échantillons de Tizirt.

- La dimension fractale des échantillons témoin (état naturel) durant l'essai de Gel dégel varient presque de la même façon (Figures, V.3 ; V.4 et V.6).

- La diminution rapide de la dimension fractale des échantillons a été remarqué dans :

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

- *La surface verticale des échantillons N°01 et N°02 de Azazga.

Généralement on trouve la valeur minimale est calculée pour les échantillons du sol de Freha, parce que son potentiel de gonflement est très élevé. Pour l'échantillon de Freha la diminution de DF_R est subitement rapide, par contre pour l'échantillon de Centre-ville la diminution est lente.

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

V.4 Conclusion

La dimension fractale est un paramètre qui permet une meilleure précision dans la compréhension des changements engendrés par les différentes sollicitations et effets climatiques, elle est affectée par plusieurs paramètres, qui influent significativement sur le mode de rupture des sols, et aussi des routes, les quels conduisent à la diminution de DF_R . Les résultats du calcul de la DF_R obtenus avec la méthode de **Box Counting** confirment les résultats vus durant les essais expérimentaux réalisés et présentés dans le chapitre précédent, ce qui prouve son efficacité. Dans le chapitre suivant, une autre étude de la variation de leurs dimensions fractales en (3D) sera faite à l'aide de logiciels MATLAB.



Chapitre VI

***Calcul de la
dimension fractale***

En 3D

VI.1 Introduction

Les sols sont des milieux hétérogènes, ils se différencient par la forme, les dimensions, l'existence de vides et de fissures, etc. Cette hétérogénéité est due aux processus qui ont conduit à leur formation. La notion de dimension fractale est en accord avec le concept de dimension et de complexité de la structure des sols aléatoires. Des techniques de mesure de cette nouvelle dimension ont été utilisées et de nombreuses méthodes ont été inventées et sont à disposition, comme la méthode de Box Counting déjà utilisée dans l'étude précédente. Un programme d'une autre méthode a été implémenté à base de la méthode 3D de Comptage Différentiel de Boîtes ou Differential Box Counting (DBC), qui permet de faire un calcul des dimensions fractales de rugosité et de fragmentation ; ce qui rend l'algorithme puissant et un peu plus compliqué que le précédent (celui de la méthode bidimensionnelle de Box Counting). Dans ce chapitre on va présenter les calculs de la dimension fractale en 3D, et l'ensemble des valeurs obtenues est les résultats détaillés qui ont été effectués avant et après chaque essai sur les mêmes images des échantillons sélectionnés pour la méthode 2D à l'aide du logiciel MATLAB R2015a.

VI.2 Résultats et interprétations

❖ Résultats de l'essai de Gel/ Dégel

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

Tableau
Résultats
de la
fractale
l'argile
N°01.

<i>Echantillon N°01 d'Azazga.</i>			
Etapes	Surface H	Surface v 1	Surface v 2
Etat Naturel	1,9596	1,9813	1.9941
Après étuve	1.9967	2,0072	2.0149
48h après 10cycles	2,0239	2,0573	2.0408

VI.1 :
du calcul
dimension
pour
Azazga.

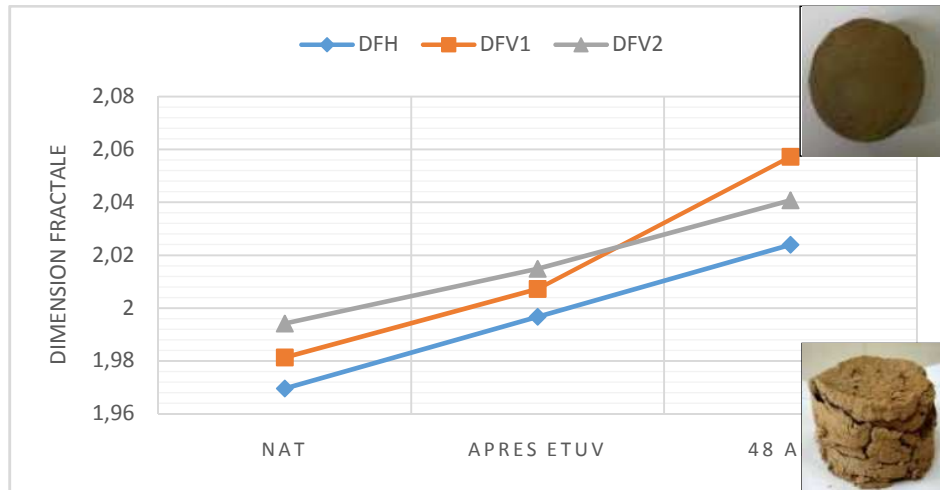


Figure VI.1 : Variation de DF en fonction des étapes de l'essai pour d'AzazgaN°1.

<i>Echantillon N°02 d'Azazga</i>			
Étapes	Surface H	Surface v 1	Surface v 2
Etat Naturel	1.9675	1.985	1.9878
Après étuve	2.0134	1.9848	1.9819
48h après 10 cycles	2.0459	2.0017	2.0474

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

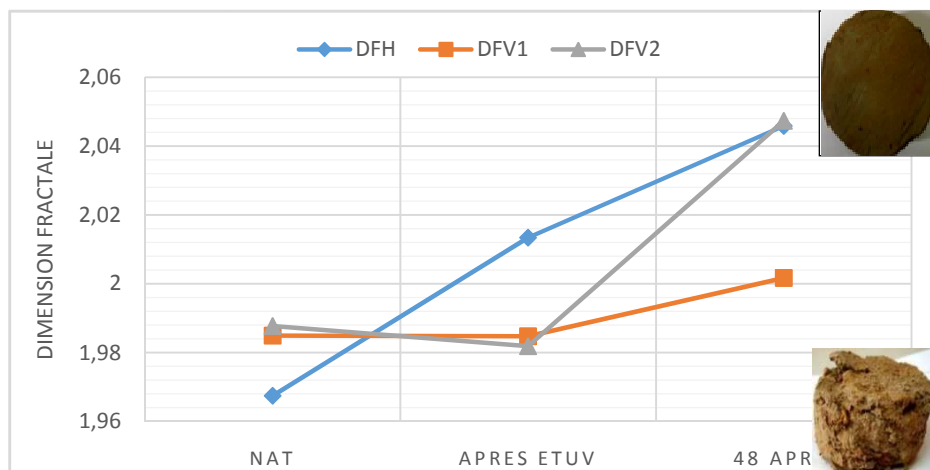


Figure VI.2: Variation de la dimension fractale en fonction des Etapes de l'essai pour l'échantillon N°02 d'Azazga

<i>Echantillon Témoin d'Azazga</i>			
Etapes	Surface H	Surface v 1	Surface v 2
Etat Naturel	1.9673	1.9891	1.9908
48h après 10cycles	2.0402	2.0541	2.0447

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

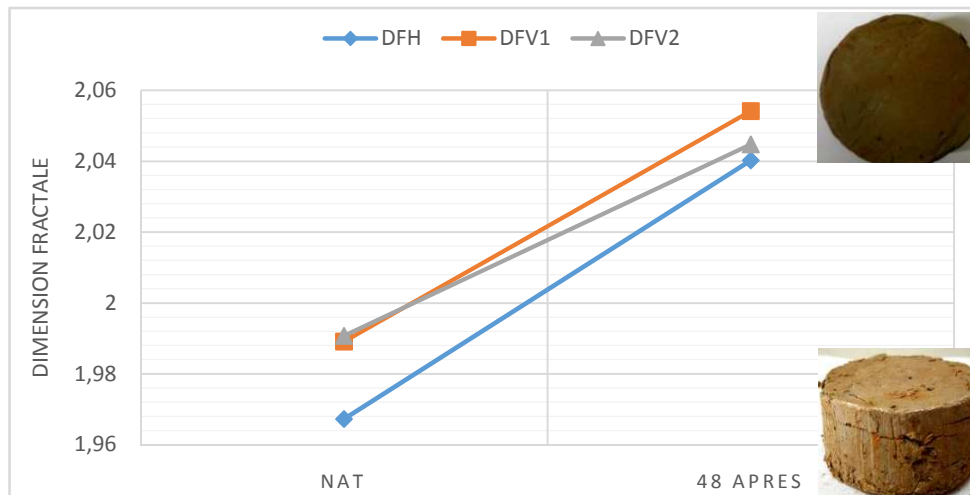


Figure VI.3 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile Témoin Azazga.N.

<i>Echantillon N°01 de Tizirt</i>			
Etapes	Surface H	Surface v 1	Surface v 2
Etat Naturel	1.9651	1.9535	1.9445
Après étuve	1.9601	2.0286	2.0191
48h après 10cycles	1.9871	2.0263	2.0171

Tableau VI.4 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile de Tizirt. N°1.

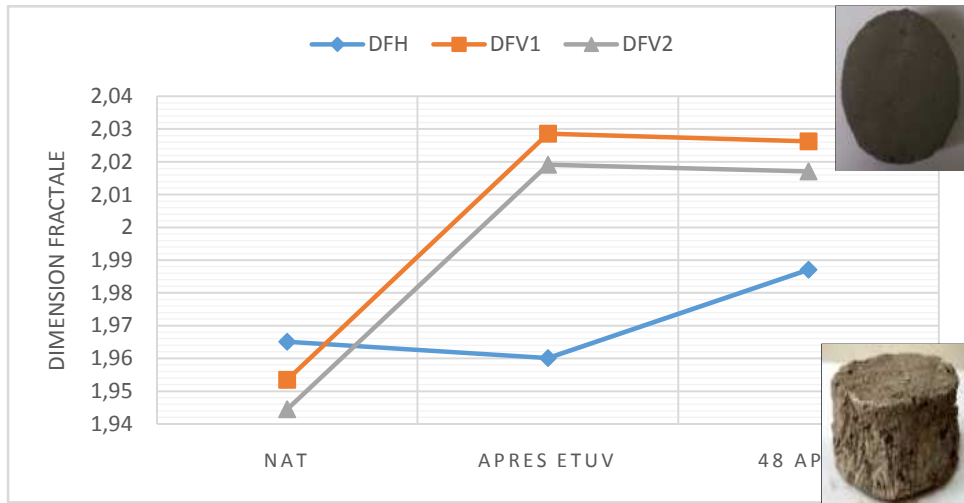


Figure VI.4: Variation de DF en fonction des étapes de l'essai pour TizirtN°01.

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

<i>Echantillon N°02 de Tizirt</i>			
Etapes	Surface H	Surface v 1	Surface v 2
Etat Naturel	1.9632	1.942	1.9529
Après étuve	2.0079	2.0157	2.009
48h après 10cycles	2.006	2.0487	2.0112

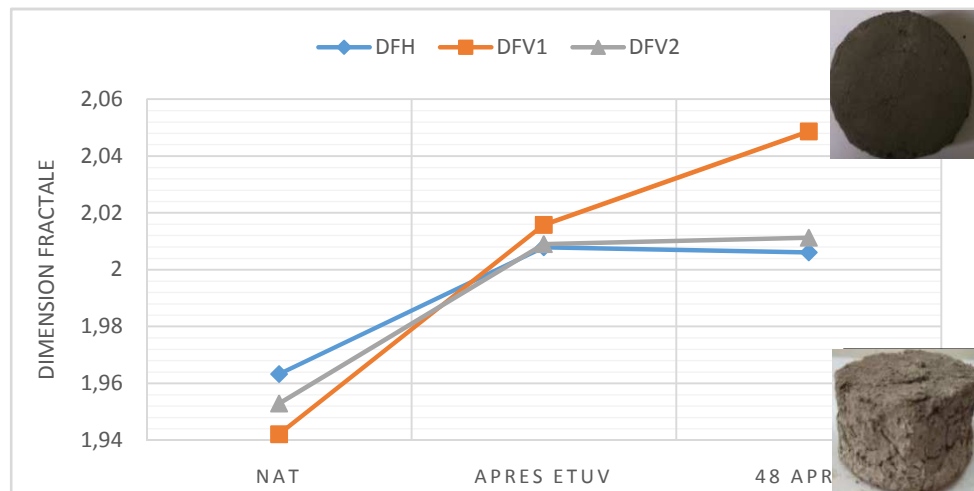


Figure VI.5: Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon N°02 de Tizirt.

<i>Echantillon Témoin Tizirt.N</i>			
Etapes	Surface H	Surface v 1	Surface v 2

Etat Naturel	1.9593	1.9426	1.9501
48h après 10cycles	2.0082	2.0455	2.0522

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

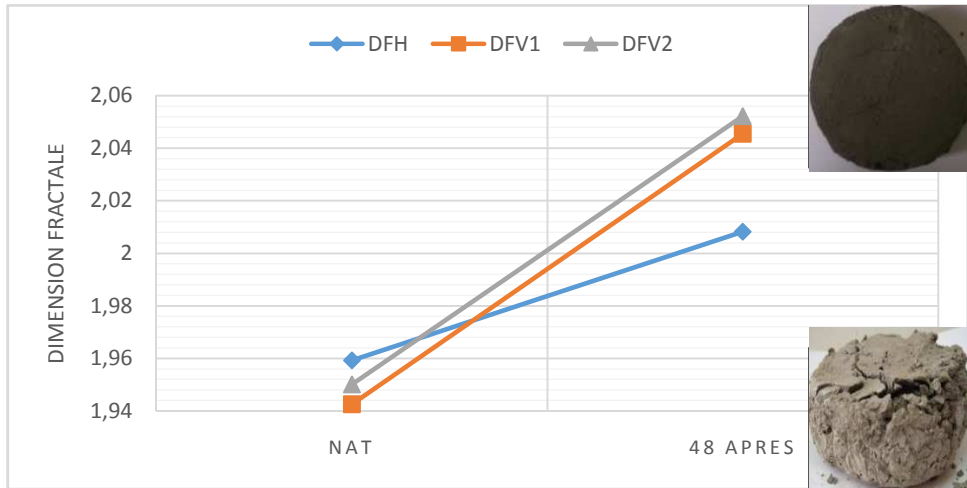


Figure VI.6 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile Témoin Tizirt.N.

Tableau
Résultats
de DF
l'argile de
VilleN°01

<i>Echantillon N°01 de C.V.Compacté</i>			
Etapes	Surface H	Surface v 1	Surface v 2
Etat Naturel	1.9538	1.9678	1.9846
Après étuve	1.9857	1.9694	1.9685
48h après 10cycles	1.9837	2.0245	2.0474

VI.7 :
du calcul
pour
Centre-

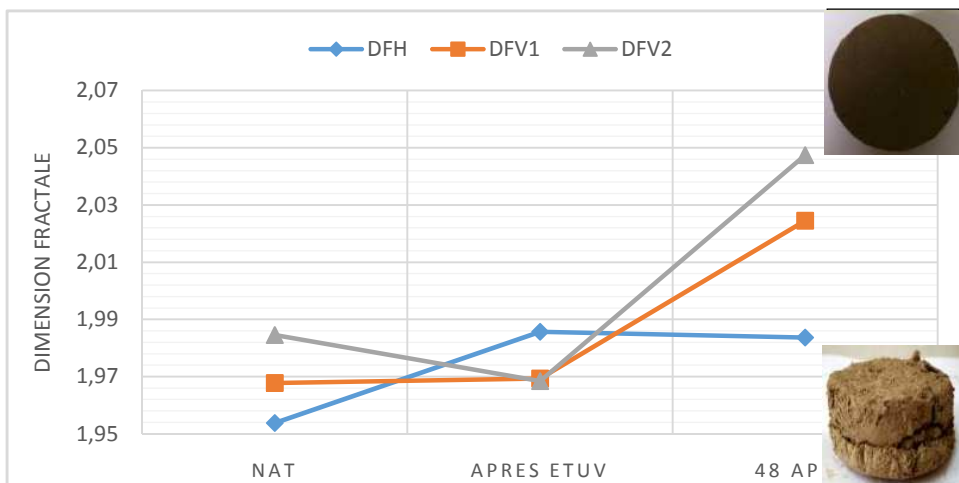


Figure VI.7: Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon N°01 de Centre-Ville.

Tableau VI.8: Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile de Centre-Ville N°02.

<i>Echantillon N°02 de C.V.Compacté</i>			
Étapes	Surface H	Surface v 1	Surface v 2
Etat Naturel	1.9465	1.979	1.9813
Après étuve	1.9902	1.9451	1.9293
48h après 10cycles	2.086	2.0293	2.0596

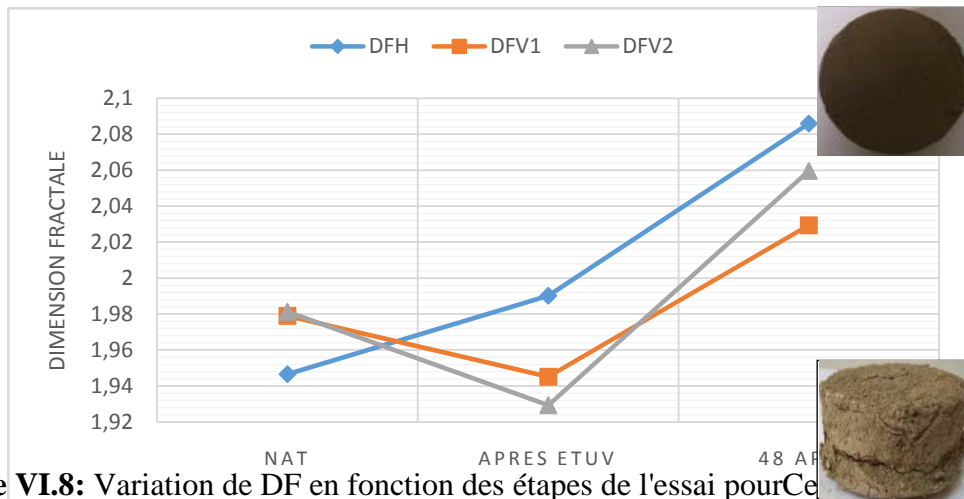


Figure VI.8: Variation de DF en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon N°02.

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

<i>Echantillon Témoin Centre ville</i>			
Étapes	Surface H	Surface v 1	Surface v 2
Etat Naturel	1.9442	1.9784	1.9795
48h après 10cycles	2.1032	2.0678	2.0647

C.V.N.Compacté.

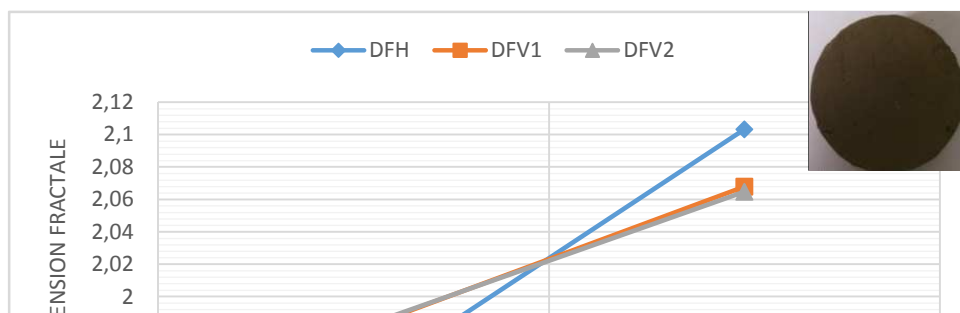




Figure VI.9 : Résultats du calcul de DF pour l'argile Témoin C.V.N.Compacte.

Tableau VI.10 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile F. N°1.

Freha N°1				
Etapas de l'essai		Surface H	Surface v 1	Surface v 2
1	Avant (naturel)	1.9304	2.054	1.9952
2	Après l'étuve	2.0035	2.078	1.9939
3	10 ^{ème} cycle (à 48h)	2.0274	1.9779	1.9899

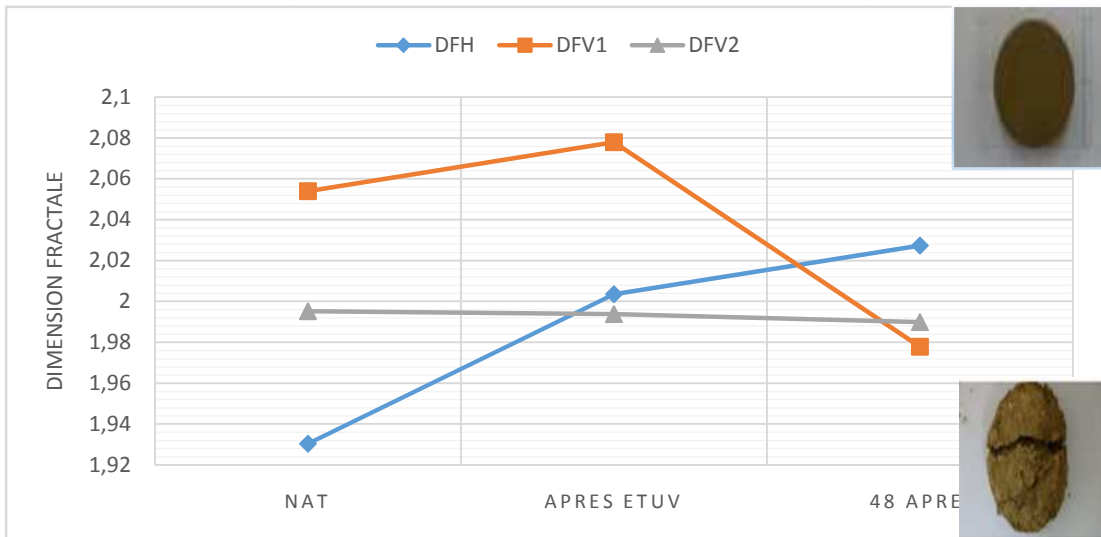


Figure VI.10: Variation de DF en fonction des étapes de l'essai pour Freha N°1.

Tableau VI.11 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile F. N°2.

Freha N°2				
Etapas de l'essai		Surface H	Surface v 1	Surface v 2
1	Avant (naturel)	1.9291	2.0168	2.0124
2	Après l'étuve	1.9644	1.9595	1.9844
3	10 ^{ème} cycle (à 48h)	1.9808	1.983	1.9842

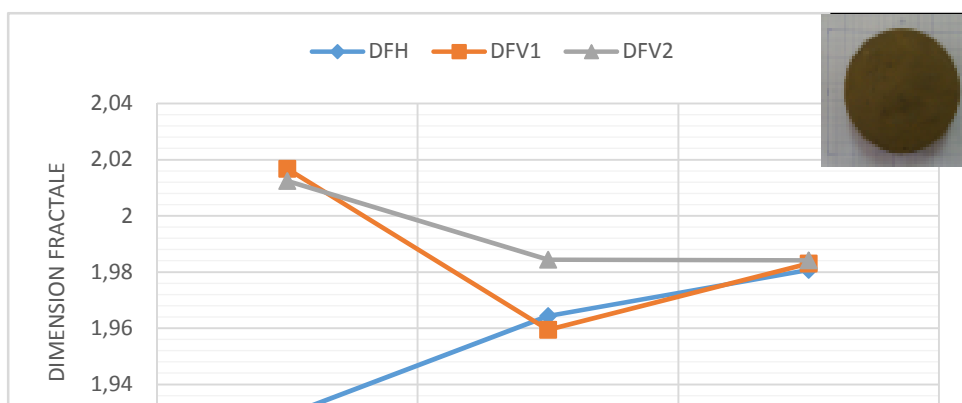




Figure VI.11: Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon N°2 de F.

Tableau VI.12: Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile F.N N°3.

Freha N°3				
Etapes de l'essai		Surface H	Surface v 1	Surface v 2
1	Avant (naturel)	1.9961	1.9494	1.9645
2	Après l'étuve	1.8953	1.855	1.7637
3	10 ^{ème} cycle (à 48h)	2.0412	2.0098	1.9882

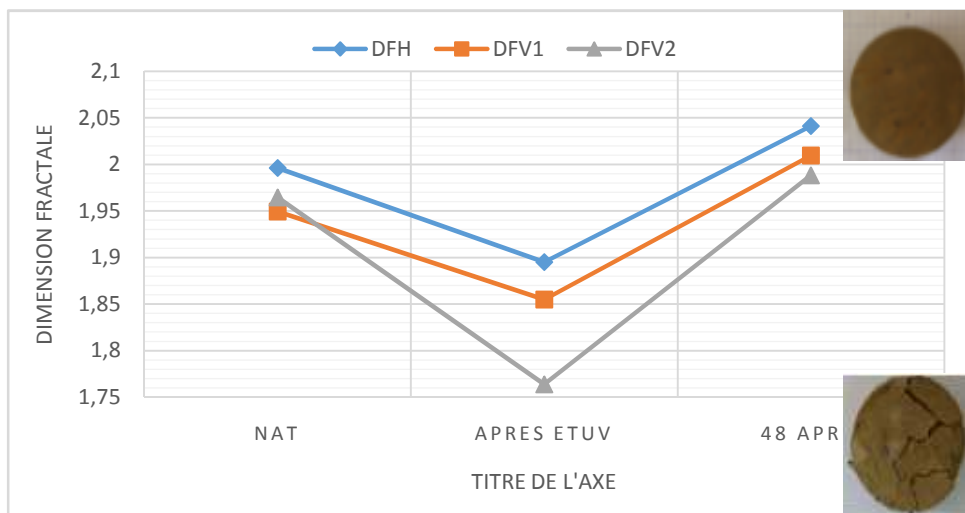


Figure VI.12: Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon N°3 de F.N.

Tableau VI.13: Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile C.V, N°1.

C.V, N°1				
Etapes de l'essai		Surface H	Surface v 1	Surface v 2
1	Avant (naturel)	1.9415	1.9888	1.953
2	Après l'étuve	1.9905	1.9836	1.9945
3	10 ^{ème} cycle (à 48h)	2.0079	2.0264	2.0048

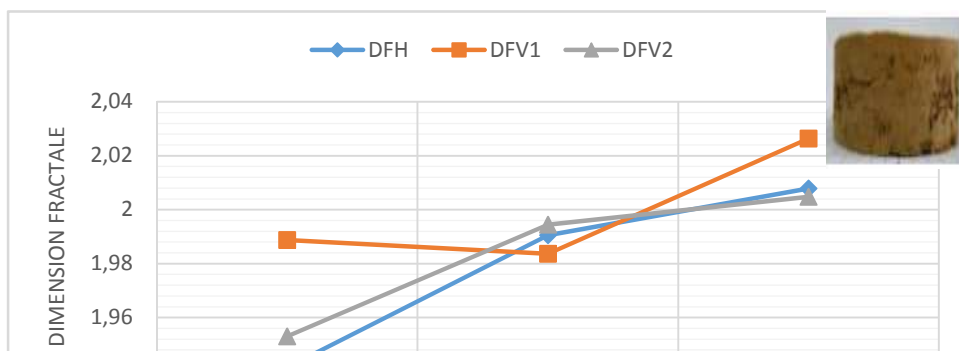




Figure VI.13 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon N°1 de C.V.

Tableau VI.14 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile C.V, N°2.

C.V, N°2				
Etapes de l'essai		Surface H	Surface v 1	Surface v 2
1	Avant (naturel)	1.9918	1.9916	1.9578
2	Après l'étuve	1.9716	1.9514	2.001
3	10^{ème} cycle (à 48h)	2.0039	2.0149	2.0175

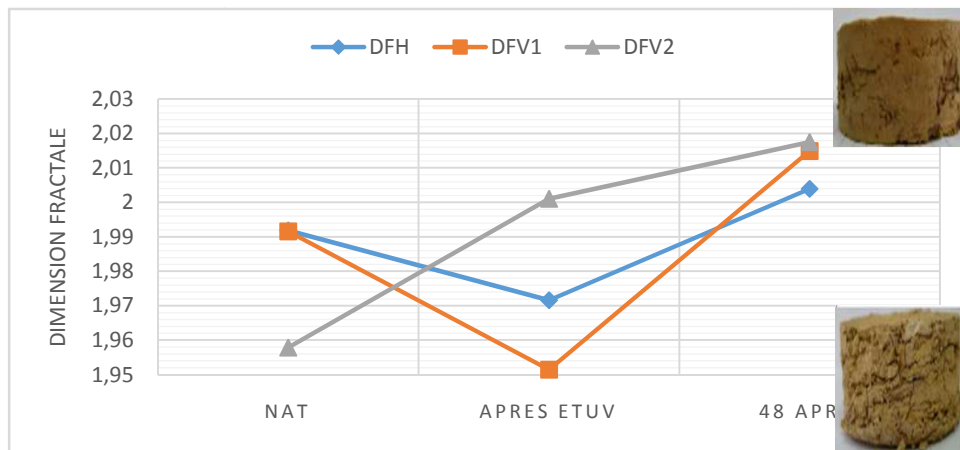


Figure VI.14 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai de pour l'échantillon N°2 de C.V.

Tableau VI.15 : Résultats du calcul de la dimension fractale pour l'argile C.V.N N°3.

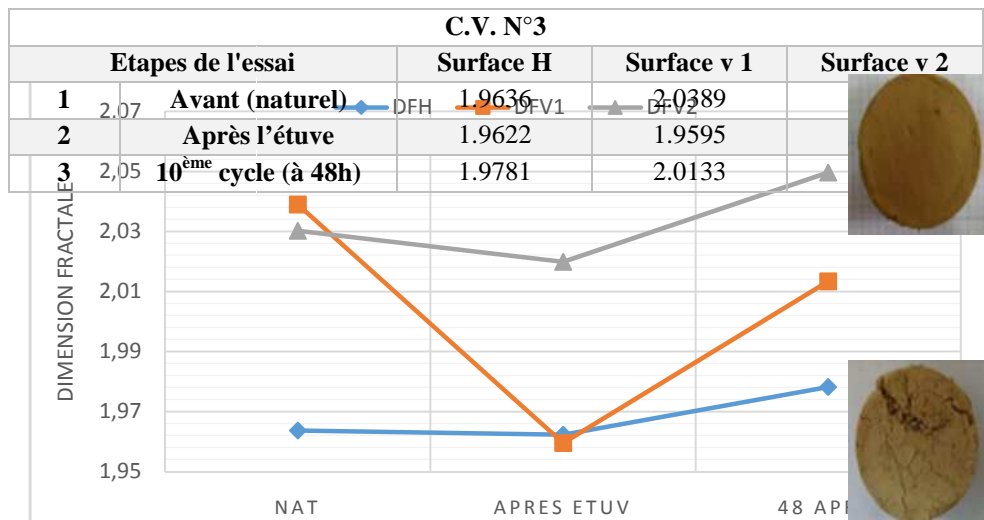


Figure VI.15 : Variation de DF en fonction des étapes de l'essai pour C.V.NN°3.

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

Tableau VI.16 : 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)	1.9632	2.0108	1.9975
1er cycle (2)	1.9854	1.9378	1.9936
2eme cycle (3)	2.0256	2.0387	2.0351
3eme cycle (4)	2.0555	1.9923	2.0049
4eme cycle (5)	2.0134	1.9875	2.0129

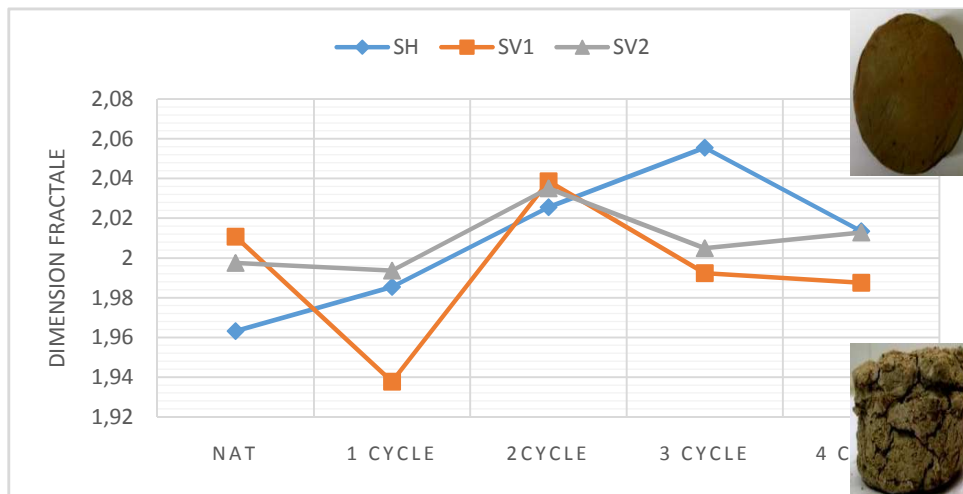


Figure VI.16 : Variation de DF de l'échantillon d'Azazga en fonction des cycles de Dégradabilité.

Tableau VI.17: 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)	1.9586	1.9495	1.9573
1er cycle (2)	1.9838	2.0156	2.0221
2eme cycle (3)	2.0276	2.0109	2.0215
3eme cycle (4)	2.0378	1.9977	2.0204
4eme cycle (5)	2.0417	2.0271	2.0168

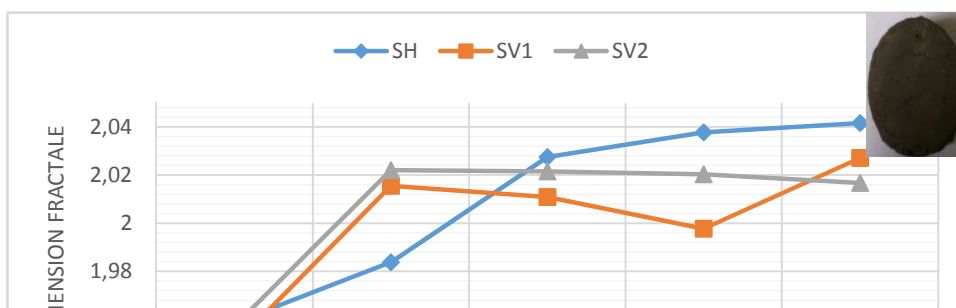




Figure VI.17 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de Tigzirt en fonction des cycles de Dégradabilité.

Tableau VI.18 : 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)	1.9481	1.9712	1.9746
1 ^{er} cycle (2)	2.1149	2.0513	2.0765
2 ^{eme} cycle (3)	2.0953	2.0609	2.0585
3 ^{eme} cycle (4)	2.0105	2.0104	2.0181
4 ^{eme} cycle (5)	1.9862	2.0171	2.0114

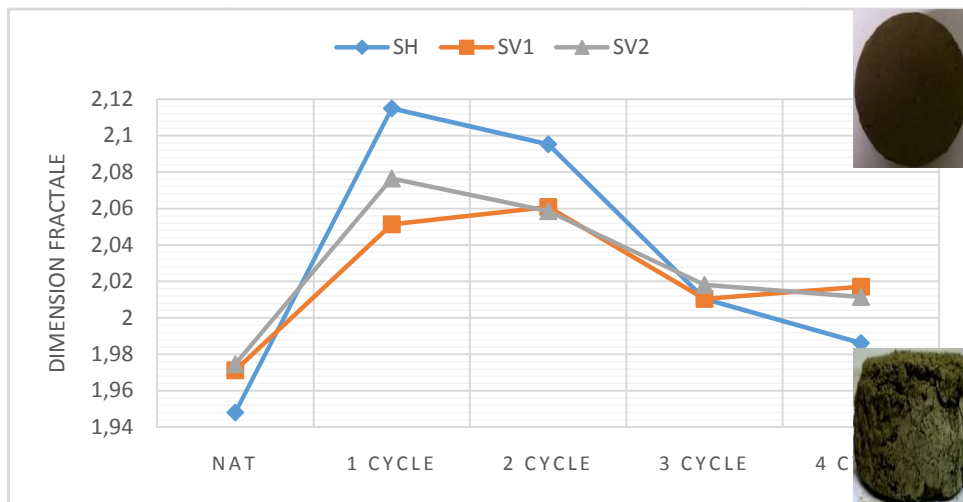


Figure VI.18 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de C.V.Compacté en fonction des cycles de Dégradabilité.

Tableau VI.19: Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile C.V N°1.

CV N°1					
	Surface H	Surface v 1	Surface v 2	Surface v 3	Surface v 4
Avant	1.9965	1.996	2.0022	1.9964	1.9919
Cycle 1	2.0014	2.0155	2.0098	2.0158	2.0142
Cycle 2	2.0267	2.0057	2.0103	2.015	2.0027
Cycle 3	2.0114	2.0106	2.0199	2.0167	2.0065
Cycle 4	2.0399	2.0068	2.0031	2.013	2.003

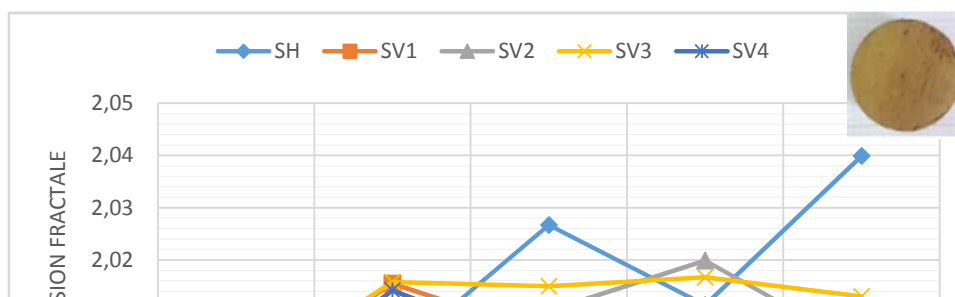




Figure VI.19 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon N°1 de C.V en fonction des cycles de Dégradabilité.

Tableau VI.20 : Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile C.V N°2.

CV N°2					
	Surface H	Surface v 1	Surface v 2	Surface v 3	Surface v 4
Avant	2.0257	2.0107	2.0109	2.0044	2.0224
Cycle 1	2.0269	2.0227	2.026	2.0059	2.0275
Cycle 2	2.0308	2.0121	2.0282	2.0095	2.0189
Cycle 3	2.0343	2.0079	2.0245	2.0166	2.013
Cycle 4	2.031	2.003	2.0138	2.0028	2.02

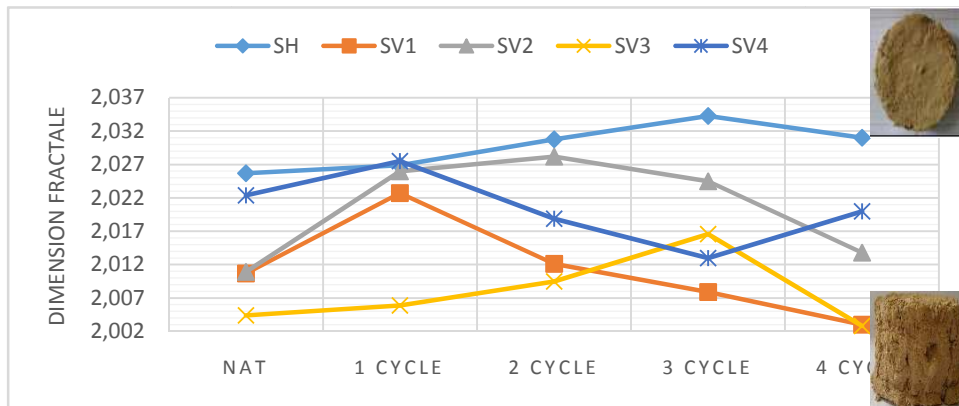


Figure VI.20 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon N°2 de C.V en fonction des cycles de Dégradabilité.

Tableau VI.21 : Résultats du calcul de la dimension fractale de l'argile F. N°1.

Freha N°1					
	Surface H	Surface v 1	Surface v 2	Surface v 3	Surface v 4
Avant	1.9977	1.9972	1.9977	1.9946	1.9908
Cycle 1	2.0187	2.008	2.0071	1.9983	2.0015
Cycle 2	2.0215	2.006	2.0152	1.9981	2.0158
Cycle 3	2.025	2.0058	2.0206	2.0051	2.0258
Cycle 4	2.0342	2.005	2.0106	2.0017	2.0174

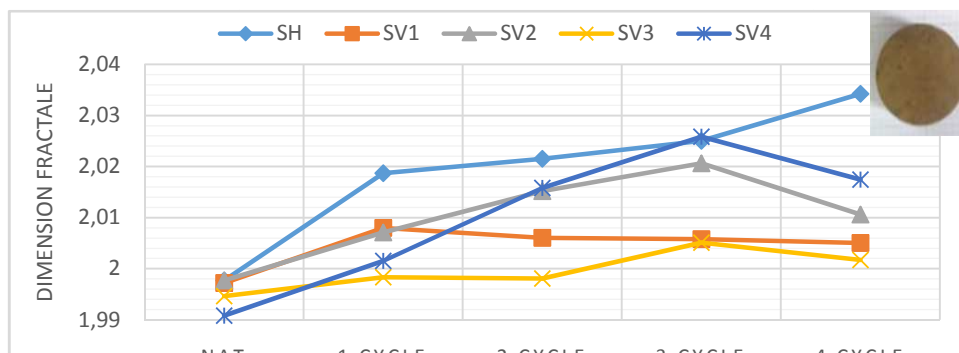




Figure VI.21 : Variation de DF de F. N°1 en fonction des cycles de Dégradabilité.

Tableau VI.22: Variation de DF en fonction des cycles pour l'argile F.N°2.

Freha N°2					
	Surface H	Surface v 1	Surface v 2	Surface v 3	Surface v 4
Avant	1.9941	2.0044	1.9953	2.0051	1.99
Cycle 1	2.0028	2.0068	2.0124	2.0011	2.0131
Cycle 2	2.0104	1.997	2.0351	2.0031	2.0204
Cycle 3	2.0296	2.0106	5.0659	2.036	2.0228
Cycle 4	/	/	/	/	/

Remarque

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

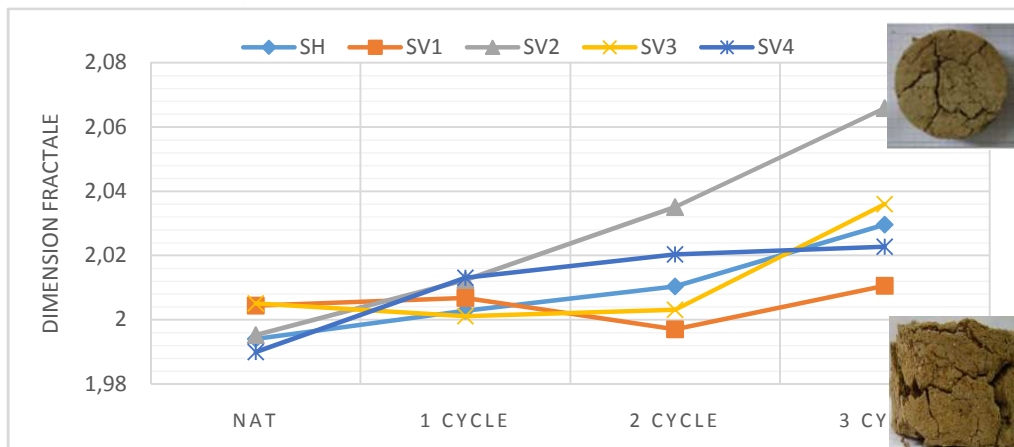


Figure VI.22 : Variation de DF de F.N°2 en fonction des cycles climatiques Dégradabilité.

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

Tableau VI.23 : 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)	1.9677	1.994	2.0037
Après Etuve (2)	2.0289	2.0088	2.0074
Après 10cycles (3)	1.9931	2.0046	2.0089

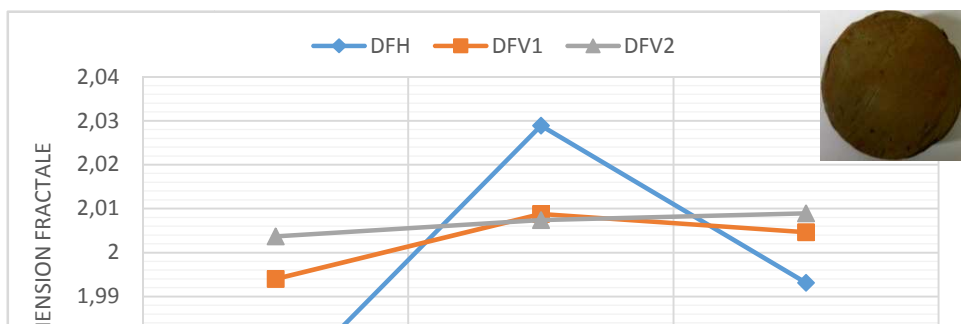




Figure VI.23 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de l'argile N°01 d'Azazga en fonction des cycles de Canicules.

Tableau VI.24 : 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)	1.9519	1.9953	1.9819
Après Etuve (2)	2.0734	2.0018	2.0561
Après 10cycles (3)	2.0996	2.011	2.1112

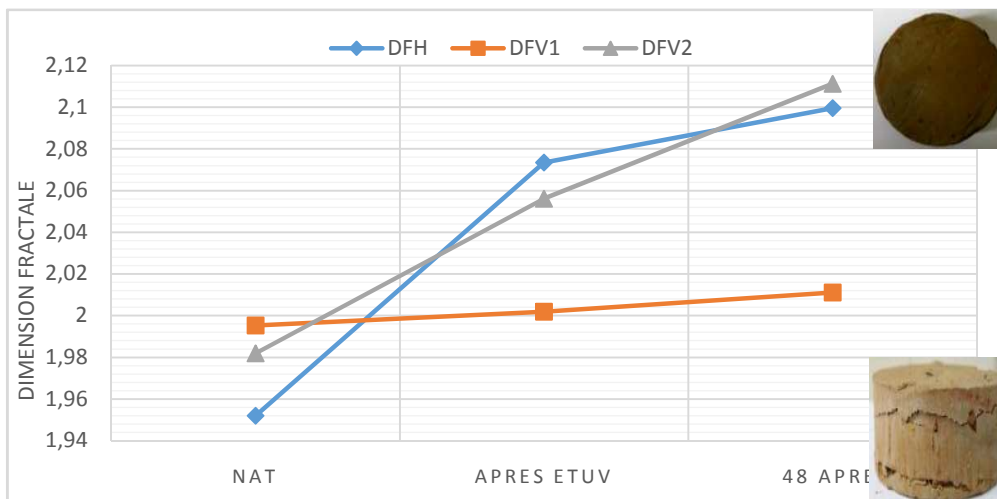


Figure VI.24 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de l'argile N°02 d'Azazga en fonction des cycles de Canicules.

Tableau VI.25 : 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)	1.9596	1.9572	1.992
Après Etuve (2)	2.002	2.0598	2.0547
Après 10cycles (3)	2.0087	2.0153	1.948

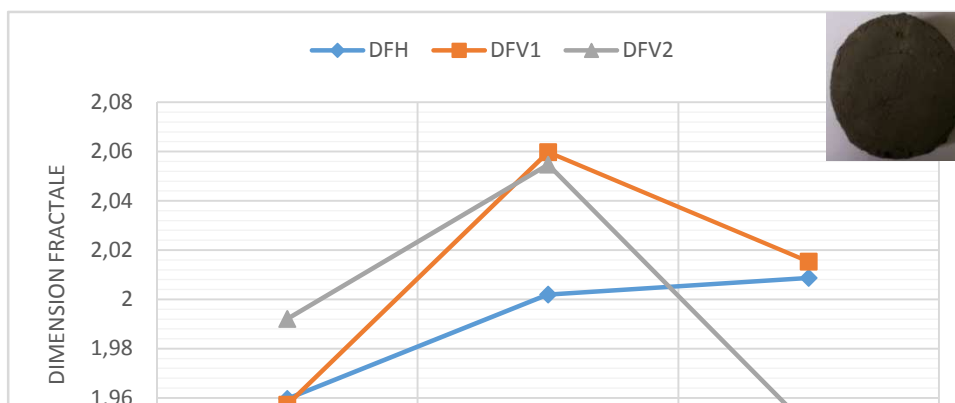




Figure VI.25 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de l'argile N°01 de Tizirt en fonction des cycles de Canicules.

Tableau VI.26 : 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)	1.9686	1.9524	1.9441
Après Etuve (2)	2.038	2.0415	2.0444
Après 10cycles (3)	2.0185	2.0266	2.0312

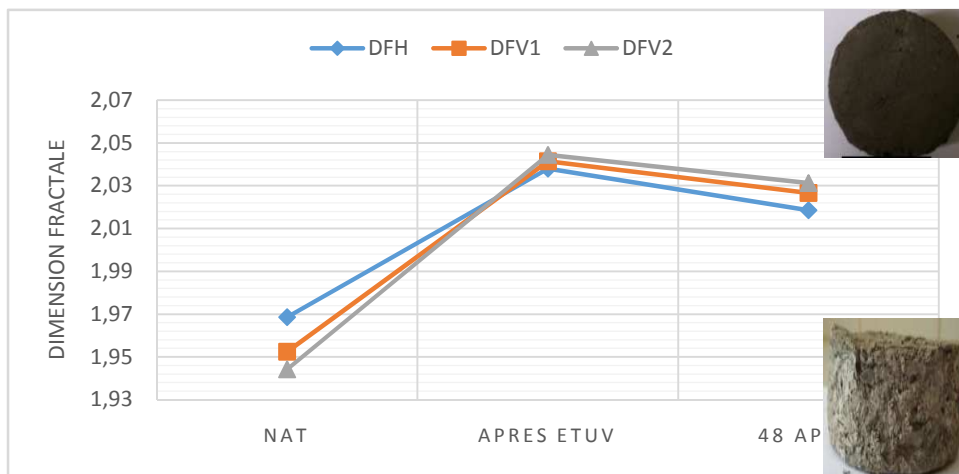


Figure VI.26 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de l'argile N°02 de Tizirt en fonction des cycles de Canicules.

Tableau VI.27 : 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)	1.9555	1.985	1.975
Après Etuve (2)	2.0055	2.0389	2.0602
Après 10cycles (3)	2.009	2.0426	2.0467

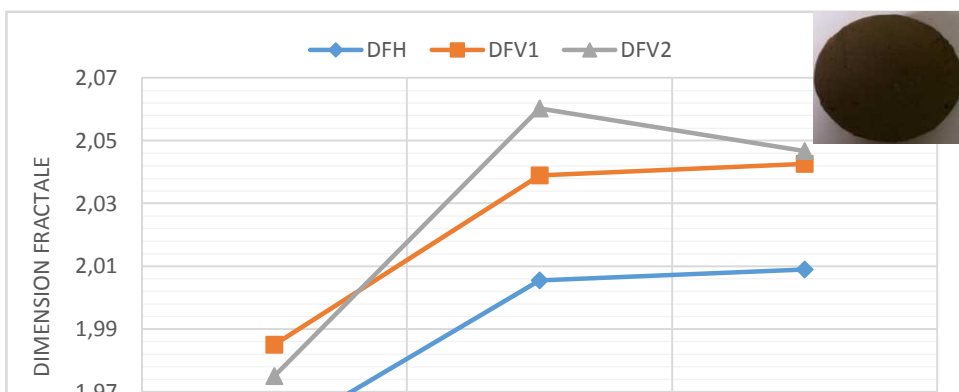




Figure VI.27 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon de l'argile C.V.Compacté N°01 en fonction des cycles de Canicules.

Tableau VI.28 : 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)	1.9443	1.9741	1.9759
Après Etuve (2)	1.957	2.0327	2.0525
Après 10cycles (3)	1.9683	2.0365	2.0363

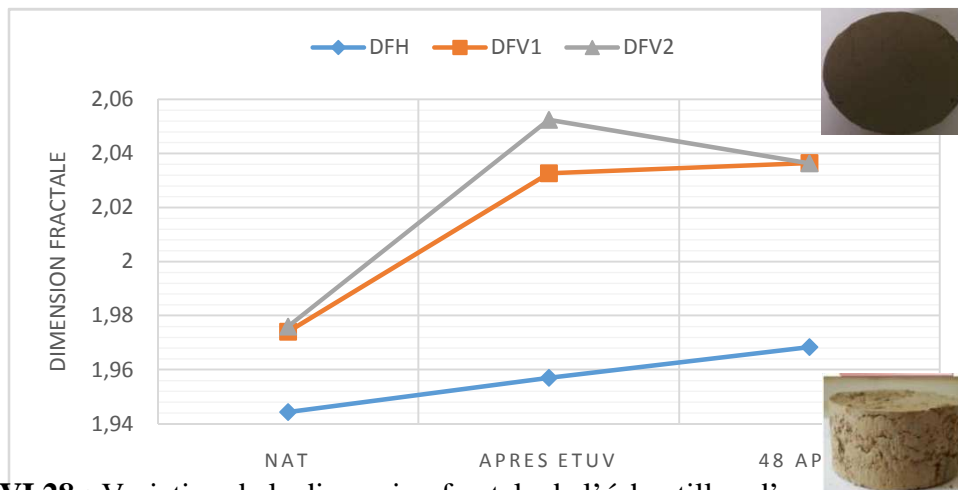


Figure VI.28 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon d'argile C.V.Compacté N°02 en fonction des cycles de Canicules.

• **Interprétation des résultats**

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

La façon de la variation de la DF_R est différente d'un sol à un autre durant les trois essais : L'augmentation de la dimension fractale des échantillons N°01 et N°02 de Azazga et Tizirt (Figures : VI.1 ; VI.2 ; VI.4 ; VI.5 et Tableau : VI.1 ; VI.2 ; VI.4 ; VI.5) et des échantillons témoin (état naturel) (Figures ; VI.3 ; VI.6 ; VI.9 et Tableau : VI.3 ;

VI.6 ; VI.9) durant l'essai de Gel Dégel varient presque de la même façon, mais il y'a un vacillement des valeurs de DF_R parfois croissantes et parfois décroissantes calculées pour :

*la surface horizontale des échantillons N°01 et N°02 Compactés de Centre-Ville F.N ;

*La surface Verticale des échantillons N°01 et N°02 de (Centre-Ville, Freha), F.N, Tizirt N°01.





Durant l'essai de dégradabilité (les figures VI.16 ...VI.22 et les tableauxVI.16 ...VI.22), une variation numérique non linéaire a été observée pour tous les échantillons après les cycles de dégradabilité que ce soit pour les surfaces horizontales ou verticales.

Durant l'essai de Canicules les valeurs de DF_R ont marqué une augmentation rapide au début suivie par une diminution subite; Il a été remarqué aussi une diminution subite très remarquable pour la surface horizontale de l'échantillon de Azazga N°01 (Figure VI.23 et Tableau VI.23) et la surface verticale de l'échantillon Tizirt N°01 (Figure VI.25 et Tableau VI.25) et une augmentation rapide pour les échantillons de :

*Azazga N°2 (Figure VI.24 et Tableau VI.24) sur la surface verticale.

*Centre-ville compacté sur la surface horizontale (Figure VI.28 et Tableau VI.28).

Ces variations de DF_R durant les trois essais sont dues à ce qui suit :

-  La propagation de leurs fissures : à chaque fois que les fissures s'élargissent et se prolongent, le niveau de la couleur grise (la couleur noir est le niveau maximal de la couleur grise) dans l'image de l'échantillon augmente ainsi que la valeur de leur DF_R ; et vice versa quand les fissures se referment.
-  Le changement d'état de la texture : si on a une texture directe ; l'échantillon ne contient pas des dégradations sur ses cotés ou bien la fragmentation de la surface horizontale et verticale, DF_R augmente ; et vice versa.
-  L'augmentation de la rugosité des échantillons et le changement d'état de leur texture qui ont un rôle principal dans la variation de la DF_R calculer.
-  Sans oublier la présence des minéraux argileux sensible à l'eau et du potentiel de gonflement considérable, ce que nous avons mentionné plus tôt dans le chapitre précédent.

VI.3 Conclusion

La méthode de Differential **Box Counting** programmée avec le logiciel **MATLAB** est une bonne méthode de calcul de DF_R en (3D). Cette dimension est l'une des caractéristiques

principales de la géométrie fractale. L'étude du comportement des matériaux a permis d'évaluer le paramètre dimension fractale en fonction de plusieurs paramètres. L'ensemble des résultats obtenus se résume comme suit :

Les résultats du calcul de la dimension fractale obtenus avec cette méthode témoignent du degré des fissures marquées par le niveau de la couleur grise des différents échantillons étudiés et ceci prouve son efficacité. L'augmentation du nombre de cycles des essais influence sur la variation de la dimension fractale, et cela pour les cinq types des matériaux étudiés. En effet, l'augmentation du degré des fissures et de la couleur grise se traduit généralement par l'augmentation de la dimension fractale. 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. Les algorithmes donnent donc une estimation satisfaisante de la dimension fractale. Dans le chapitre suivant, on va comparer entre les résultats obtenus dans ce chapitre et le chapitre précédent par la réalisation des analyses statistiques à l'aide de logiciel R.



Chapitre VII

***Analyse
statistique des
données***

VII.1 Introduction

Les statistiques peuvent être vues en fonction de l'objectif fixé ; classiquement les méthodes statistiques sont employées soit pour explorer les données (nommée statistique exploratoire) soit pour prédire un comportement (nommée statistique prédictive ou décisionnelle ou encore inférentielle). La statistique exploratoire s'appuie sur des techniques descriptives et graphiques. Elle est généralement décrite par la statistique descriptive qui regroupe des méthodes exploratoires simples, uni-ou bidimensionnelle (moyenne, moments, quantiles, variance, corrélation...) et la statistique exploratoire multidimensionnelle. L'analyse de données s'inscrit dans ce cadre de la statistique exploratoire multidimensionnelle. Nous verrons que des méthodes issues de l'analyse de données peuvent également servir la statistique prédictive. L'analyse de données fait toujours l'objet de recherche pour s'adapter à tout type de données et faire face à des considérations de traitements en temps réel en dépit de la quantité de données toujours plus importante.

VII.2 Les méthodes d'analyse statistique

VII.2.1 Méthode de régression linéaire

VII.2.1.1 Notion de corrélation

On prévoit qu'il existe une liaison entre deux variables X et Y lorsqu'elles ont tendance à varier soit toujours dans le même sens (c'est-à-dire que lorsque X et Y augmentent), soit dans le sens inverse (c'est-à-dire que lorsque X augmente, Y a tendance à diminuer). Du point de vue statistique, cette liaison peut être quantifiable et si elle est significative, elle peut être utilisée pour des fins prédictives (Dominique, 2006; Rakotomalala, 2011; Velenik, 2012; Julien Jacques, 2014).

-Lorsque $\rho > 0$, cela signifie que si l'une des variables a tendance à augmenter, l'autre aussi.

-Lorsque $\rho < 0$, cela signifie que si l'une des variables a tendance à augmenter, l'autre a tendance à diminuer.

-Lorsque $\rho = 0$, cela signifie qu'il n'y a pas d'association linéaire entre X et Y donc elles ne sont pas corrélées.

-Sa variation est dans l'intervalle $+1$ ou -1 indique que l'une des variables est une fonction affine de l'autre, par exemple est une fonction affine de X, alors $Y = aX + b$ avec b du signe de ρ .

De même rest un nombre compris entre 1 et -1. Lorsque les points de coordonnées (X_i, Y_i) pour $i= 1, \dots, n$ sont parfaitement alignés, l'estimateur prend la valeur 1 ($r=1$) et si on obtient un nuage de points flou, rest proche de zéro ($r=0$). Alors, plus les points sont concentrés autour d'une droite, plus rest proche de 1. La concentration des points autour de la droite indique l'intensité de la liaison tandis que la pente de la droite indique le sens de la liaison.

VII.2.1.2 Régression linéaire simple

La régression linéaire consiste à chercher une relation linéaire entre X qui est la variable explicative (variable de régression) et Y qui est la variable à expliquer c'est-à-dire pour laquelle on cherche une réponse (Confais et Le Guen, 2006; Dominique, 2006; Rakotomalala, 2011; Julien Jacques, 2014). Ces hypothèses sont généralement appelées hypothèses faibles. Les hypothèses fortes supposent en plus la normalité des résidus (ce qui implique donc leur indépendance puis qu'ils sont non corrélés); ceci permettra d'effectuer des tests sur le modèle de régression linéaire (Julien Jacques, 2014).

VII.2.1.3 Droite de régression

La droite d'équation $Y= aX+b$ à ajuster sur les données au sens de minimisation de la somme des carrés des écarts entre observations et modèle (moindre carrés), ou sous l'hypothèse que les erreurs sont gaussiennes. Le simple nuage de points (X_i, Y_i) peut aider à identifier si la relation a une tendance linéaire ou non.

VII.2.1.4 Test sur le modèle de régression linéaire

Une fois le modèle linéaire est estimé, il convient de vérifier si les hypothèses faites lors de l'estimation par moindre carrés sont respectées (Rakotomalala, 2011; Julien Jacques, 2014), il faut donc vérifier:

- la normalité des variables ou des résidus
- la non corrélation des résidus
- l'homogénéité (homoscédasticité) des résidus

Ensuite il faut tester la validité et la qualité du modèle.

Chapitre VII: Analyse statistique des données

VII.2.1.5 Etude de la corrélation de la régression

R^2 exprime le rapport entre la variance expliquée par le modèle de régression et la variance totale. Il est un bon indicateur de la qualité de la régression, sa valeur est comprise entre 0 et 1, voir Tableau VII.1 :

Essai	ECHANTILLON		V12D	V23D	VM
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (d'Azazga1) SH	1	1.9562	1.9695	144.069
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (d'Azazga1) SV1	2	1.8956	1.9813	108.525
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (d'Azazga1) SV2	3	1.8909	1.9941	138.379
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (d'Azazga1) SH	4	1.8181	1.9967	144.069
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (d'Azazga1) SV1	5	1.8771	2.0072	108.525
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (d'Azazga1) SV2	6	1.8339	2.0149	138.379
Gel dégel	Après 48 de l'éch (d'Azazga1) SH	7	1.6023	2.0239	144.069
Gel dégel	Après 48 de l'éch (d'Azazga1) SV1	8	1.8007	2.0573	108.525
Gel dégel	Après 48 de l'éch (d'Azazga1) SV2	9	1.8037	2.0408	138.379
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (d'Azazga2) SH	10	1.9462	1.9675	143.67
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (d'Azazga2) SV1	11	1.8856	1.985	107.911
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (d'Azazga2) SV2	12	1.8423	1.9878	146.565
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (d'Azazga2) SH	13	1.8655	2.0134	143.67
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (d'Azazga2) SV1	14	1.8536	1.9848	107.911
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (d'Azazga2) SV2	15	1.8409	1.9819	146.565
Gel dégel	Après 48 de l'éch (d'Azazga2) SH	16	1.8321	2.0459	143.67
Gel dégel	Après 48 de l'éch (d'Azazga2) SV1	17	1.7368	2.0017	107.911
Gel dégel	Après 48 de l'éch (d'Azazga2) SV2	18	1.8378	2.0474	146.565
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (d'Azazga.N) SH	19	1.9452	1.9673	142.772
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (d'Azazga.N) SV1	20	1.8946	1.9891	106.242
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (d'Azazga.N) SV2	21	1.8809	1.9908	146.066
Gel dégel	Après 48 de l'éch (d'Azazga.N) SH	22	1.868	2.0402	142.772
Gel dégel	Après 48 de l'éch (d'Azazga.N) SV1	23	1.7932	2.0541	106.242
Gel dégel	Après 48 de l'éch (d'Azazga.N) SV2	24	1.8178	2.0447	146.066
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (Tigzirt1) SH	25	1.9337	1.9651	157.947
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (Tigzirt1) SV1	26	1.7994	1.9535	142.526
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (Tigzirt1) SV2	27	1.725	1.9445	169.229
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (Tigzirt1) SH	28	1.7425	1.9601	157.947
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (Tigzirt1) SV1	29	1.7358	2.0286	142.526
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (Tigzirt1) SV2	30	1.6034	2.0191	169.229
Gel dégel	Après 48 de l'éch (Tigzirt1) SH	31	1.7413	1.9871	157.947
Gel dégel	Après 48 de l'éch (Tigzirt1) SV1	32	1.6043	2.0263	142.526
Gel dégel	Après 48 de l'éch (Tigzirt1) SV2	33	1.5973	2.0171	169.229
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (Tigzirt2) SH	34	1.9337	1.9632	161.242
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (Tigzirt2) SV1	35	1.7984	1.942	146.052
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (Tigzirt2) SV2	36	1.7296	1.9529	157.049
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (Tigzirt2) SH	37	1.7424	2.0079	161.242

Chapitre VII: Analyse statistique des donnes

Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (Tigzirt2) SV1	38	1.7398	2.0157	146.052
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (Tigzirt2) SV2	39	1.7102	2.009	157.049
Gel dégel	Après 48 de l'éch (Tigzirt2) SH	40	1.7401	2.006	161.242
Gel dégel	Après 48 de l'éch (Tigzirt2) SV1	41	1.6152	2.0487	146.052
Gel dégel	Après 48 de l'éch (Tigzirt2) SV2	42	1.6023	2.0112	157.049
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (Tigzirt.N) SH	43	1.9337	1.9593	171.326
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (tigzirt.N) SV1	44	1.7425	1.9426	156.236
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (Tigzirt.N) SV2	45	1.7413	1.9501	170.527
Gel dégel	Après 48 de l'éch (Tigzirt.N) SH	46	1.7556	2.0082	171.326
Gel dégel	Après 48 de l'éch (Tigzirt.N) SV1	47	1.7368	2.0455	156.236
Gel dégel	Après 48 de l'éch (Tigzirt.N) SV2	48	1.735	2.0522	170.527
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (C.V1) SH	49	1.9152	1.9538	151.957
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (C.V1) SV1	50	1.8937	1.9678	124.526
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (C.V1) SV2	51	1.8336	1.9846	150.985
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (C.V1) SH	52	1.8523	1.9857	151.957
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (C.V1) SV1	53	1.8543	1.9694	124.526
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (C.V1) SV2	54	1.8273	1.9685	150.985
Gel dégel	Après 48 de l'éch (C.V1) SH	55	1.8069	1.9837	151.957
Gel dégel	Après 48 de l'éch (C.V1) SV1	56	1.7350	2.0245	124.526
Gel dégel	Après 48 de l'éch (C.V1) SV2	57	1.8050	2.0474	150.985
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (C.V2) SH	58	1.9151	1.9465	153.551
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (C.V2) SV1	59	1.826	1.979	126.586
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (C.V2) SV2	60	1.8048	1.9813	151.757
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (C.V2) SH	61	1.8891	1.9902	153.551
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (C.V2) SV1	62	1.8569	1.9451	126.586
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (C.V2) SV2	63	1.7776	1.9293	151.757
Gel dégel	Après 48 de l'éch (C.V2) SH	64	1.8336	2.086	153.551
Gel dégel	Après 48 de l'éch (C.V2) SV1	65	1.8241	2.0293	126.586
Gel dégel	Après 48 de l'éch (C.V2) SV2	66	1.7637	2.0596	151.757
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (C.V.N) SH	67	1.9152	1.9442	156.749
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (C.V.N) SV1	68	1.8937	1.9784	129.589
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (C.V.N) SV2	69	1.8336	1.9795	147.966
Gel dégel	Après 48 de l'éch (C.V.N) SH	70	1.7754	2.1032	156.749
Gel dégel	Après 48 de l'éch (C.V.N) SV1	71	1.7850	2.0678	129.589
Gel dégel	Après 48 de l'éch (C.V.N) SV2	72	1.7423	2.0647	147.966
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (Fréha1) SH	73	1.9854	1.9304	158.946
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (Fréha1) SV1	74	1.852	2.054	133.786
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (Fréha1) SV2	75	1.8026	1.9952	173.722
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (Fréha1) SH	76	1.9238	2.0035	158.946
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (Fréha1) SV1	77	1.8167	2.078	133.786
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (Fréha1) SV2	78	1.772	1.9939	173.722
Gel dégel	Après 48 de l'éch (Fréha1) SH	79	1.7549	2.0274	158.946

Chapitre VII: Analyse statistique des donnes

Gel dégel	Après 48 de l'éch (Fréha1) SV1	80	1.7384	1.9779	133.786
Gel dégel	Après 48 de l'éch (Fréha1) SV2	81	1.7012	1.9899	173.722
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (Fréha2) SH	82	1.9521	1.9291	163.339
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (Fréha2) SV1	83	1.897	2.0168	141.558
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (Fréha2) SV2	84	1.8333	2.0124	166.933
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (Fréha2) SH	85	1.908	1.9644	163.339
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (Fréha2) SV1	86	1.8516	1.9595	141.558
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (Fréha2) SV2	87	1.7958	1.9844	166.933
Gel dégel	Après 48 de l'éch (Fréha2) SH	88	1.7724	1.9808	163.339
Gel dégel	Après 48 de l'éch (Fréha2) SV1	89	1.7458	1.983	141.558
Gel dégel	Après 48 de l'éch (Fréha2) SV2	90	1.7214	1.9842	166.933
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (Fréha.N) SH	91	1.9321	1.9961	158.247
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (Fréha.N) SV1	92	1.8897	1.9494	165.136
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (Fréha.N) SV2	93	1.8548	1.9645	158.247
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (Fréha.N) SH	94	1.8939	1.8953	165.136
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (Fréha.N) SV1	95	1.8538	1.855	158.247
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (Fréha.N) SV2	96	1.8143	1.7637	165.136
Gel dégel	Après 48 de l'éch (Fréha.N) SH	97	1.7725	2.0412	158.247
Gel dégel	Après 48 de l'éch (Fréha.N) SV1	98	1.7369	2.0098	165.136
Gel dégel	Après 48 de l'éch (Fréha.N) SV2	99	1.7025	1.9882	158.247
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (C.V1) SH	100	1.9733	1.9415	161.841
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (C.V1) SV1	101	1.8855	1.9888	143.87
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (C.V1) SV2	102	1.8587	1.953	158.746
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (C.V1) SH	103	1.9482	1.9905	161.841
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (C.V1) SV1	104	1.8453	1.9836	143.87
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (C.V1) SV2	105	1.8035	1.9945	158.746
Gel dégel	Après 48 de l'éch (C.V1) SH	106	1.8232	2.0079	161.841
Gel dégel	Après 48 de l'éch (C.V1) SV1	107	1.7555	2.0264	143.87
Gel dégel	Après 48 de l'éch (C.V1) SV2	108	1.7244	2.0048	158.746
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (C.V2) SH	109	1.9587	1.9918	167.732
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (C.V2) SV1	110	1.8879	1.9916	150.26
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (C.V2) SV2	111	1.8453	1.9578	172.923
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (C.V2) SH	112	1.9034	1.9716	167.732
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (C.V2) SV1	113	1.8528	1.9514	150.26
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (C.V2) SV2	114	1.8054	2.001	172.923
Gel dégel	Après 48 de l'éch (C.V2) SH	115	1.8254	2.0039	167.732
Gel dégel	Après 48 de l'éch (C.V2) SV1	116	1.7561	2.0149	150.26
Gel dégel	Après 48 de l'éch (C.V2) SV2	117	1.7225	2.0175	172.923
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (C.V.N) SH	118	1.9799	1.9636	164.136
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (C.V.N) SV1	119	1.8931	2.0389	171.528
Gel dégel	Etat naturel de l'éch (C.V.N) SV2	120	1.8579	2.0302	164.136
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (C.V.N) SH	121	1.9487	1.9622	171.528

Chapitre VII: Analyse statistique des donnes

Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (C.V.N) SV1	122	1.8601	1.9595	164.136
Gel dégel	Après l'étuve de l'éch (C.V.N) SV2	123	1.8098	2.0198	171.528
Gel dégel	Après 48 de l'éch (C.V.N) SH	124	1.7793	1.9781	164.136
Gel dégel	Après 48 de l'éch (C.V.N) SV1	125	1.7649	2.0133	171.528
Gel dégel	Après 48 de l'éch (C.V.N) SV2	126	1.7137	2.0496	164.136
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (d'Azazga) SH	127	1.9433	1.9632	142.173
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (d'Azazga) SV1	128	1.9084	2.0108	142.173
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (d'Azazga) SV2	129	1.8873	1.9975	142.173
dégradabilité	1er cycle de l'éch (d'Azazga) SH	130	1.9246	1.9854	106.929
dégradabilité	1er cycle de l'éch (d'Azazga) SV1	131	1.8921	1.9378	106.929
dégradabilité	1er cycle de l'éch (d'Azazga) SV2	132	1.8851	1.9936	106.929
dégradabilité	2eme cycle de l'éch (d'Azazga) SH	133	1.9105	2.0256	105.931
dégradabilité	2emecycle de l'éch (d'Azazga) SV1	134	1.8261	2.0387	105.931
dégradabilité	2eme cycle de l'éch (d'Azazga) SV2	135	1.7888	2.0351	105.931
dégradabilité	3eme cycle de l'éch (d'Azazga) SH	136	1.8834	2.0555	105.332
dégradabilité	3emecycle de l'éch (d'Azazga) SV1	137	1.684	1.9923	105.332
dégradabilité	3eme cycle de l'éch (d'Azazga) SV2	138	1.7565	2.0049	105.332
dégradabilité	4eme cycle de l'éch (d'Azazga) SH	139	1.7557	2.0134	104.732
dégradabilité	4emecycle de l'éch (d'Azazga) SV1	140	1.5927	1.9875	104.732
dégradabilité	4eme cycle de l'éch (d'Azazga) SV2	141	1.7423	2.0129	104.732
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (Tigzirt) SH	142	1.9219	1.9586	172.324
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (Tigzirt) SV1	143	1.8407	1.9495	172.324
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (Tigzirt) SV2	144	1.8609	1.9573	172.324
dégradabilité	1er cycle de l'éch (Tigzirt) SH	145	1.8736	1.9838	156.749
dégradabilité	1er cycle de l'éch (Tigzirt) SV1	146	1.7578	2.0156	156.749
dégradabilité	1er cycle de l'éch (Tigzirt) SV2	147	1.8269	2.0221	156.749
dégradabilité	2eme cycle de l'éch (Tigzirt) SH	148	1.8426	2.0276	156.748
dégradabilité	2emecycle de l'éch (Tigzirt) SV1	149	1.722	2.0109	156.748
dégradabilité	2eme cycle de l'éch (Tigzirt) SV2	150	1.7953	2.0215	156.748
dégradabilité	3eme cycle de l'éch (Tigzirt) SH	151	1.8232	2.0378	156.35
dégradabilité	3emecycle de l'éch (Tigzirt) SV1	152	1.7078	1.9977	156.35
dégradabilité	3eme cycle de l'éch (Tigzirt) SV2	153	1.719	2.0204	156.35
dégradabilité	4eme cycle de l'éch (Tigzirt) SH	154	1.7529	2.0417	155.751
dégradabilité	4emecycle de l'éch (Tigzirt) SV1	155	1.6908	2.0271	155.751
dégradabilité	4eme cycle de l'éch (Tigzirt) SV2	156	1.6985	2.0168	155.751
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (C.V) SH	157	1.9797	1.9481	148.462
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (C.V) SV1	158	1.8615	1.9712	148.462
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (C.V) SV2	159	1.8753	1.9746	148.462
dégradabilité	1er cycle de l'éch (C.V) SH	160	1.954	2.1149	121.406
dégradabilité	1er cycle de l'éch (C.V) SV1	161	1.8394	2.0513	121.406
dégradabilité	1er cycle de l'éch (C.V) SV2	162	1.846	2.0765	121.406
dégradabilité	2eme cycle de l'éch (C.V) SH	163	1.9358	2.0953	121.306

Chapitre VII: Analyse statistique des donnes

dégradabilité	2emecycle de l'éch (C.V) SV1	164	1.8214	2.0609	121.306
dégradabilité	2eme cycle de l'éch (C.V) SV2	165	1.8336	2.0585	121.306
dégradabilité	3eme cycle de l'éch (C.V) SH	166	1.9223	2.0105	121.106
dégradabilité	3emecycle de l'éch (C.V) SV1	167	1.7929	2.0104	121.106
dégradabilité	3eme cycle de l'éch (C.V) SV2	168	1.8334	2.0181	121.106
dégradabilité	4eme cycle de l'éch (C.V) SH	169	1.8287	1.9862	120.507
dégradabilité	4emecycle de l'éch (C.V) SV1	170	1.651	2.0171	120.507
dégradabilité	4eme cycle de l'éch (C.V) SV2	171	1.8114	2.0114	120.507
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (C.V.1) SH	172	1.8686	1.9965	181.51
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (C.V.1) SV1	173	1.9707	1.996	181.51
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (C.V.1) SV2	174	1.9537	2.0022	181.51
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (C.V.1) SV3	175	1.9659	1.9964	181.51
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (C.V.1) SV4	176	1.9757	1.9919	181.51
dégradabilité	1er cycle de l'éch (C.V.1) SH	177	1.6941	2.0014	147.664
dégradabilité	1er cycle de l'éch (C.V.1) SV1	178	1.8583	2.0155	147.664
dégradabilité	1er cycle de l'éch (C.V.1) SV2	179	1.932	2.0098	147.664
dégradabilité	1er cycle de l'éch (C.V.1) SV3	180	1.9404	2.0158	147.664
dégradabilité	1er cycle de l'éch (C.V.1) SV4	181	1.925	2.0142	147.664
dégradabilité	2eme cycle de l'éch (C.V.1) SH	182	1.6443	2.0267	147.163
dégradabilité	2eme cycle de l'éch (C.V.1) SV1	183	1.8273	2.0057	147.163
dégradabilité	2eme cycle de l'éch (C.V.1) SV2	184	1.9133	2.0103	147.163
dégradabilité	2eme cycle de l'éch (C.V.1) SV3	185	1.8701	2.015	147.163
dégradabilité	2eme cycle de l'éch (C.V.1) SV4	186	1.9168	2.0027	147.163
dégradabilité	3eme cycle de l'éch (C.V.1) SH	187	1.631	2.0114	146.562
dégradabilité	3eme cycle de l'éch (C.V.1) SV1	188	1.8212	2.0106	146.562
dégradabilité	3eme cycle de l'éch (C.V.1) SV2	189	1.828	2.0199	146.562
dégradabilité	3eme cycle de l'éch (C.V.1) SV3	190	1.8617	2.0167	146.562
dégradabilité	3eme cycle de l'éch (C.V.1) SV4	191	1.8947	2.0065	146.562
dégradabilité	4eme cycle de l'éch (C.V.1) SH	192	1.6281	2.0399	145.764
dégradabilité	4eme cycle de l'éch (C.V.1) SV1	193	1.7907	2.0068	145.764
dégradabilité	4eme cycle de l'éch (C.V.1) SV2	194	1.8208	2.0031	145.764
dégradabilité	4eme cycle de l'éch (C.V.1) SV3	195	1.8151	2.013	145.764
dégradabilité	4eme cycle de l'éch (C.V.1) SV4	196	1.8437	2.003	145.764
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (C.V.2) SH	197	1.8529	2.0257	171.825
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (C.V.2) SV1	198	1.9315	2.0107	171.825
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (C.V.2) SV2	199	1.911	2.0109	171.825
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (C.V.2) SV3	200	1.9067	2.0044	171.825
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (C.V.2) SV4	201	1.9521	2.0224	171.825
dégradabilité	1er cycle de l'éch (C.V.2) SH	202	1.8131	2.0269	145.268
dégradabilité	1er cycle de l'éch (C.V.2) SV1	203	1.9216	2.0227	145.268
dégradabilité	1er cycle de l'éch (C.V.2) SV2	204	1.8936	2.026	145.268
dégradabilité	1er cycle de l'éch (C.V.2) SV3	205	1.8858	2.0059	145.268
dégradabilité	1er cycle de l'éch (C.V.2) SV4	206	1.9171	2.0275	145.268

Chapitre VII: Analyse statistique des donnes

dégradabilité	2eme cycle de l'éch (C.V.2) SH	207	1.7955	2.0308	145.367
dégradabilité	2eme cycle de l'éch (C.V.2) SV1	208	1.8891	2.0121	145.367
dégradabilité	2eme cycle de l'éch (C.V.2) SV2	209	1.8664	2.0282	145.367
dégradabilité	2eme cycle de l'éch (C.V.2) SV3	210	1.8624	2.0095	145.367
dégradabilité	2eme cycle de l'éch (C.V.2) SV4	211	1.8585	2.0189	145.367
dégradabilité	3eme cycle de l'éch (C.V.2) SH	212	1.7309	2.0343	144.867
dégradabilité	3eme cycle de l'éch (C.V.2) SV1	213	1.7636	2.0079	144.867
dégradabilité	3eme cycle de l'éch (C.V.2) SV2	214	1.807	2.0245	144.867
dégradabilité	3eme cycle de l'éch (C.V.2) SV3	215	1.842	2.0166	144.867
dégradabilité	3eme cycle de l'éch (C.V.2) SV4	216	1.8272	2.013	144.867
dégradabilité	4eme cycle de l'éch (C.V.2) SH	217	1.6942	2.031	144.268
dégradabilité	4eme cycle de l'éch (C.V.2) SV1	218	1.7505	2.003	144.268
dégradabilité	4eme cycle de l'éch (C.V.2) SV2	219	1.7442	2.0138	144.268
dégradabilité	4eme cycle de l'éch (C.V.2) SV3	220	1.8109	2.0028	144.268
dégradabilité	4eme cycle de l'éch (C.V.2) SV4	221	1.7989	2.02	144.268
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (Fréha1) SH	222	1.9415	1.9977	169.529
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (Fréha1) SV1	223	1.9259	1.9972	169.529
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (Fréha1) SV2	224	1.919	1.9977	169.529
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (Fréha1) SV3	225	1.9261	1.9946	169.529
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (Fréha1) SV4	226	1.9169	1.9908	169.529
dégradabilité	1er cycle de l'éch (Fréha1) SH	227	1.8077	2.0187	138.179
dégradabilité	1er cycle de l'éch (Fréha1) SV1	228	1.8968	2.008	138.179
dégradabilité	1er cycle de l'éch (Fréha1) SV2	229	1.9056	2.0071	138.179
dégradabilité	1er cycle de l'éch (Fréha1) SV3	230	1.8873	1.9983	138.179
dégradabilité	1er cycle de l'éch (Fréha1) SV4	231	1.8908	2.0015	138.179
dégradabilité	2eme cycle de l'éch (Fréha1) SH	232	1.7524	2.0215	137.58
dégradabilité	2eme cycle de l'éch (Fréha1) SV1	233	1.8808	2.006	137.58
dégradabilité	2eme cycle de l'éch (Fréha1) SV2	234	1.8878	2.0152	137.58
dégradabilité	2eme cycle de l'éch (Fréha1) SV3	235	1.8698	1.9981	137.58
dégradabilité	2eme cycle de l'éch (Fréha1) SV4	236	1.8587	2.0158	137.58
dégradabilité	3eme cycle de l'éch (Fréha1) SH	237	1.7049	2.025	137.377
dégradabilité	3eme cycle de l'éch (Fréha1) SV1	238	1.8174	2.0058	137.377
dégradabilité	3eme cycle de l'éch (Fréha1) SV2	239	1.8491	2.0206	137.377
dégradabilité	3eme cycle de l'éch (Fréha1) SV3	240	1.8471	2.0051	137.377
dégradabilité	3eme cycle de l'éch (Fréha1) SV4	241	1.8392	2.0258	137.377
dégradabilité	4eme cycle de l'éch (Fréha1) SH	242	1.5943	2.0342	136.28
dégradabilité	4eme cycle de l'éch (Fréha1) SV1	243	1.7796	2.005	136.28
dégradabilité	4eme cycle de l'éch (Fréha1) SV2	244	1.7935	2.0106	136.28
dégradabilité	4eme cycle de l'éch (Fréha1) SV3	245	1.8117	2.0017	136.28
dégradabilité	4eme cycle de l'éch (Fréha1) SV4	246	1.8139	2.0174	136.28
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (Fréha1) SH	247	1.9739	1.9941	166.933
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (Fréha1) SV1	248	1.8236	2.0044	166.933
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (Fréha1) SV2	249	1.8549	1.9953	166.933
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (Fréha1) SV3	250	1.8408	2.0051	166.933
dégradabilité	Etat naturel de l'éch (Fréha1) SV4	251	1.9045	1.99	166.933

Chapitre VII: Analyse statistique des donnes

dégradabilité	1er cycle de l'éch (Fréha1) SH	252	1.923	2.0028	132.588
dégradabilité	1er cycle de l'éch (Fréha1) SV1	253	1.7691	2.0068	132.588
dégradabilité	1er cycle de l'éch (Fréha1) SV2	254	1.7973	2.0124	132.588
dégradabilité	1er cycle de l'éch (Fréha1) SV3	255	1.8361	2.0011	132.588
dégradabilité	1er cycle de l'éch (Fréha1) SV4	256	1.8797	2.0131	132.588
dégradabilité	2eme cycle de l'éch (Fréha1) SH	257	1.8474	2.0104	131.789
dégradabilité	2eme cycle de l'éch (Fréha1) SV1	258	1.7131	1.997	131.789
dégradabilité	2eme cycle de l'éch (Fréha1) SV2	259	1.7436	2.0351	131.789
dégradabilité	2eme cycle de l'éch (Fréha1) SV3	260	1.8261	2.0031	131.789
dégradabilité	2eme cycle de l'éch (Fréha1) SV4	261	1.8201	2.0204	131.789
dégradabilité	3eme cycle de l'éch (Fréha1) SH	262	1.6466	2.0296	131.387
dégradabilité	3eme cycle de l'éch (Fréha1) SV1	263	1.6821	2.0106	131.387
dégradabilité	3eme cycle de l'éch (Fréha1) SV2	264	1.7162	2.0659	131.387
dégradabilité	3eme cycle de l'éch (Fréha1) SV3	265	1.8016	2.036	131.387
dégradabilité	3eme cycle de l'éch (Fréha1) SV4	266	1.7293	2.0228	131.387
CANICULES	Etat naturel de l'éch (d'Azazga1) SH	267	1.9639	1.9677	141.673
CANICULES	Etat naturel de l'éch (d'Azazga1) SV1	268	1.8966	1.994	141.673
CANICULES	Etat naturel de l'éch (d'Azazga1) SV2	269	1.8969	2.0037	141.673
CANICULES	Après l'étuve de l'éch (d'Azazga1) SH	270	1.9562	2.0289	110.623
CANICULES	Après l'étuve de l'éch (d'Azazga1) SV1	271	1.8628	2.0088	110.623
CANICULES	Après l'étuve de l'éch (d'Azazga1) SV2	272	1.8649	2.0074	110.623
CANICULES	Après 48 de l'éch (d'Azazga1) SH	273	1.8725	1.9931	112.52
CANICULES	Après 48 de l'éch (d'Azazga1) SV1	274	1.8541	2.0046	112.52
CANICULES	Après 48 de l'éch (d'Azazga1) SV2	275	1.7855	2.0089	112.52
CANICULES	Etat naturel de l'éch (d'Azazga2) SH	276	1.9565	1.9519	143.071
CANICULES	Etat naturel de l'éch (d'Azazga2) SV1	277	1.9331	1.9953	143.071
CANICULES	Etat naturel de l'éch (d'Azazga2) SV2	278	1.8502	1.9819	143.071
CANICULES	Après l'étuve de l'éch (d'Azazga2) SH	279	1.8936	2.0734	111.522
CANICULES	Après l'étuve de l'éch (d'Azazga2) SV1	280	1.8896	2.0018	111.522
CANICULES	Après l'étuve de l'éch (d'Azazga2) SV2	281	1.8471	2.0561	111.522
CANICULES	Après 48 de l'éch (d'Azazga2) SH	282	1.8920	2.0996	113.818
CANICULES	Après 48 de l'éch (d'Azazga2) SV1	283	1.8779	2.011	113.818
CANICULES	Après 48 de l'éch (d'Azazga2) SV2	284	1.8200	2.1112	113.818
CANICULES	Etat naturel de l'éch (Tigzirt1) SH	285	1.9219	1.9596	160.543
CANICULES	Etat naturel de l'éch (Tigzirt1) SV1	286	1.8407	1.9572	160.543
CANICULES	Etat naturel de l'éch (Tigzirt1) SV2	287	1.8609	1.992	160.543
CANICULES	Après l'étuve de l'éch (Tigzirt1) SH	288	1.8825	2.002	145.367
CANICULES	Après l'étuve de l'éch (Tigzirt1) SV1	289	1.8298	2.0598	145.367
CANICULES	Après l'étuve de l'éch (Tigzirt1) SV2	290	1.8128	2.0547	145.367
CANICULES	Après 48 de l'éch (Tigzirt1) SH	291	1.6808	2.0087	147.065
CANICULES	Après 48 de l'éch (Tigzirt1) SV1	292	1.7064	2.0153	147.065
CANICULES	Après 48 de l'éch (Tigzirt1) SV2	293	1.6908	1.948	147.065
CANICULES	Etat naturel de l'éch (Tigzirt2) SH	294	1.9223	1.9686	172.524

Chapitre VII: Analyse statistique des donnes

CANICULES	Etat naturel de l'éch (Tigzirt2) SV1	295	1.8457	1.9524	172.524
CANICULES	Etat naturel de l'éch (Tigzirt2) SV2	296	1.8656	1.9441	172.524
CANICULES	Après l'étuve de l'éch (Tigzirt2) SH	297	1.8639	2.038	157.847
CANICULES	Après l'étuve de l'éch (Tigzirt2) SV1	298	1.7512	2.0415	157.847
CANICULES	Après l'étuve de l'éch (Tigzirt2) SV2	299	1.7710	2.0444	157.847
CANICULES	Après 48 de l'éch (Tigzirt2) SH	300	1.6575	2.0185	158.145
CANICULES	Après 48 de l'éch (Tigzirt2) SV1	301	1.7483	2.0266	158.145
CANICULES	Après 48 de l'éch (Tigzirt2) SV2	302	1.6589	2.0312	158.145
CANICULES	Etat naturel de l'éch (C.V1) SH	303	1.978	1.9555	147.543
CANICULES	Etat naturel de l'éch (C.V1) SV1	304	1.8773	1.985	147.543
CANICULES	Etat naturel de l'éch (C.V1) SV2	305	1.8763	1.975	147.543
CANICULES	Après l'étuve de l'éch (C.V1) SH	306	1.921	2.0055	128.395
CANICULES	Après l'étuve de l'éch (C.V1) SV1	307	1.8615	2.0389	128.395
CANICULES	Après l'étuve de l'éch (C.V1) SV2	308	1.8511	2.0602	128.395
CANICULES	Après 48 de l'éch (C.V1) SH	309	1.6965	2.009	130.092
CANICULES	Après 48 de l'éch (C.V1) SV1	310	1.8489	2.0426	130.092
CANICULES	Après 48 de l'éch (C.V1) SV2	311	1.7886	2.0467	130.092
CANICULES	Etat naturel de l'éch (C.V2) SH	312	1.9687	1.9443	145.667
CANICULES	Etat naturel de l'éch (C.V2) SV1	313	1.8915	1.9741	145.667
CANICULES	Etat naturel de l'éch (C.V2) SV2	314	1.8763	1.9759	145.667
CANICULES	Après l'étuve de l'éch (C.V2) SH	315	1.8943	1.957	116.014
CANICULES	Après l'étuve de l'éch (C.V2) SV1	316	1.8773	2.0327	116.014
CANICULES	Après l'étuve de l'éch (C.V2) SV2	317	1.854	2.0525	116.014
CANICULES	Après 48 de l'éch (C.V2) SH	318	1.6792	1.9683	117.612
CANICULES	Après 48 de l'éch (C.V2) SV1	319	1.8171	2.0365	117.612
CANICULES	Après 48 de l'éch (C.V2) SV2	320	1.7957	2.0363	117.612

VII.2.1.6 Résultats de la régression linéaire entre 2D et 3D et lamasse

Les résultats des différents essais réalisés aux laboratoires sont résumés sous forme de statistiques élémentaires qui donnent les valeurs extrêmes (Tableau VII.1). Pour analyser simultanément les valeurs de plusieurs propriétés des échantillons, on fait en général l'hypothèse que les relations cherchées sont linéaires. D'après les résultats finals obtenus de cette analyse :

- L'équation de la droite de régression est $Y = aX + b$ dans ce cas $a = - 0.5509$ et $b = 2.9324$.
- La p-value = 1.671×10^{-5} est inférieure à 0.05 ; l'hypothèse nul h_0 est rejeté, pas de relation entre les deux variables 2D et 3D.

- $R^2 = 0.05373$ est très loin de 1 ; il confirme les résultats de la $p\text{-value} = 1.671 \times 10^{-5}$, la relation entre les deux variables est très très faible plutôt négligeable ; comme indiqué sur la figure VII.1.

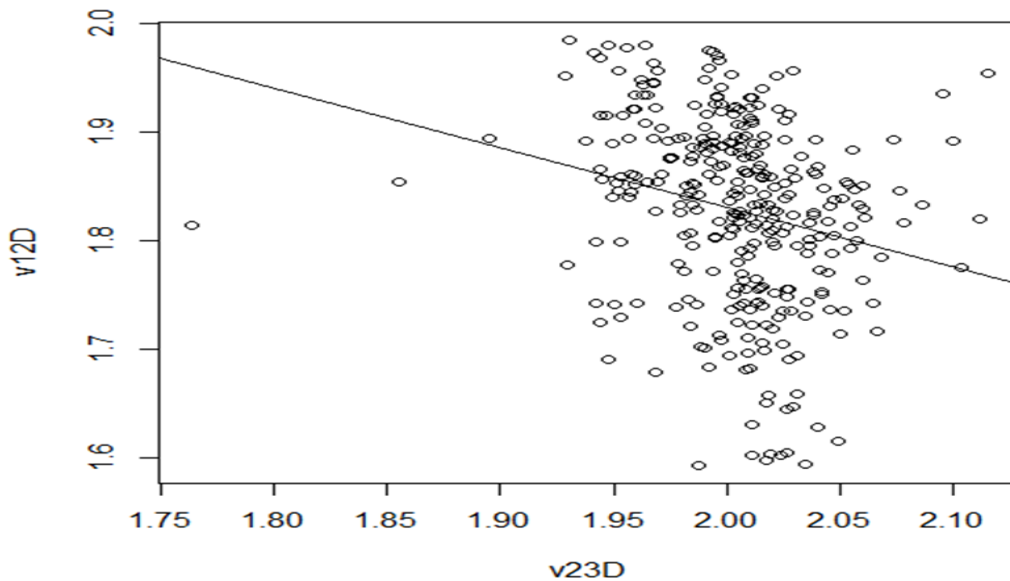


Figure VII.1 : La droite de la régression linéaire.

Talque

V12D Représente la variation de la dimension fractale en 2D

V23D Représente la variation de la dimension fractale en 3D

VM Représente les valeurs de la masse des échantillons durant les essais.

VII.2.2 Analyse en Composantes Principales

L'analyse en composantes principales (L'ACP) permet de représenter dans un espace de dimension réduite les individus d'une population ou d'un échantillon, de détecter les liaisons entre les variables ainsi que les variables séparant le mieux les individus. Elle permet souvent la localisation des grandes masses d'individus, détecte les individus atypiques et repère même d'éventuels groupes isolés. La définition de l'ACP telle que donnée par Vogt (1993), est un ensemble de méthodes permettant de procéder à des transformations linéaires d'un grand nombre de variables inter-corrélées de manière à obtenir un nombre relativement limité de composantes non corrélées. Cette approche facilite l'analyse en regroupant les données à des ensembles plus petits et en permettant d'éliminer les problèmes de multi colinéarité entre les variables.

VII.2.2.1 Principe de L'ACP

L'ACP consiste à remplacer une famille de variables par de nouvelles variables de variance maximale, non corrélées deux à deux et qui sont des combinaisons linéaires des variables d'origine. Ces nouvelles variables, appelées composantes principales, définissent des plans factoriels qui servent de base à une représentation graphique plane des variables initiales. L'ACP peut être considéré de ce fait, comme une technique de minimisation de l'erreur quadratique d'estimation ou une technique de maximisation de la variance des projections. Ainsi, les anciens axes sont remplacés par de nouveaux axes appelés axes factoriels qui forment à leur tour des plans factoriels servant de base à une représentation graphique plane des variables initiales ainsi que des individus. L'interprétation de ces graphiques permet de mettre en évidence les liaisons inter-variables et les similitudes entre individus, et de désigner ceux qui présentent des valeurs particulières des différentes variables.

VII.2.2.2 Résultats de l'ACP

L'ACP conduite à partir d'un espace à 3 dimensions, s'est ramenée à un nouvel espace à deux dimensions. Les résultats de cette ACP sont donnés sous forme de graphiques en dimension 2, résumant pertinemment la configuration réelle des données qui se trouvent en dimension 3. Les variables projetées sur chaque plan factoriel se trouvent à l'intérieur d'un cercle de rayon unité appelé cercle des corrélations. On peut ainsi interpréter les positions des anciennes variables les unes par rapport aux autres en termes de corrélations. On interprète alors les variables qui sont bien représentées c'est à dire celles qui sont proches du cercle de corrélation. Les variables projetées vers le bord du cercle, sont les mieux représentées.

- **Interprétation**

Chapitre VII: Analyse statistique des données

À partir des relations données précédemment, nous pouvons définir quelques règles pour l'interprétation:

- Un individu se situe du côté des variables pour lesquelles il a de fortes valeurs, inversement il se situe du côté opposé des variables pour lesquelles il a de faibles valeurs.
- Plus les valeurs d'un individu sont fortes pour une variable plus il sera éloigné de l'origine suivant l'axe factoriel décrivant le mieux cette variable.
- Deux individus à une même extrémité d'un axe (éloigné de l'origine) sont proches (se ressemblent).
- Deux variables très corrélées positivement sont du même côté sur un axe.
- Il n'est pas possible d'interpréter la position d'un individu par rapport à une seule variable, et réciproquement, il n'est pas possible d'interpréter la position d'une variable par rapport à un seul individu. Les interprétations doivent se faire de manière globale. En effet, deux points (individus ou variables) peuvent se trouver très proches dans un plan de projection, alors qu'en réalité ils sont éloignés.

On interprète les positions des variables par rapport aux axes afin de déterminer quelles sont les variables qui sont expliquées par ces axes et les positions des variables les unes par rapport aux autres. La masse des échantillons (v_M) elle est corrélée positivement avec la variable de la dimension fractale 2D (v_{12D}) Par ailleurs, elle est corrélée négativement avec celle de 3D (v_{23D}).

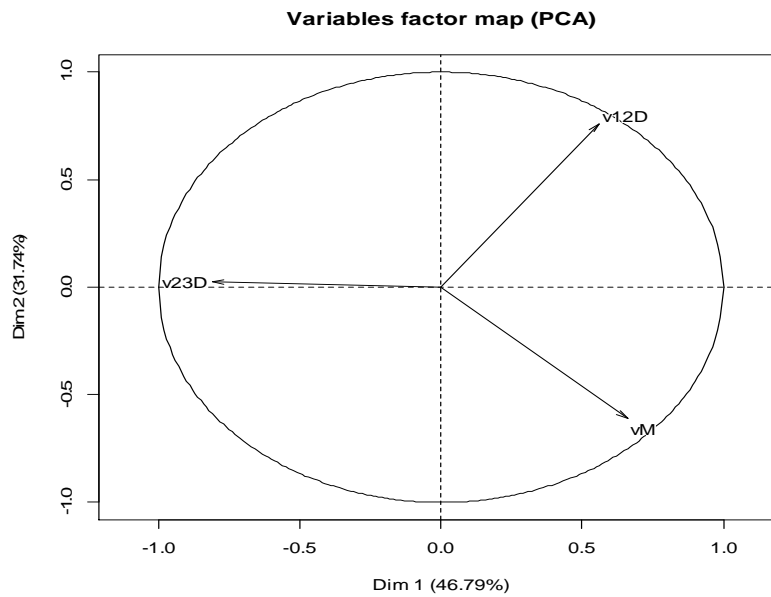


Figure VII.2 : Graphe des variables donné par l'ACP.

Le second graphe donné par cette analyse est celui des individus. Il est lu simultanément avec celui des variables, et permet de déduire l'individu qui donne la meilleure (ou la plus faible) valeur de la variable considérée dans la lecture.

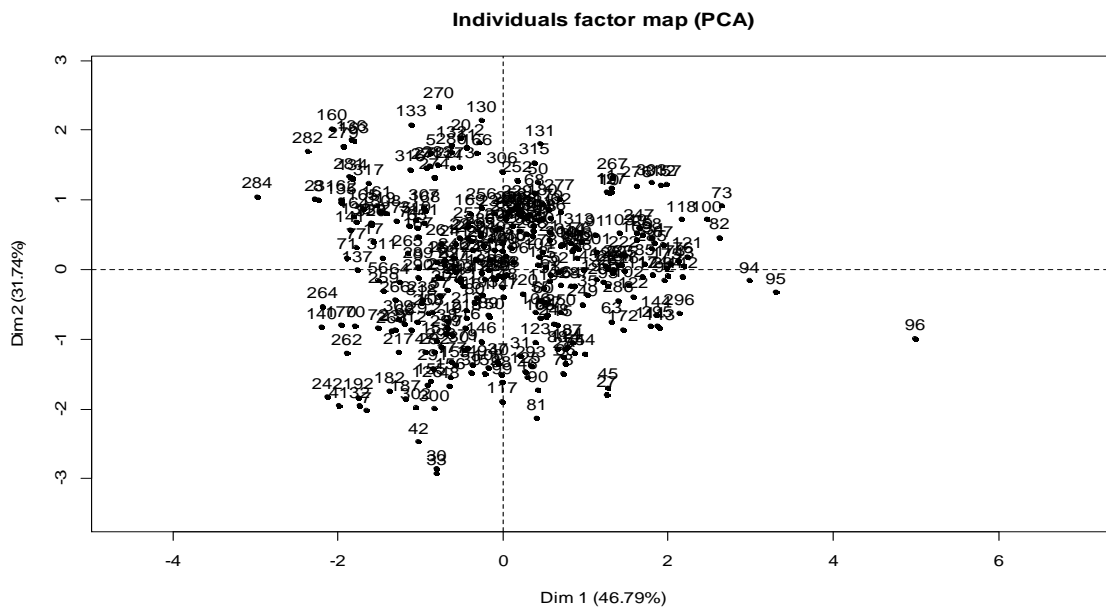


Figure VII.3 : Graphe des individus donné par l'ACP.

Par ailleurs, une classification hiérarchique ascendante semble bien indiquée afin de faire une bonne lecture des résultats de l'ACP, en effectuant à la fois des groupements en classes des individus solutions de l'optimisation qui présentent des similitudes. Les résultats de l'ACP seront classés sous forme de groupes présentant des similarités entre les individus

Chapitre VII: Analyse statistique des données

qui les forment. Cette démarche vise à classer les différentes solutions de l'optimisation selon leurs similitudes.

L'ACP est une méthode puissante pour synthétiser et résumer de vastes populations décrites par plusieurs variables quantitatives. Elle permet entre autre de dégager de grandes catégories d'individus et de réaliser un bilan des liaisons entre les variables. Par cette analyse nous pouvons mettre en évidence de grandes tendances dans les données telles que des regroupements d'individus ou des oppositions entre individus (ce qui traduit un comportement radicalement différent de ces individus) ou entre variables (ce qui traduit le fait que les variables sont inversement corrélées). Les représentations graphiques fournies par l'ACP sont simples et riches d'informations.

VII.3 Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre est bien de chercher une relation linéaire entre les paramètres géotechniques des sols étudiés, en premier une description statistique constitue une étape préalable indispensable avec le logiciel **R**. La régression linéaire simple est une méthode usuelle pour établir un modèle linéaire entre une variable réponse quantitative et une ou plusieurs variables explicatives. L'ACP peut être une première analyse pour l'étude d'une population dont les résultats seront enrichis par une autre analyse factorielle ou encore une classification automatique des données.

La méthode statistique donne toujours l'outil indispensable pour prévoir les relations existant entre les paramètres physiques des sols.

CONCLUSION GENERAL

Dans ce travail on s'est intéressé par le phénomène de retrait-gonflement, qui désigne une variation statistiquement significative de l'état moyen du climat, et qui peut être dus à des processus internes naturels ou à des forçages externes, et par la suite on passe à décrire et caractériser la sécheresse.

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

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 MATLAB et leur analyse statistique par le logiciel R.

Les essais ont été réalisés sur des échantillons intacts et remaniés (compactés) de nature argileuse, prélevés de 5 sites situés à la wilaya de Tizi-Ouzou ; Azazaga ; Centreville ; Tigzirt ; Freha ; (C.V) de Tizi-Ouzou.

De cette étude on peut constater que :

- Le climat a un rôle important sur le changement de la texture, du volume et même des paramètres physiques des sols, les argiles sont classées parmi les sols les plus influencés par les changements climatiques.
- Le comportement des sols argileux sous l'effet des cycles climatiques avec toutes leurs caractéristiques provoque plusieurs influences sur les sols argileux parmi ses influences le phénomène de retrait-gonflement et les fissurations.
- La présence des minéraux sensibles à l'eau a une influence sur le changement du sol (gonflement-retrait).
- Le cycle émersion-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 des sols.
- Les méthodes statistiques (L'ACP et la régression) donnent toujours l'outil indispensable pour prévoir les relations existant entre les paramètres physiques des sols et en tirer par la suite des formules pouvant être généralisées sur des sols qui se ressemblent lithologiquement et géotechniquement.

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

Référence Bibliographie

- **Ait amrane, T**(2018). Caractérisation de la stabilisation par des plastiques recyclés des sols argileux eaux essais de cisaillement. (114 pages). (L.G.E.A) l'Ummto. Memoire de master academique.
- **Al-mukhtar, M., Belanteur, N., Tessier, D. & Vanapalli, S.K.**,(1996). The fabric of clay soil under controlled mechanical and hydraulic stresses. Applied Clay Science, 11:185–197.
- **Alonso, E.E., Gens, A. & Hight, D.W.**, (1987). General report. Special problem soils. Proceedings of the 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin, vol. 3, pp. 1087-1146.
- **Amoukranet.**(2015) Amélioration des propriétés physiques et mécaniques des sols par incorporation des stabilisants: Université Mouloud Mamerie de Tizi-Ouzou, 153p.
- **Anonyme**, Changement climatique http://fr.wikipedia.org/wiki/Changement_climatique le 25/04/2014.
- **Anonyme**, El Niño ou La Niña, la N.A.O, Une vidéo résumant les facteurs du climat et voir d'autres informations Voir ici une autre vidéo du CNES longue et intéressante.
- **Anonyme**, L'eau et le changement climatique, Baghdadli. I, 2014, Mémoire de master ; L'influence du changement climatique sur les ressources en eaux du Meffrouch, 22/06/2014 ; universite aboubekr belkaid – tlemcen.
- **Anonyme**, Notre planète .info http://www.notreplanete.info/actualites/actu_2569_academie_sciences_rechauffement_climatique. phle 21/04/2014.
- **Anonyme**, Rapport, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Le Changement climatique et l'eau), climate-change-water-fr.pdf, consulté le 14/05/2014.
- **Anonyme**, République Algérienne démocratique et populaire, climat http://www.khaoula.com/algerie_climat.htm le 14/05/2014 à 11h50.
- **Aubouin J., Brousse R, Lehman J.P.** (1968). Précis De Géologie. 1er Cycle Et Licence. Tome I : Pétrologie. Dunod.
- **Audiguiet-Marcel M.** (1979). Contribution à l'étude du comportement de l'eau dans les sols en fonction de leur texture. Mémoire de DEA, Centre de Géologie d'ingénieur, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 148 p.

- **Aung, K.K., Raharjo, H., Leong, E. C. & TOLL, D. G.**, (2001). Relationship between porosimetry measurement and soil–water characteristic curve for an unsaturated residual soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 19: 401-416.
- **Bakir N**(2006), Caractérisation du fluage des sols fins et de leurs interactions avec les ouvrages (application au dimensionnement des remblais sur sols compressibles), Mémoire de magister, université Mohamed Boudiaf de Msila.
- **Barden, L. & Sides, G.R.**, (1970). Engineering behavior and structure of compacted clays. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Analysis*; 96:1171–1200.
- **Benaissa A et Belouar A.**, (2008). L'analyse inverse pour la détermination des caractéristiques géomecaniques et son application dans les études des glissements de terrain des argiles du "bassin de Mila". *International Conference on Numerical Computation in Geotechnical Engineering NUCGE'08*. pp35-37. Skikda, Algérie.
- **Benaissa A et Bellouche M.A.**, (1990). Propriétés géotechniques de quelques formations géologiques propices aux glissements de terrains dans l'agglomération de Constantine (Algérie). *Bull. Eng. Env.* 57, pp 301-310.
- **Bjerrum L.** (1967). Engineering geology of norwegian normally consolidated marine clays as related to settlements of buildings. *Géotechnique*, vol. 17(2), pp. 83-118.
- **Boudlal O.** (2013) Étude expérimentale du comportement mécanique des fines dans la stabilité des talus et des fondations. (222 pages). (L.G.E.A) l'ummto. Thèse de doctorat. pp (10,13,15,17,59,65,74).
- **Bouzeboudja. A.** (2016) L'influence de la dimension fractale en 3D sur les caractéristiques mécaniques des matériaux granulaires. (186 pages). (L.G.E.A) l'ummto. thèse de doctorat. Option : Géotechnique. pp(15,43,45).
- **Bultel F.** (2001). Prise en compte de gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels. Thèse de doctorat. École nationale des ponts et chaussées, France. 290 p.
- **Cases, J.M., Berend, I., Delon, J.F., Francois, M., Grillet, Y., Michot, I., Poirier, J.E. & YVON J.**, 1990. Quelques aspects de l'étude des propriétés texturales des argiles. In : Decarreau A. *Matériaux argileux : structures, propriétés et applications*, Société Française de Minéralogie, Groupe français des argiles, pp.309-342.
- **Chamii.** effet d'ajout de stabilisant (ciment. Chaux et sable) sur le retrait et sur la résistance mécanique des argiles: Université Mouloud Mamerie de Tizi-Ouzou, 2016, 120p.

- **Charradi K.** (2010). Contribution des argiles ferrifères à l'élaboration de biocapteurs ampérométriques : Étude de l'interaction de l'Hémoglobine avec des Argiles et des Hydroxydes Doubles Lamellaires. Thèse de doctorat. Université 7 Novembre de Carthage et de l'Université de Grenoble, Tunisie. 156 p.
- **Charef N, Boumezbeur A, Berrah Y.,** (2008). Étude géologique et mécanique des glissements de terrains dans la région de Souk-Ahras (Mechroha, Zaarouria, Hammamtassa). International Conference on Numerical Computation in Geotechnical Engineering NUCGE'08. pp147-154. Skikda, Algérie.
- **Chen F.H.** (1988), Foundations on expansive soils. Developments in Geotechnical Engineering, Elsevier Publishing Co., Amsterdam, vol. 54, 464 p.
- **Collins, K. & McGown, A.,**(1974). The form and function of microfabric features in a variety of natural soils. Géotechnique, vol. 24, pp. 223-254.
- **Coralie A,** (2014) La dimension fractale du flocon de Niel Von Koch, université de parais.
- **Coulon, E. & Bruand, A.,** (1989). Effects of compaction on the pore space geometry in sandy soils. Soil and Tillage Research; 15:137–152.
- **Coussy, O D.** (2002) Mécanique des sols non saturés . Paris, Hermes sciences publication.
- **Crawford C. B.** (1964). Interpretation of the consolidation test. American Society of Civil Engineers, journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, vol. 90(5), pp.87-102.
- **Cuisinier, O. & Laloui, L.,** (2004). Fabric evolution during hydro-mechanical loading of compacted silt. International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol 28, pp 483-499.
- **Cui, Y.J., Loiseau, C. & Delage, P.,**(2002). Microstructure changes of confined swelling soil due to suction controlled hydration. Proc. 3rd Int. Conf. On Unsaturated soils, Recife, Brazil, 10-13 March 2002. In: Unsaturated soils. JF.T.
- **Delage, P. & Lefebvre, G.,** (1984). Study of the structure of a sensitive Champlain clay and of its evolution during consolidation. Revue Canadienne de Géotechnique, vol. 21, pp. 21-35.
- **Demers D., Robitaille D., Potvin J., Bilodeau C et Dupuis C.** (2008). La gestion des risques de glissements de terrain dans les sols argileux au Québec. Comptes rendus de la 4e Conférence Canadienne sur les géorisques : des causes à la gestion. L'Université Laval., Québec. pp 519-526.
- **Didier, G.,** (1972). Gonflement cristallin et macroscopique des montmorillonites. Thèse d'université de Claude Bernard.

- **Dominique L.**, (2006), Régression multiple : principes et exemples d'application, UMR 5603 CNRS, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 33p.
- **Dong, Pinliang.** (2000). « Test of a new lacunarity estimation method for image texture analysis ». *International journal of. Remote Sensing*, Vol. 21, n° 17, p. 3369–3373.
- **Foroutan-pour, K.P.Dutilleulet D.L. Smith.** (1999). Advances in the implementation of the box-counting method of fractal dimension estimation. *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 105 n° 2-3, p. 195-210.
- **Fripiat J.J.&Gatineau L.** (1984) -"interaction eau-argiles". *scien. géol. bull.*, vol. 37, n°4, pp 283-296.
- **Jacques. M,** Fractale de Sierpinsky,(2013).
- **Jennings, J.E.B&Burland, J.B.,** (1962). Limitations to the use of effective stresses concept in partly saturated soils. *Géotechnique*, vol. 12, pp. 125-144.
- **Jin, X.C. et S.H. Ong.** (1995). A practical method for estimating fractal dimension. *Pattern Recognition Letter*, Vol 16, n°5, p. 457-464.
- **Jones J.D.E. et Holtz W.G.,** (1973), Expansive soils-The hidden disaster *Civil Engineering*, ASCE, vol. 43, p. 49-51.
- **Juang, C.H. &Holtz, R.D.,**(1986). A probabilistic permeability model and the pore size density function. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 10, pp. 543–553.
- **Jucá, T.M.P. de Campos&F.A.M. Marinho** (eds.). A.A. Balkema Publisher, Lisse, 2: 593-598.
- **Julien J** (2014), Modélisation Statistique, Polytech'lille Département G.I.S., 57p.
- **Halley,J. M., Stephen H**(2004), Athanasios S. Kallimanis, W. E. Kunin, J. J. Lennon et S. P. Sgardelis. Uses and abuses of fractal methodology in ecology ». *Ecology Letters*, Vol. 7, n°3, p. 254–271.
- **Hanen, A, Bhoury I b, Ben AbdallahA,Patrick D et Bedoui M H.** (2009). Multifractal modelling and 3D lacunarity analysis . *Physics Letters A*, Vol. 373, n° 40, p. 3604–3609.
- **Hoffmann, C., Alonso, E.E. &Romero, E.,**(2007).Hydromechanical behavior of bentonite pellet mixtures. *Physics and Chemistry of the Earth*, vol. 32, pp. 832-849.
- **Nowamooz H**(2007),Retrait/gonflement des sols argileux compacts et naturels, Thèse de doctorat, Ecole National Supérieure de Géologie, Laboratoire Environnement, Géomécanique& Ouvrage, Ecole Doctorale RP2.

- **Garcia-Bengochea, I., Lovell, C. &Altschaeffl, A.** (1979). Pore Distribution and Permeability of Silty Clays. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 105, No.7, pp 839-856.
- **Gens A.&Alonso E.E.**(1992) - "a framework for the behaviour of unsaturated expansive clays". *canadian geotechnical journal*, vol. 29, pp. 1013-1032.
- **Gilliot,J.E.**, (1979). Fabric composition and properties of sensitive soils from Canada, Alaska and Norway.*Engineering Geology*, vol. 14, pp. 149-172.
- **Gonzato, G, Francesco M etMatteo C.** (2000). Measuring the fractal dimensions of ideal and actual objects: implications for application in geology and geophysics .*Geophysical Journal International*, Vol. 142, n° 1, p. 108-116.
- **Griffiths, F.J.&Joshi, R.C.**, (1989). Change in pore size distribution due to consolidations of clays. *Géotechnique* 39 1, pp. 159–167.
- **GT14.1-2017-guidetechnique-Ifsttar** techniques et méthodes, Retrait et gonflement des argiles Caractériser un site pour la construction Guide 1 page9.
- **GueddachH.**(2012) Stabilisation des sols à la chaux et à chaud: Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou,118p.
- **GuillemotH,**(2014) Les désaccords sur le changement climatique en France : au-delà d'un climat bipolaire , *Natures Sciences Sociétés*, (Vol. 22).
- **Khebizi M., Guenfoud M.,** (2008).Modélisation numérique d'un versant potentiellement instable -Cas du glissement de Boussoufà Constantine (nord-est de l'Algérie). *International Conférence on Numerical Computation in Geotechnical Engineering NUCGE'08*.pp161-165.Skikda, Algérie.
- **KhoualdiaW**(2015). Contribution à l'étude de la variabilité climatique et son impact sur les ressources hydriques«cas d'oued Medjerda Nord-Est Algérie». (160 pages).UnivBadjiMokhtar,Annaba.These de doctorat en sciences.pp (17).
- **Koliji, A., Laloui, L., Cusinier, O. &Vuillet. L.,** (2006). Suction induced effects on the fabric of a structured soil. *Transport in Porous Media Journal*, 64:261-278.
- **Kröhn K. P.** (2003).New conceptual models for the resaturation of bentonite. *Applied Clay Science*, 23: 25-33.
- **Lapierre, C., Leroueil, S., &Locat, J.,** 1990. Mercury intrusion and permeability of Louisevilleclay.*Canadian Geotechnical Journal*, 27: 761–773.
- **Li, Jian Li,Qian D,Caixin S.** 2009. « Animproved box-counting method for image fractal dimension estimation ». *Pattern Recognition*, Vol. 42, n° 11, p.2460-2469.

- **Lloret, M. Villar, M. Sanchez, A. Gens, X. Pintado, E. & Alonso, E.E.,**(2003). Mechanical behaviour of heavily compacted bentonite under high suction changes. *Géotechnique*, vol.53, no. 1, pp. 27-40.
- **Locat P., Leroueil S et Locat J.,** (2008). Remaniement et mobilité des débris de glissements de terrain dans les argiles sensibles de l'Est du Canada. *Comptes rendus de la 4e Conférence Canadienne sur les géorisques : des causes à la gestion*. L'Université Laval., Québec.
- **Low P.F.**(1961) - "physical chemistry of clay-water interaction". *advances in agronomy, academic, new york*, vol. 13, pp. 269-327.
- **Low, P.F.,** (1980). The swelling of clays: I. Montmorillonites. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 44, pp. 667-676.
- **Mandelbrot, B.** (1967). How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension. *New Series, Vol. 156, n° 3775*, p. 636-638.
- **Mandelbrot, B.** (1983), *The fractal Geometry of Nature*, vol. 1. New York, W.H. Freeman and Co., 495 p.
- **Mandelbrot, B.** (1985), Self-affinity and fractal dimension. *Physica Scripta*, Vol 32, n° 4, p. 257-260.
- **Maison T.** (2011) Analyse à l'échelle microscopique des phénomènes d'humectation et de dessiccation des argiles. Thèse doctorat, École Centrale des Arts et Manufactures « École Centrale paris , France. P 270.
- **Magnan J.-P.,** (1982), *Les méthodes statistiques et probabilistes en mécanique des sols*, Presse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, France, 203p.
- **Marsily (de) G.** (1981). *Hydrogéologie quantitative*. Collections sciences de la terre. Edition Masson, 215 p.
- **Mazar, A.**(2014) Impact des changements climatiques sur les ressources en eau superficielles. 60 pages. ENSH Blida. Mémoire Master.
- **Medjnoun A**(2014), analyse, caractérisation, prévision et modélisation du comportement des argiles gonflantes. Thèse de doctorat, université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (171pages).
- **Mitchell J. K.** (1976). *Fundamentals of Soil Behavior*. Wiley, 436 p.
- **Mitchell J.K.** (1993). *Fundamentals of soil behaviour*. 2ème ed., John Wiley and Sons, New York, 437p.
- **Morel R.** (1996) - "les sols cultivés", 2ème édition. paris: technique & documentation, isbn:2-743.

- **Nelson J.D.** et **Miller D.J.**, (1992), *Expansive soils problems and practice in foundation and pavement engineering*, John Wiley et Sons, Inc, New York, USA, p. 40-57.
- **Ouaaz. O.**(2014) *Etude de la dégradation des grains sous les conditions climatiques : calcul de leur dimension fractale.* (221pages). (L.G.E.A) l'UMMTO. memoire de master académique.
- **Ourrad, K**(2018). *L'étude des effets climatiques sur les sols fins et détermination de la dimension fractale.* (225pages). (LGEA)l'ummto.Memoire de master académique.pp(64,66,71,72).
- **Paoli. B, Vauthier.T,Frappier.L,Kende.M**, Tpe les fractales,2003.
- **Pentland,Alex P.**(1984). *Fractal-Based Description of Natural Scenes* .IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.6, n° 6, p. 661-674.
- **Philipponnat G** (1991) *Retrait-gonflement des argiles* — Wikipédia.html (↑ Revenir plus haut en : a b c d e f et g *Retrait-gonflement des argiles, proposition de méthodologie [archive].* *Revue Française de géotechnique*, (57), 5-22|PDF, 18p.
- **Pierre-AlexandreG** (2016) *L'analyse fractale : un outil d'écologie industrielle.* (231 pages). Mémoire présenté à école de technologie supérieure université du québec. Comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise avec mémoire en génie de l'environnement m. sc a. montréal, le 11 août 2016. pp (44-49).
- **Plotnick, R E., Robert H. Gardner et Robert V.O'Neill.** (1993). *Lacunarity indices as measures of landscape texture* .*LandscapeEcology*, Vol. 8, n° 3, p. 201-211.
- **Praparharan, S., Altschaeffl, A.G. &Dempsey, B.J.**, (1985). *Moisture curve of compacted clay: mercury intrusion method.* *J. Geotech. Engng, ASCE* 111 9, pp. 1139–1143.
- **Pusch, R.&Yong, R.N.**, (2003) (Editors). *Special Issue.Claymicrostructure.Proc. Workshop Lund, Sweden. 15-17 October, 2002.* *Applied clay science* 23.Issues 1-4.
- **Push, R.**, (1982). *Mineral-water interactions and their influence on the physical behaviour of highly compacted Na-bentonite.* *Revue Canadienne de Géotechnique*, vol. 19, pp. 381-387.
- **Push, R., Yong, R.N. &Grindrod, P.**,(1999) (Editors).*Special Issue. Microstructural modelling with special emphasis on the use of clays for waste isolation.* *Engineering Geology* 54.

- **Qi, Y, Al-mukhtar, M, Alcover, JF & Bergaya, F.**(1996) Coupling analysis of macroscopic and microscopic behaviour in highly consolidated Na-laponite clays. *Applied Clay Science*; 11:185–197.
- **Rakotomalala R.**, (2011), *Pratique de la Régression Linéaire Multiple Diagnostic et sélection de variables*, Version 2.0, Université Lumière Lyon 2, 174p.
- **Richardson, Lewis F.**(1961). The problem of contiguity: an appenxi of statistics of deadly quarrels .*Geneneral System Yearbook*, Vol. 6, n° 13, p. 139-187.
- **Romero, E., Lloret, A. & Gens, A.**, (1999). Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated Boom clay. *Engineering Geology*, vol. 54, pp. 117-127.
- **Romero, E., Hoffmann, C., Castellanos, E, Suriol, J.&Lloret, A.**, (2005). Microstructural. changes of compacted bentonite induced by hydro-mechanical actions. Proc. Int. Symposium on Large Scale Field Tests in Granite, Sitges,spain, 12-14th November. In: *Advances in Understanding Engineered Clay Barriers*. E.E. Alonso and A. Ledesma (eds.); Taylor & Francis Group, London: 193-202.
- **Rosenqvist T.** (1959). Physico-chemical properties of soils: soil-water systems. *Journal of the soils mechanics and foundation division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers*.
- **Niazi.S** (2007). Evaluation des impacts des changements climatiques et de l'élévation du niveau de la mer sur le littoral de Tétouan (Méditerranée occidentale du Maroc) : Vulnérabilité et Adaptation. Thèse doctorat. Université Mohammed V– Agdal. faculté des sciences. Disponible sur <toubkal.imist.m>. Consulté le :05/01/2016. (www.effet-serre.fr).
- **Simms, P.H. & Yanful, E.K.**, (2002). Predicting Soil-Water Characteristic Curves of Compacted Plastic Soils from Measured Pore-Size Distributions. *Geotechnique* 52 (4): 269-278.
- **Simms, P.H. & Yanful, E.K.**,(2004). A discussion of the application of mercury intrusion porosimetry for the investigation of soils, including an evaluation of its use to estimate volume change in compacted clayey soils. *Geotechnique*, Vol. 54(6), pp. 421-426.
- **Simms, P.H. & Yanful, E.K.**, (2005). A pore-network model for hydro-mechanical coupling in compacted clayey soil. *Canadian Geotechnical Journal* 42(2): 499-514.
- **Smith, T. G., G. DLange et W. B. Marks.** (1996). Fractal methods and results in cellular morphology—dimensions, lacunarity and multifractals. *Journal of neuroscience methods*, Vol. 69, n° 2, p. 123-136.

- **Sposito, G.**, (1973). Volumes changes in swelling soils. *Soil Sciences*, vol. 115, pp. 315- 320.
- **Sridharan, A, Altschaeffl, A.G. & Diamon, S**, (1971). Pore-size distribution studies. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division ASCE* 1971; 97:771–787.
- **Sridharan, A. & Jayaveda, M.S.**, (1982). Double layer theory and compressibility of clays. *Géotechnique*, vol. 32, n° 2, pp. 133-144.
- **Sridharan, A., Sreepada, R. & Sivapullaiah, P.V.**, (1986). Swelling pressure of clays. *Geotechnical Testing Journal*, vol. 9, pp. 24-33.
- **Sridharan, A. & Venkatappa RAO, G.**, (1973). Mechanisms controlling volume change of saturated clays and the role of the effective stress concept. *Géotechnique*, vol. 23, pp. 359-382.
- **Tessier, D.**, (1984). Étude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux – Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. Thèse de doctorat, Université Paris VII, 362 p.
- **Tessier, D., Lajudi, A. & Petit, J.C.**, (1992). Relation between the macroscopic behavior of clays and their microstructural properties. *Appl. Geochem. Suppl. A*: 151-161.
- **Velenik Y.**, (2012), Cours de Probabilités et Statistique, Université de Genève, Version du 24 mai 2012. 238 p.
- **Vijayvergiya, V.N. & Ghzzaly, O.I.**, (1973). Prediction of swelling potential for natural clays. *Proceedings of the 3rd International Conference on Expansive Soils*, vol. 1, Haïfa, pp. 227-236.
- **Wakim J.** (2005). Influence des solutions aqueuses sur le comportement mécanique des roches argileuses. Thèse de doctorat. École nationale supérieure des mines de paris. Fontainebleau Cedex . France. 154 p.
- **Wan, A.W.L., Gray, M.N. & Graham, J.**, (1995). On the relations of suction, moisture content and soil structure in compacted clays. *Proc. 1st Int. Conf. On Unsaturated soils*, Paris. E.E. Alonso and P. Delage (eds.), Balkema / Presses des Ponts et Chaussées, 1: 215 –222.
- **Widal T.** (2001). Etude en laboratoire du gonflement des sols: Mise au point d'un oedomètre flexible et étude du gonflement tridimensionnel. Thèse de doctorat, Laboratoire de Mécanique de Lille (U.R.A. CNRS 1441), Ecole Universitaire d'Ingénieurs de Lille, France. P 128.
- **Wong, R.C.K.**, (1998). Swelling and softening behaviour of La Biche shale. *Revue Canadienne de Géotechnique*, vol 35, pp. 206-.221.

- **Xiang-Ling LI**,(1999).Comportement Hydromécanique des Sols Fins : de l'état saturé à l'état non saturé. Thèse de Doctorat en Sciences appliquées, Université de Liège.
- **Yadav, J, K., J. S. Bagla et NishikantaK.** (2010). Fractal dimension as a measure of the scale of homogeneity. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 405, p. 2009-2015.
- **Yong, R.N. & Mohamed, A.M.O.**,(1992).A study of particle interaction energies in wetting of unsaturated expansive clays.Revue Canadienne de Géotechnique, vol. 29, pp. 1060-1070.
- **Yong, R.N. & Warkentin, B.P.**,(1975). Soil properties and behaviour. Amsterdam: Elsevier. ISBN: 0-444-41167-4. Developments in Geotechnical Engineering, vol. 5. 449 p.
- **Zeta,M**(2017). Les effets des sollicitations saisonnières sur les sols argileux et détermination de la dimension fractale (110 pages). (LGEA)l'ummt.Memoire de Master Académique.

Liste des sites utilisés

Source :climat Tizi-Ouzou-données climatique (603950).mhtml
Source :Climatologie de l'année 2020 à Tizi-Ouzou - Infoclimat.html (DZ)
Source :Climat _ en 1988, 2020 était bien prédit – {Sciences²}.mhtml. Le Monde.fr
Source :<http://www.prim.netDGALN> guide retrait gonflement des argiles, aout 2007.
Source :<http://www.mathcurve.com/courbes2d/tautochrone/tautochrone.shtml>.
Source :<http://www.mathcurve.com/courbes2d/tautochrone/tautochrone.shtml>.
Source :<http://www.dmae.upm.es/cursofractales/capitulo1/3.html>.
Source :<http://www.pensee-unique.fr/oceans.html>le22/04/2014
Source : hommesetsoleil.e-monsite.com
Source: <http://terresacree.org/rechauf.htm>
Source : <http://scholars-stage.blogspot.com>
Source:<http://le-rechauffement-climatique-tpe.e-monsite.com/medias/images/effetschangement-climatique-2.gif>.
Source :<http://www.diapo.ch/ploncheContact.php>
Source : <https://www.notre-planete.info/terre/risques-naturels>
Source:<https://www.notre-planete.info/actualies/3044-canicules-france-juillet-2019>
Source:<https://www.notre-planete.info/actualies/3041-incendies-forets-records-arctique>
Source:<https://www.notre-planete.info/actualies/3064-incendies-records-amazone>
deforestation.
Source:[https:// La. climatologie.free.fr](https://La.climatologie.free.fr).



Annexe A

*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

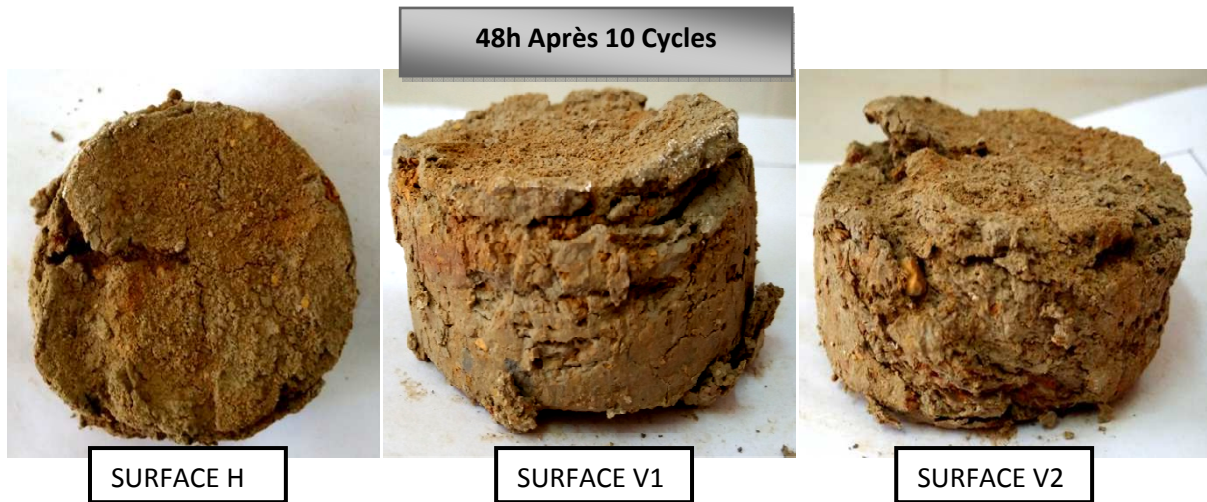
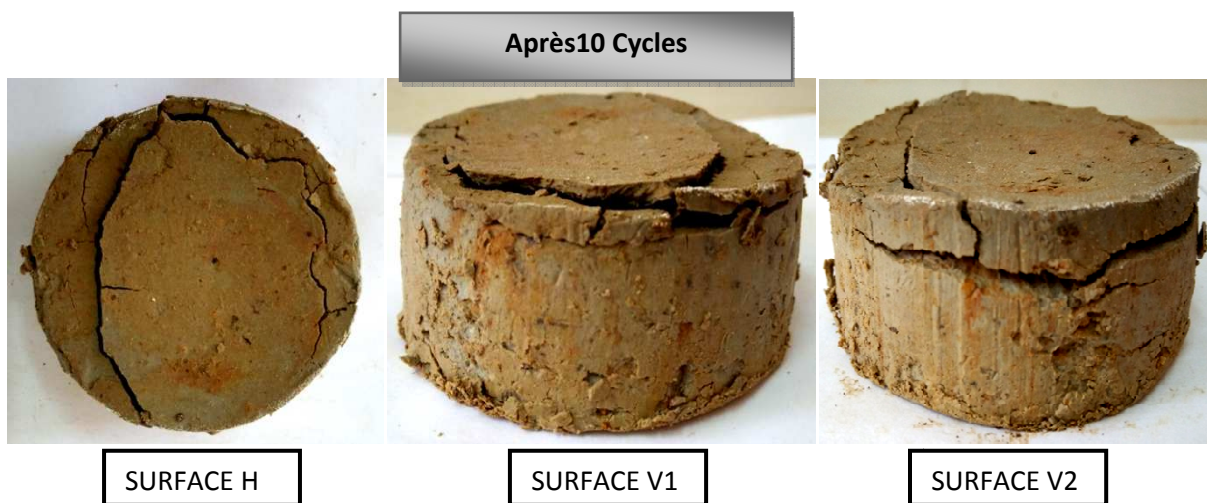
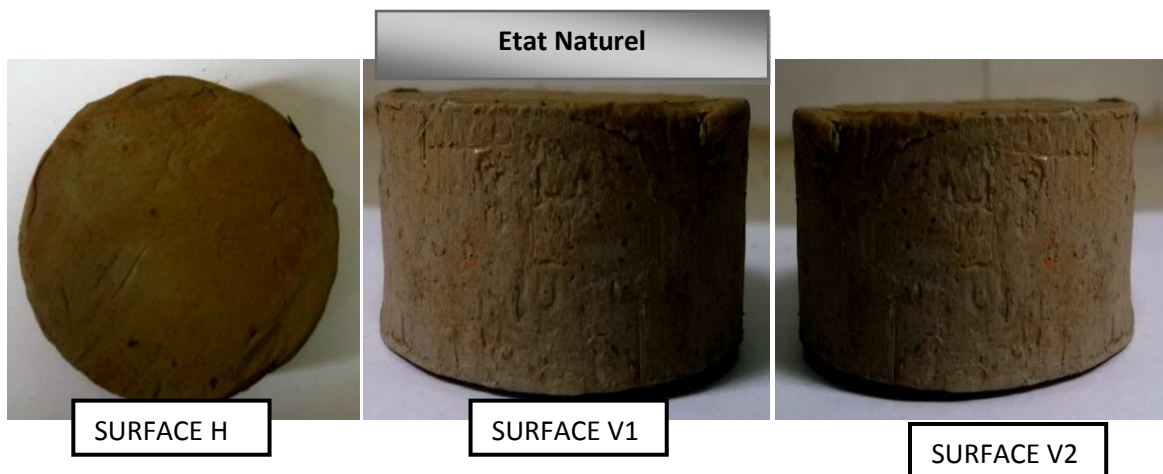


Figure I.1 : Les images de l'échantillon N°02 d'Azazga à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.



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

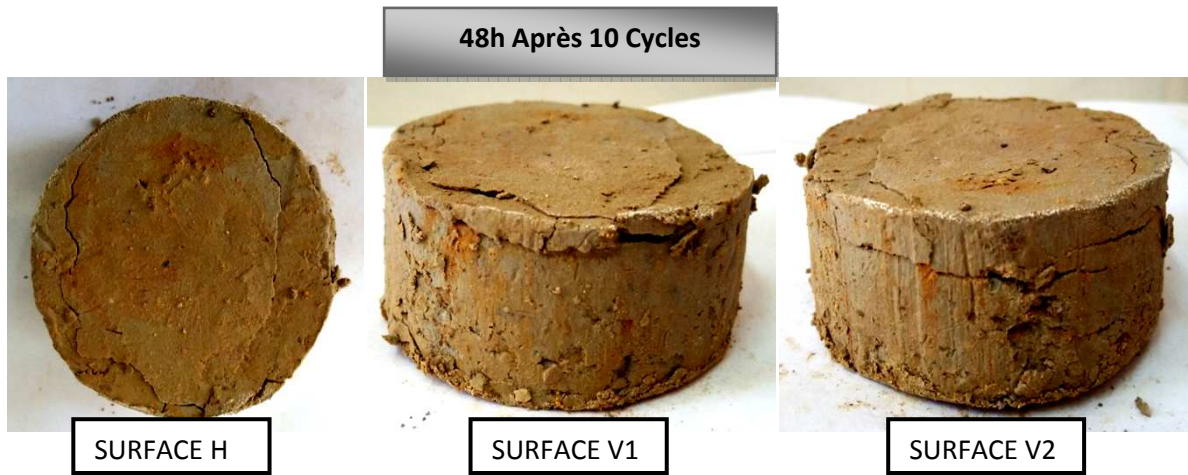
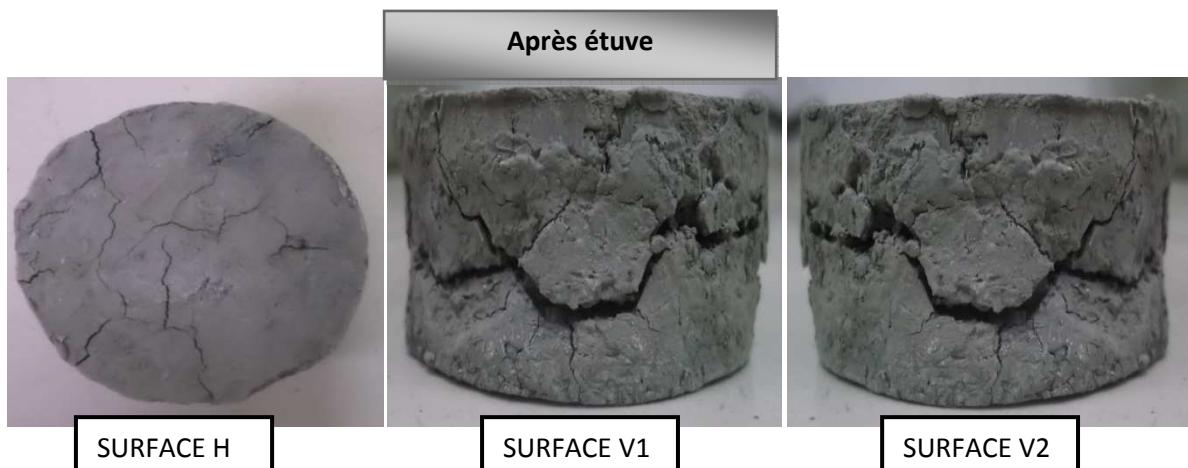
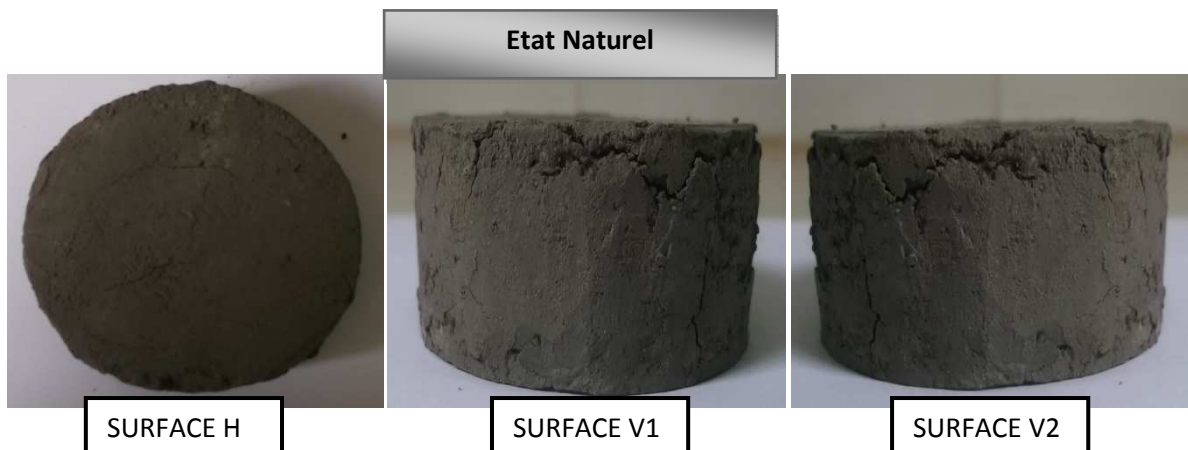


Figure I.2 : Les images de l'échantillon Témoin d'Azazga (Azazga.N) à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.



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

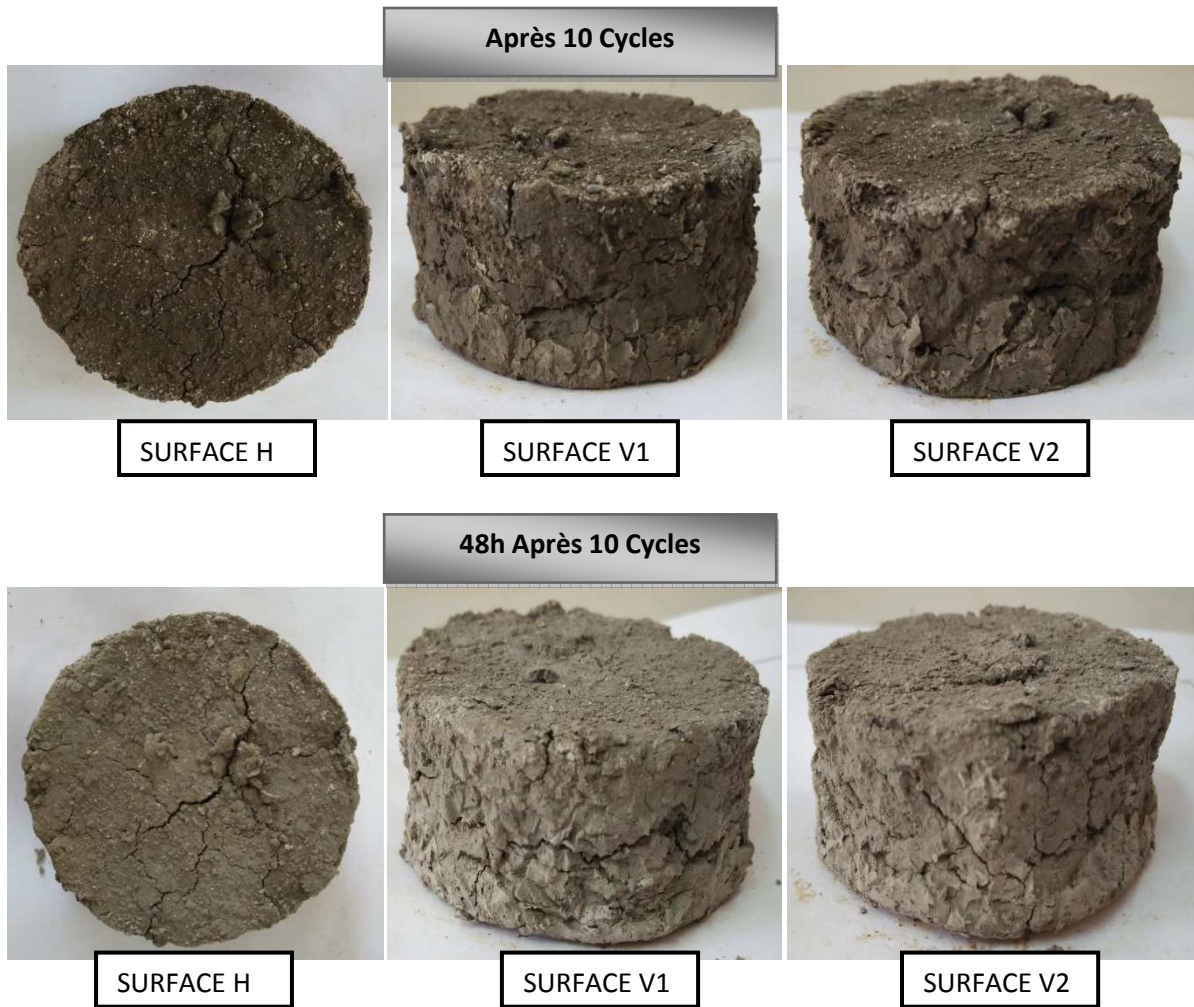
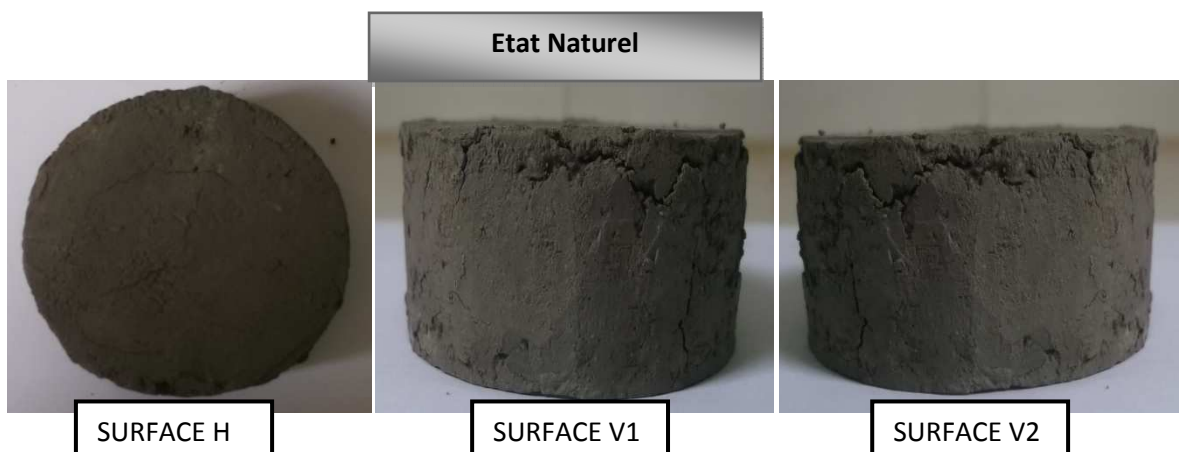


Figure I.3 : Les images de l'échantillon N°02 de Tizirt à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.



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

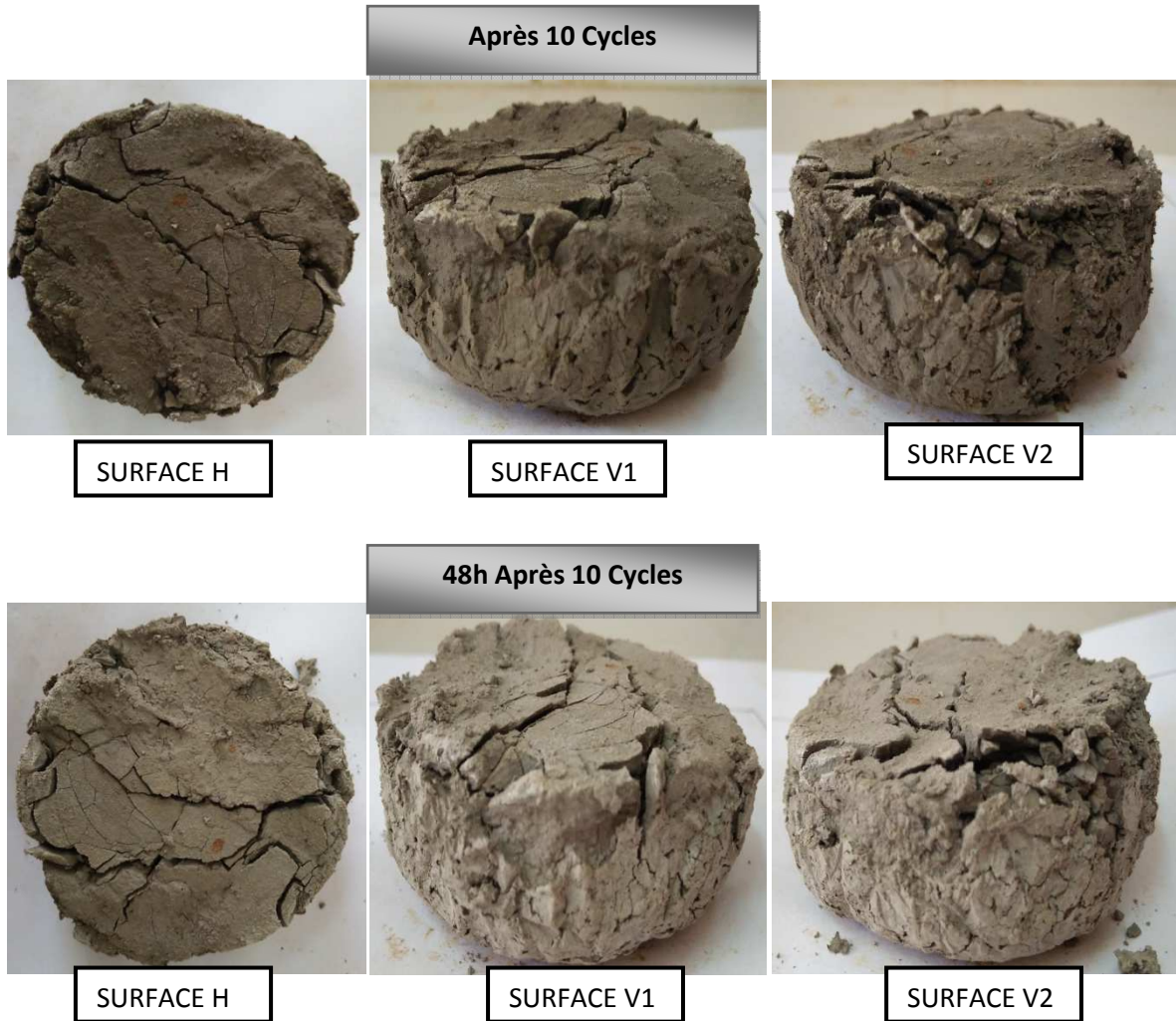


Figure I.4 : Les images de l'échantillon Témoin de Tizirt (Tizirt.N) à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique



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

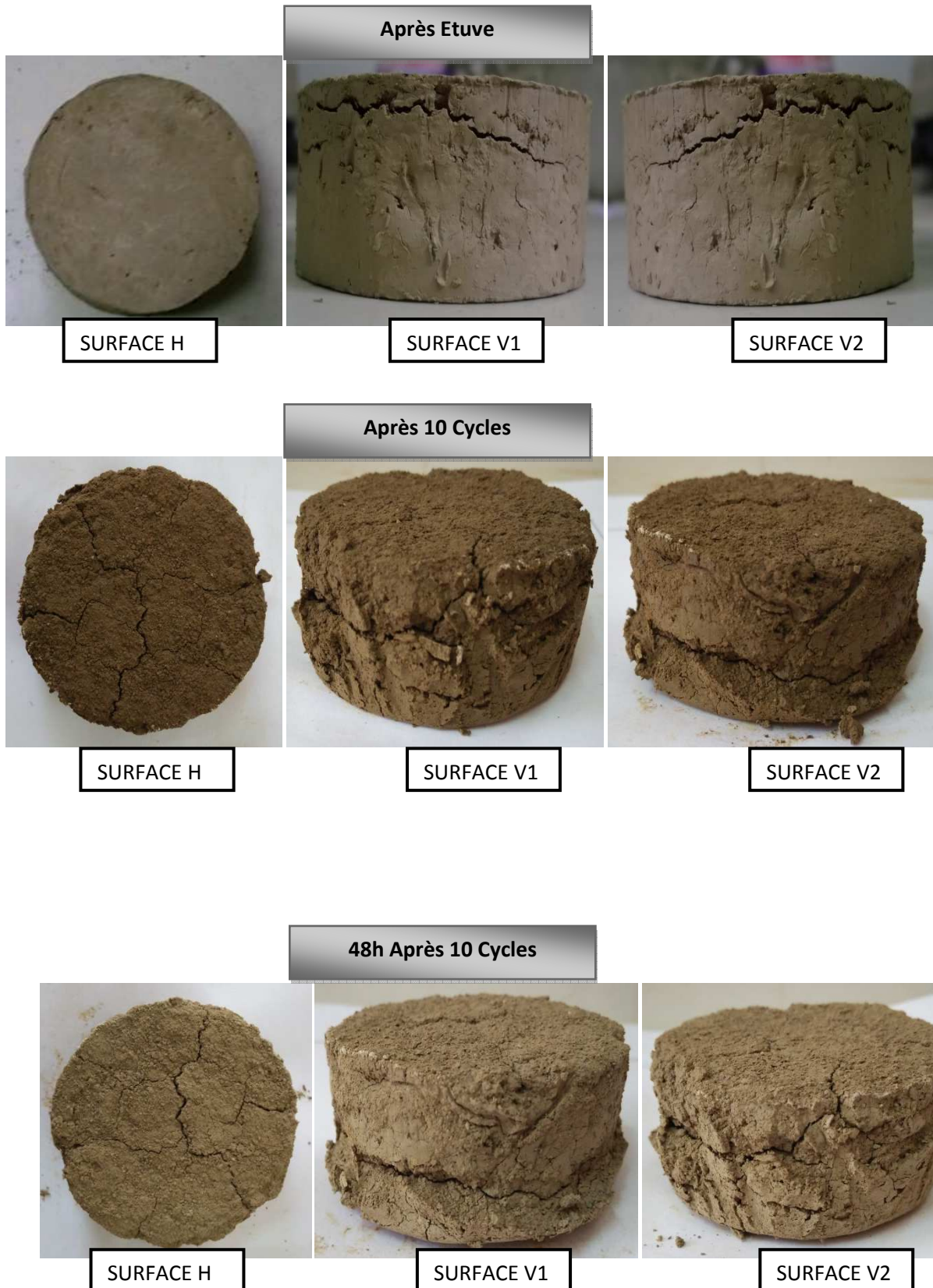


Figure I.5 : Les images de l'échantillon N°02 de Centre-Ville (C.V.Compacté) à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.

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

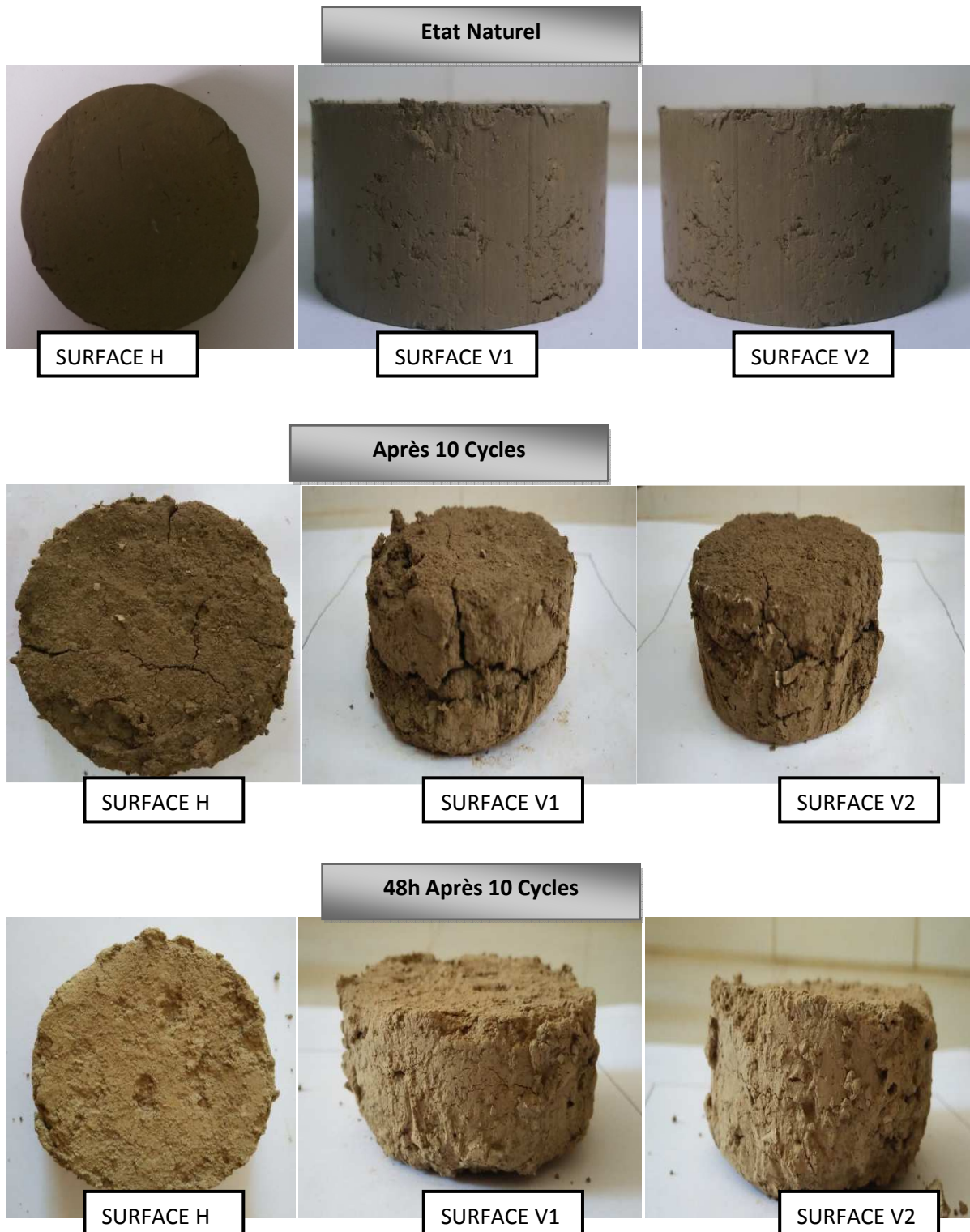


Figure I.6 : Les images de l'échantillon témoin de Centre Ville (C.V.N.Compacté) à l'état naturel, après passage à l'étuve et l'enceinte climatique.

II. Essais de CANICULES

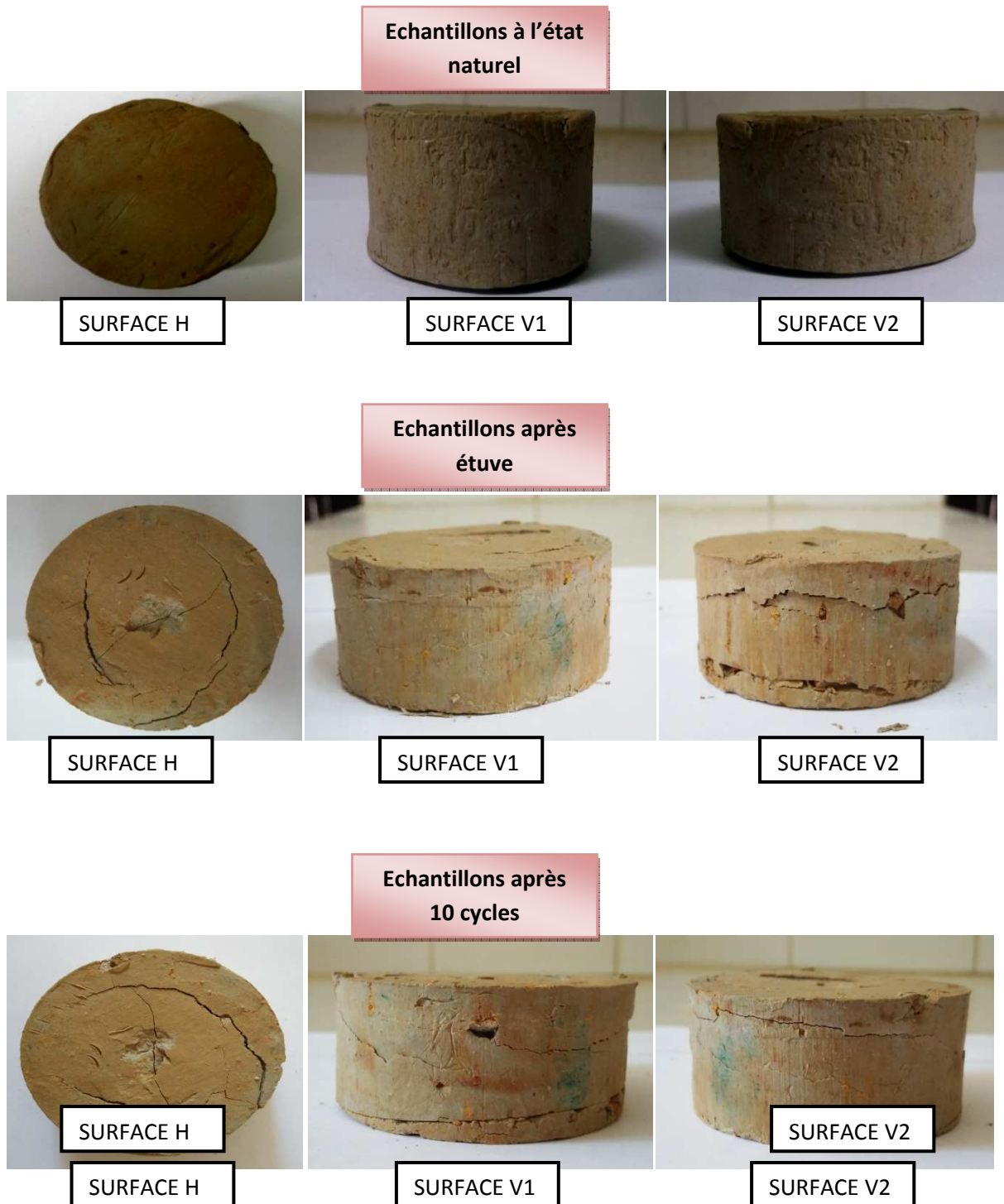


Figure II.1: Images de l'échantillon d'argile N°02 d'Azazga pendant l'essai de Canicules.

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

Echantillons à l'état naturel



SURFACE H



SURFACE V1



SURFACE V2

Echantillons après étuve



SURFACE H



SURFACE V1



SURFACE V2

Echantillons après 10 cycles



SURFACE H



SURFACE V1



SURFACE V2

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

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

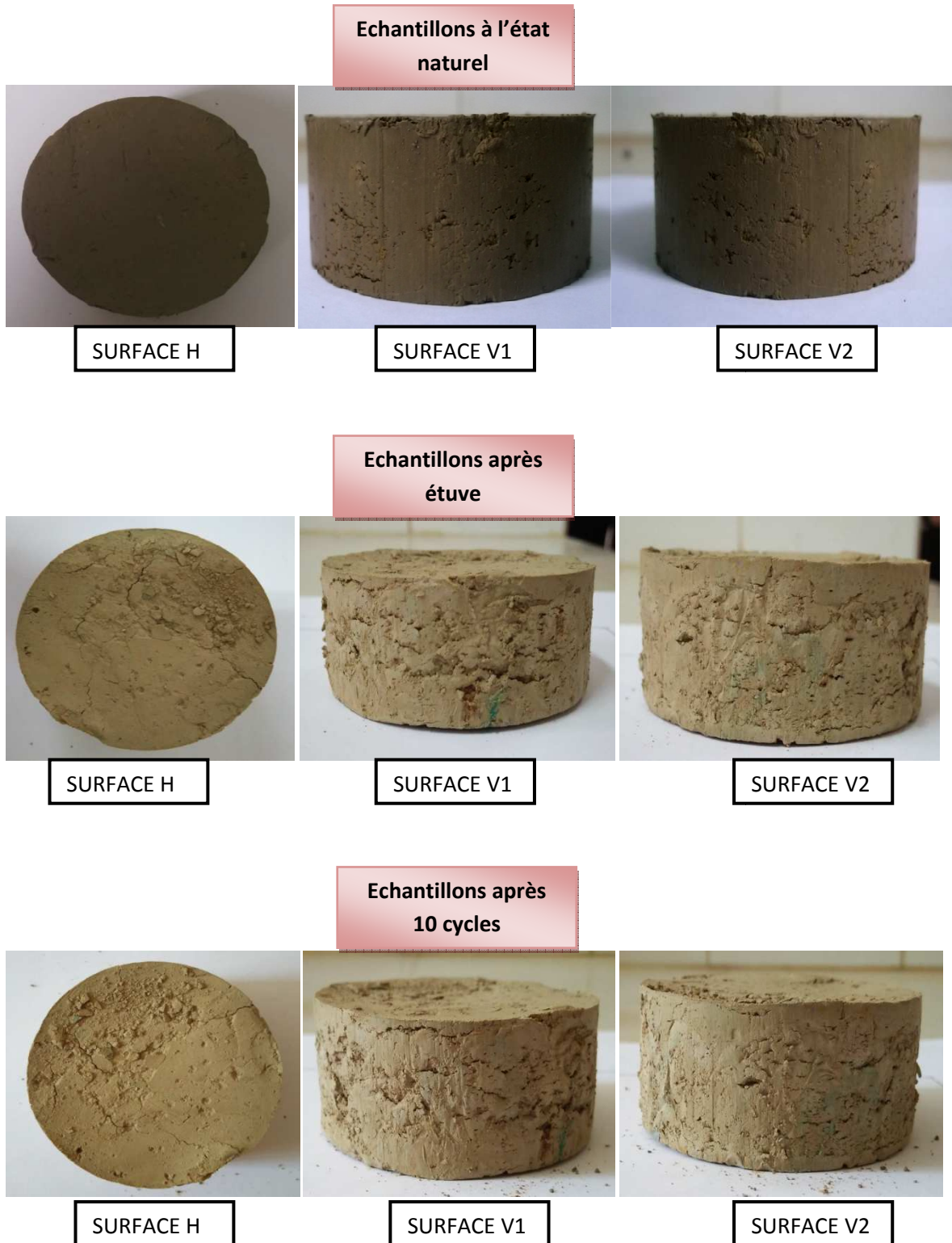


Figure II.3: Images de l'échantillon d'argile N°02 de Centre Ville (C.V. Compacté) pendant l'essai de Canicules.



Annexe B

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



Etat naturel



1^{er} cycle



2^e cycle

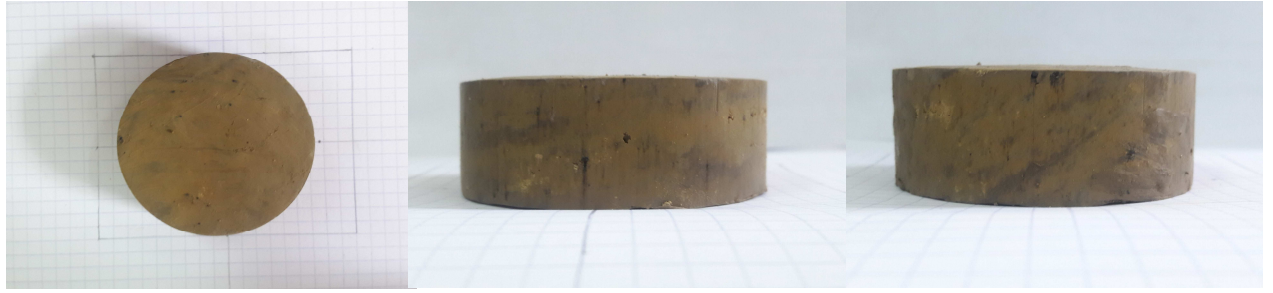


3^e cycle



4^e cycle

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



Etat naturel



1^{er} cycle



2^e cycle



3^e cycle



4^e cycle

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



Argile a l'état naturel



Après enceinte climatique



48h après l'enceinte climatique

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



Argile à l'état naturel



Après l'étuve

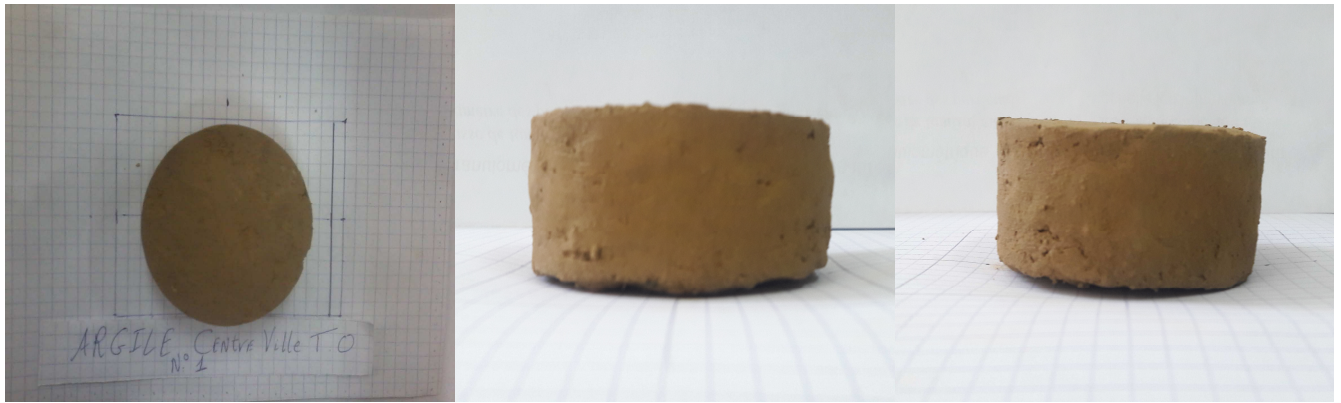


Juste après 10 cycles



Après 10 cycles (après 48h)

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



Argile à l'état naturel



Après l'étuve



Juste après 10 cycles



Après 10 cycles (après 48h)

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



Argile à l'état naturel



Après l'étuve



Juste après 10 cycles



Après 10 cycles (après 48h)

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