

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou
Faculté de Génie de la Construction



Département de Génie Civil

Laboratoire de Géomatériaux, Environnement et Aménagement (LGEA)

Mémoire de fin d'étude

Master Académique

Spécialité : Génie Civil

Option : Géotechnique

THEME

Influence des changements climatiques sur les sols fins

Réalisé par :

IMRAZENE Dyhia

Soutenu devant le jury :

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

Mme BOUZEBODJA Aldja , Maitre de conférence-B à l'UMMTO.....Promotrice

Mme BAIDI Fawzia, Maitre Assistante-A à l'UMMTO.....Examinatrice

Année Universitaire : 2019-2020

SOMMAIRE

Remerciements	
Dédicace	
Liste des symboles	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
INTRODUCTION GENERALE.....	1
PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE :	
Chapitre I : Changements climatiques	
I-1) Introduction	3
I-2) Notion de climat	3
I-3) Changements climatiques dans le monde.....	3
I-4) Différentes indices de changement climatique.....	4
I-4-1) Les températures	5
I-4-2) Les canicules (vagues de chaleur).....	5
I-4-3) Les précipitations	6
I-4-4) L'humidité.....	7
I-5) Causes des changements climatiques	7
I-5-1) Le rayonnement solaire	7
I-5-2) Les aérosols	8
I-5-3) L'effet de serre	8
❖ Définition.....	8
❖ Les principaux gaz à effet de serre	10
I-6) Changements climatiques dans l'Algérie	11
I-7) Willaya de Tizi-Ouzou	12
I-7-1) Situation géographique	12
I-7-2) Le climat de Tizi-Ouzou	13
I-8) Conséquences des changements climatiques en générale	16
I-9) Conséquences des changements climatiques dans le domaine de génie civil	17
I-10) Conclusion.....	17
Chapitre II : Influence des changements climatiques sur les sols fins	
II-1) Introduction	18
II-2) Généralité sur les sols fins.....	18
II-3) Composition minéralogique des sols fins.....	18
II-4) Différentes types de sols fins	18
II-5) Les argiles	19
II-5-1) Les minéraux argileux.....	19
II-6) Les minéraux argileux et le système « argile – eau »	23
II-7) Les marnes	23

II-7-1) Origine	23
II-7-2) Définition de la marne	23
II-7-3) Les différents types de marne	24
II-7-4) Genèse des marnes	25
II-7-5) Caractéristiques de la marne	25
II-7-6) L'altération des marnes	27
II-8) Comportement des sols soumis au gel-dégel	27
II-8-1) Les échanges thermiques à partir de la surface du sol	28
II-8-2) Les échanges d'humidité dans le sol sous l'action du gel	29
II-9) L'influence climatique sur les sols fins	31
II-10) Le retrait-gonflement	32
II-10-1) Le phénomène de leur retrait-gonflement	33
II-10-2) Les facteurs intervenants dans le phénomène de retrait-gonflement des argiles	34
II-11) Les fissures	34
II-12) Conclusion	35
Chapitre III : Dimension fractale et ses méthodes de calcul	
III-1) Introduction	36
III-2) Définition	36
III-3) Origine des fractales	36
III-4) Caractéristiques d'un objet fractal	36
III-5) Notion de la dimension	38
III-5-1) Dimension fractale	38
III-6) Application à la dimension fractal	38
III-6-1) Le flocon de Koch	38
III-6-2) Le triangle de Sierpinsky	39
III-6-3) Le tapis de Sierpinsky	39
III-6-4) Eponge de Menger	39
III-6-5) Ensemble de Cantor	40
III-6-6) Ensemble de Mandelbrot	40
III-6-7) Ensemble de Julia	41
III-7) Exemple de calcul de la dimension fractale	42
III-8) Le calcul de la dimension fractale en génie civil	43
III-9) Les méthodes de calcul de la dimension fractale	44
III-10) Méthode de compactage des boîtes (Box Counting)	44
III-10-1) Calcul de la dimension fractale du contour du grain seulement	45
III-10-2) Calcul de la dimension fractale de la surface intérieure du grain	46
III-11) Méthode de comptage différentielle de boîtes	47
III-12) Modélisation fractale de la structure du sol	52
III-13) Conclusion	52
PARTIE EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE	
Chapitre IV : Résultats des essais réalisés sur les sols étudiés	
IV-1) Introduction	54
IV-2) Localisation géographique des marnes de la région de Tizi-Ouzou	54
IV-3) Les essais d'identification	55

IV-3-1) Caractéristiques physiques	55
) Interprétation des résultats.....	55
IV-3-2) Caractéristiques chimiques et minéralogiques	56
A/Caractéristiques chimiques des échantillons N°1, N°2 et N°3	56
A-1/Teneur en carbonate de calcium CaCO ₃ (NF P 94 – 048) – Méthode du calcimètre	56
A-2/ Teneur en matières organiques-(NF P 94-047) - Méthode par calcination.....	56
A-3/ Sulfates solubles dans l'acide -selon la norme NF EN 1744-1(P 18-660-1)	57
A-4/ Chlorures solubles dans l'eau-NF EN 1744-1(P 18-660-1).....	57
B/ Caractéristiques minéralogiques pour les échantillons N°4 et N°5.....	57
IV-4) Les essais des effets climatiques au laboratoire	59
IV-4-1) Essai Gel-Dégel	59
IV-4-1-1) Principe de l'essai	59
IV-4-1-2) Déroulement d'essai.....	59
IV-4-1-3) Images des échantillons	59
IV-4-1-4) Les résultats obtenus	69
IV-4-1-5) Interprétation des résultats	69
IV-4-2) Essai de Dégradabilité	70
IV-4-2-1) But de l'essai	70
IV-4-2-2) Le déroulement de l'essai	70
IV-4-2-3) Les différentes images obtenus au cours de l'essai	71
) Interprétation des résultats.....	78
IV-4-2-4) Les résultats obtenus	78
) Interprétation des résultats	79
IV-4-3) Essai aux canicules (pour les marnes de Boghni, DEM, Les Chabane).....	79
IV-4-3-1) Principe d'essai	79
IV-4-3-2) Déroulement d'essai.....	79
IV-4-3-3) Les images retenues des échantillons	80
) Interprétation des résultats	82
IV-4-3-4) Les résultats obtenus	83
) Interprétation des résultats.....	83
IV-5) Conclusion	83
Chapitre V : Résultats de calcul de la dimension fractale par la méthode Box Counting (2D)	
V-1) Introduction	85
V-2) Application de la méthode de Box Counting.....	85
V-3) Résultats et interprétations	86
V-3-1) Essai de Gel-Dégel	86
V-3-2) Essai de Dégradabilité	89
V-3-3) Essai aux canicules	92
V-3-4) Interprétation des résultats.....	93
V-4) Conclusion	93
Chapitre VI : Calcul de la dimension fractale par la méthode tridimensionnelle (3D)	
VI-1) Introduction	94
VI-2) Présentation des résultats.....	94
VI-2-1) Essai de Gel-Dégel	94

VI-2-2) Essai de dégradabilité	101
VI-2-3) Essai aux canicules	106
VI-3) Interprétation des résultats	108
VI-4) Conclusion	109
Chapitre VII : Analyse statistique des résultats	
VII-1) Introduction	110
VII-2) Régression linéaire	110
) Interprétation des résultats	114
VII-3) Analyse en Composante Principale	114
) Interprétation des résultats	116
VII-4) Conclusion.....	116
CONCLUSION GENERALE	117
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

REMERCIEMENTS

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

Il est bien agréable d'adresser mes sincères remerciements en premier lieu à ma promotrice **Mme BOUZEBODJA Aldjia**. Maitre de conférences –B à l'UMMTO. Pour ses encouragements, orientations, sa patience et aussi essentiellement pour son travail qui est très bien fini, qui m'a permis de réaliser aujourd'hui ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent aussi à **Mr MELBOUCI Bachir** Professeur à l'UMMTO pour son sens d'engagement et sa disponibilité au sein de l'université durant toute l'année et pour avoir accepté de présider ce jury.

Mes sincères remerciements vont vers le membre du jury **Mme BAIDI Fawzia**. Maitre assistante-A à l'UMMTO, pour avoir bien voulu examiner ce travail.

Je remercie aussi toute ma famille et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.

DEDICACES

Dieu Merci

Je dédie ce modeste travail

*A la personne la plus chère dans ma vie, son soutien et sa
patience face aux moments difficiles traversés au cours de ma
vie : Mon Père, que Dieu le protège*

A mes Frères :-Abdelrazzek et sa femme et son fils

-Faycel

-Juba

A ma Sœur Ouahiba

A ma Tante, et mon oncle Ahmed et sa femme et ses filles

A ma précieuse amie Rachida

Et à la promotion Géotechnique

Et à toute la famille et mes proches

LISTE DES SYMBOLES

Notation	Définition
W	Teneur en eau (%).
W_L	Limite de liquidité (%).
W_P	Limite de plasticité (%).
I_P	Indice de plasticité (%).
I_C	Indice de consistance (%).
A_C	Activité de Skempton
s	La masse volumique des particules solides (g/cm ³).
VBS	La valeur de bleu de sol
DFR	Dimension fractale de rugosité
DF	Dimension fractale
ACP	Analyse en Composante Principale
R	Coefficient de corrélation
p-value	La probabilité pour un modèle statistique donnée sous l'hypothèse nulle

LISTE DES FIGURES

Chapitre I :

Figure I.1. Carte simplifiée des climats mondiaux.....	3
Figure I.2. Vue d'un réchauffement de la planète : une représentation du changement de température par région, 1976-2000.	5
Figure I.3. Graphique des anomalies des températures globales moyennes de surface.	6
Figure I.4. Irradiation Solaire selon l'analyse des mesures satellitaires.....	8
Figure I.5. Processus de l'effet de serre	9
Figure I.6. Emissions mondiales de gaz à effet de serre de sources anthropogéniques 1970 à 2004	11
Figure I.7. Les principaux domaines bioclimatiques de l'Algérie	12
Figure I.8. Willaya de Tizi-Ouzou.	13
Figure I.9. Température annuel de Tizi-Ouzou année 2018.....	14
Figure I.10. Précipitations en 2018 à Tizi-Ouzou	14
Figure I.11. Température annuel de Tizi-Ouzou année 2019	14
Figure I.12. Précipitations en 2019 à Tizi-Ouzou	15
Figure I.13. Température annuel de Tizi-Ouzou année 2020.....	15
Figure I.14. Précipitations en 2020 à Tizi-Ouzou	15
Figure I.15. Quelques conséquences du changement climatique.	16

Chapitre II :

Figure II.1. Schéma de la structure de la kaolinite.....	20
Figure II.2. Photographie d'une kaolinite prise au microscope électronique à balayage.....	21
Figure II.3. Vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite.....	21
Figure II.4. Photographie d'une montmorillonite prise au microscope électronique à balayage	22
Figure II.5. Structure d'illite	22
Figure II.6. Les différents types de marne.	24
Figure II.7. L'altération de la marne	27
Figure II.8. Echanges thermiques et profil vertical des températures	28
Figure II.9. Les cristaux de glace.	29

Figure II.10. Le gel dans les deux types de sols.....	31
Figure II.11. Exemple de phénomène de gel sur le sol.	31
Figure II.12. Gonflement d'une chaussée.	32
Figure II.13. Schéma simplifié de deux sources de désordre sur une maison construite dans fondations suffisantes sur un sol argileux	32
Figure II.14. L'état de l'eau dans les grains de sol.	33
Figure II.15. Dessiccation d'un sol.	35
Figure II.16. Humectation.	35

Chapitre III :

Figure III.1. Montagne fractale et quelques objets fractals.....	37
Figure III.2. Illustration du rapport entre dimensions fractale et euclidienne.....	38
Figure III.3. Le triangle de Sierpinsky	39
Figure III.4. Tapis de Sierpinsky.	39
Figure III.5. L' Eponge de Menger-Sierpinsky	40
Figure III.6. Deux représentations, une en plan large et un zoom sur un détail	41
Figure III.7. La texture lumineuse de modèle de sorbet de la version quadratique du Mandelbulb.....	41
Figure III.8. Ensemble de Julia, création en spirale.....	42
Figure III.9. La dimension fractale D pour les courbes de Von Koch	43
Figure III.10. Exemple d'une image binaire obtenue après l'analyse d'image d'un grain de sable.....	43
Figure III.11. Différentes étapes de maillage de l'image du grain et illustration de la méthode	45
Figure III.12. Application de la méthode de Comptage des Boîtes, calcul de la dimension fractale de rugosité du contour du grain	46
Figure III.13. Différentes étapes de maillage de l'image du grain avec prise en compte de la surface intérieure du grain	46
Figure III.14. Technique de Comptage Différentiel de Boîtes (CDB).....	48
Figure III.15. Deux pixels appartenant à deux cubes différents d'altitude 3 alors que leur distance suivant (oz) est inférieure à 3	49
Figure III.16. Nombre N_s de cubes qui couvre l'image.....	51

Chapitre IV :

Figure IV.1. Présentation de la plasticité des sols étudiés dans l'abaque de Casagrande	56
Figure IV.2. Diffractogramme aux rayons X de la marne 4.....	58
Figure IV.3. Diffractogramme aux rayons X de la Marne 5.	58
Figure IV.4. Marne de Boghni à l'état naturel.	59
Figure IV.5. Echantillon 1 après l'étuve.	60
Figure IV.6. Echantillon 2 après l'étuve.	60
Figure IV.7. Echantillon témoin après 5 cycles de Gel-Dégel.	60
Figure IV.8. Echantillon 1-2 après 5 cycles de Gel-Dégel.....	60
Figure IV.9. Echantillon témoin après 10 cycles de Gel-Dégel.	60
Figure IV.10. Echantillon 1 après 10 cycles de Gel-Dégel.	61
Figure IV.11. Echantillon 2 après 10 cycles de Gel-Dégel.	61
Figure IV.12. Echantillon témoin à 48h après l'essai.	61
Figure IV.13. Echantillon 1 à 48h après l'essai.....	61
Figure IV.14. Echantillon 2 à 48h après l'essai.....	61
Figure IV.15. Marne DEM à l'état naturel	62
Figure IV.16. Echantillon 1 après l'étuve	62
Figure IV.17. Echantillon 2 après l'étuve	62
Figure IV.18. Echantillon témoin après 5 cycles de Gel-Dégel.....	62
Figure IV.19. Echantillon 1-2 après 5 cycles de Gel-Dégel.....	62
Figure IV.20. Echantillon témoin après 10 cycles de Gel-Dégel.	63
Figure IV.21. Echantillon 1 après 10 cycles de Gel-Dégel.	63
Figure IV.22. Echantillon 2 après 10 cycles de Gel-Dégel	63
Figure IV.23. Echantillon témoin à 48h après l'essai	63
Figure IV.24. Echantillon 1 à 48h après l'essai.....	63
Figure IV.25. Echantillon 2 à 48h après l'essai.....	64
Figure IV.26. Marne Les Chabane à l'état naturel.	64
Figure IV.27. Echantillon 1 après l'étuve	64
Figure IV.28. Echantillon 2 après l'étuve.	64
Figure IV.29. Echantillon témoin après 5 cycles de Gel-Dégel.	64
Figure IV.30. Echantillon 1-2 après 5 cycles de Gel-Dégel.....	65
Figure IV.31. Echantillon témoin après 10 cycles de Gel-Dégel.	65
Figure IV.32. Echantillon 1 après 10 cycles de Gel-Dégel.	65

Figure IV.33. Echantillon 2 après 10 cycles de Gel-Dégel.....	65
Figure IV.34. Echantillon témoin à 48h après l'essai.	65
Figure IV.35. Echantillon 1 à 48h après l'essai.....	66
Figure IV.36. Echantillon 2 à 48h après l'essai.....	66
Figure IV.37. Echantillon 1 avant l'étuvage.	66
Figure IV.38. Echantillon 2 avant l'étuvage.	66
Figure IV.39. Echantillon 1 après l'étuvage.....	66
Figure IV.40. Echantillon 2 après l'étuvage.....	67
Figure IV.41. Echantillons 1 et 2 après 5 cycles de gel/dégel.....	67
Figure IV.42. Echantillon 1 à la fin de l'essai gel/dégel	67
Figure IV.43. Echantillon 2 à la fin de l'essai gel/dégel.	67
Figure IV.44. Echantillon 1 après l'étuve.	68
Figure IV.45. Echantillon 2 après l'étuve.	68
Figure IV.46. Echantillons 1 et 2 après 5 cycles de gel/dégel.....	68
Figure IV.47. Echantillon 1 à la fin de l'essai gel/dégel.	68
Figure IV.48. Echantillon 2 à la fin de l'essai gel/dégel.	68
Figure IV.49. Variation de la masse de tous les échantillons au cours d'essai Gel-Dégel	69
Figure IV.50. Mouillage des échantillons à l'aide d'une seringue.....	70
Figure IV.51. Marne de Boghni à l'état naturel	71
Figure IV.52. Marne de Boghni après le 1 ^{er} cycle.....	71
Figure IV.53. Marne de Boghni après le 2 ^{eme} cycle.....	71
Figure IV.54. Marne de Boghni après le 3 ^{eme} cycle.....	71
Figure IV.55. Marne de Boghni après le 4 ^{eme} cycle	71
Figure IV.56. Marne de DEM à l'état naturel	72
Figure IV.57. Marne de DEM après le 1er cycle.	72
Figure IV.58. Marne de DEM après le 2 ^{eme} cycle.....	72
Figure IV.59. Marne de DEM après le 3 ^{eme} cycle.	72
Figure IV.60. Marne de DEM après le 4 ^{eme} cycle.....	72
Figure IV.61. Marne Les Chabane à l'état naturel.	73
Figure IV.62. Marne Les Chabanes après le 1 ^{er} cycle.....	73
Figure IV.63. Marne Les Chabane après le 2 ^{eme} cycle.....	73
Figure IV.64. Marne Les Chabane après le 3eme cycle.....	73
Figure IV.65. Marne Les Chabane après le 4 ^{eme} cycle.....	73
Figure IV.66. Echantillon 1 marne l'OPGI avant essai.....	74

Figure IV.67. Echantillon 2 marne de l'OPGI avant essai.....	74
Figure IV.68. Echantillon 1 marne de l'OPGI après le 1 ^{er} cycle.....	74
Figure IV.69. Echantillon 2 marne de l'OPGI après le 1 ^{er} cycle.....	74
Figure IV.70. Echantillon 1 marne de l'OPGI après le 2 ^{eme} cycle.....	74
Figure IV.71. Echantillon 2 marne de l'OPGI après le 2 ^{eme} cycle.....	75
Figure IV.72. Echantillon 1 marne de l'OPGI après le 3 ^{eme} cycle.....	75
Figure IV.73. Echantillon 2 marne de l'OPGI après le 3 ^{eme} cycle.....	75
Figure IV.74. Echantillon 1 marne de l'OPGI après le 4 ^{eme} cycle.....	75
Figure IV.75. Echantillon 2 marne de l'OPGI après le 4 ^{eme} cycle.....	75
Figure IV.76. Echantillon 1 marne de CHU avant essai.....	76
Figure IV.77. Echantillon 2 marne de CHU avant essai.....	76
Figure IV.78. Echantillon 1 marne de CHU après le 1 ^{er} cycle.....	76
Figure IV.79. Echantillon 2 marne de CHU après le 1 ^{er} cycle.....	76
Figure IV.80. Echantillon 1 marne de CHU après le 2 ^{eme} cycle.....	76
Figure IV.81. Echantillon 2 marne de CHU après le 2 ^{eme} cycle.....	77
Figure IV.82. Echantillon 1 marne de CHU après le 3 ^{eme} cycle.....	77
Figure IV.83. Echantillon 2 marne de CHU après le 3 ^{eme} cycle.....	77
Figure IV.84. Echantillon 1 marne de CHU après le 4 ^{eme} cycle.....	77
Figure IV.85. Echantillon 2 marne de CHU après le 4 ^{eme} cycle.....	77
Figure IV.86. Variation des masses des échantillons au cours de l'essai de Dégradabilité.....	78
Figure IV.87. Site Boghni à l'état naturel.....	80
Figure IV.88. Echantillon 1 après l'étuve.....	80
Figure IV.89. Echantillon 2 après l'étuve.....	80
Figure IV.90. Echantillon 1 à la fin de l'essai.....	80
Figure IV.91. Echantillon 2 à la fin de l'essai.....	80
Figure IV.92. Site DEM à l'état naturel.....	81
Figure IV.93. Echantillon 1 après l'étuve.....	81
Figure IV.94. Echantillon 1 à la fin de l'essai.....	81
Figure IV.95. Site Les Chabane à l'état naturel.....	81
Figure IV.96. Echantillon 1 après l'étuve.....	81
Figure IV.97. Echantillon 2 après l'étuve.....	82
Figure IV.98. Echantillon 1 à la fin de l'essai.....	82
Figure IV.99. Echantillon 2 à la fin de l'essai.....	82

Figure IV.100. Variation de la masse des échantillons de (Boghni, DEM, Les Chabane) au cours d'essai aux canicules.	83
---	----

Chapitre V :

Figure V.1. Les étapes de calcul de la dimension fractale par le logiciel MATLAB.....	86
Figure V.2. Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon témoin.....	86
Figure V.3. Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour les échantillons 1 et 2.	87
Figure V.4. Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon témoin.....	87
Figure V.5. Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour les échantillons 1 et 2.	87
Figure V.6. Variation de la dimension fractale de l'échantillon témoin.	88
Figure V.7. Variation de la dimension fractale des échantillons 1 et 2.	88
Figure V.8. Variation de la dimension fractale des échantillons 1 et 2.	88
Figure V.9. Variation de la dimension fractale des échantillons 1 et 2.	89
Figure V.10. Variation de la dimension fractale horizontale de la marne de Boghni.	89
Figure V.11. Variation de la dimension fractale verticale de la marne de Boghni.....	90
Figure V.12. Variation de la dimension fractale horizontale et verticale, respectivement, de la marne DEM.	90
Figure V.13. Variation de la dimension fractale horizontale et verticale, respectivement, de la marne Les Chabane.....	91
Figure V.14. Variation de la dimension fractale horizontale et verticale, respectivement, de la marne de l'OPGI.....	91
Figure V.15. Variation de la dimension fractale horizontale et verticale de la marne de CHU.....	91
Figure V.16. Variation de la dimension fractale des échantillons 1 et 2.	92
Figure V.17. Variation de la dimension fractale de l'échantillon 1.....	92
Figure V.18. Variation de la dimension fractale des échantillons 1 et 2.	93

Chapitre VI :

Figure VI.1. Variation de DF en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon témoin.	94
Figure VI.2. Variation de DF en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon 1.	95

Figure VI.3. Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon 2.	95
Figure VI.4. Variation de DF en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon témoin.	96
Figure VI.5. Variation de la DF en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon 1.	96
Figure VI.6. Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon 2.	97
Figure VI.7. Variation de DF en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon témoin.	97
Figure VI.8. Variation de DF en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon 1.	98
Figure VI.9. Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon 2.	98
Figure VI.10. Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon 1.	99
Figure VI.11. Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon 2.	99
Figure VI.12. Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon 1.	100
Figure VI.13. Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon 2.	100
Figure VI.14. Variation de la dimension fractale horizontale de la marne de Boghni.	101
Figure VI.15. Variation de la dimension fractale verticale de la marne de Boghni.	101
Figure VI.16. Variation de la dimension fractale horizontale de la marne de DEM.	102
Figure VI.17. Variation de la dimension fractale verticale de la marne de DEM.	102
Figure VI.18. Variation de la dimension fractale horizontale de la marne Les Chabane.	103
Figure VI.19. Variation de la dimension fractale verticale de la marne Les Chabane.	103
Figure VI.20. Variation de la dimension fractale horizontale de la marne l'OPGI.	104
Figure VI.21. Variation de la dimension fractale verticale de la marne l'OPGI.	104
Figure VI.22. Variation de la dimension fractale horizontale de la marne CHU.	105
Figure VI.23. Variation de la dimension fractale verticale de la marne CHU.	105
Figure VI.24. Variation de la dimension fractale de l'échantillon 1.	106
Figure VI.25. Variation de la dimension fractale de l'échantillon 2.	106
Figure VI.26. Variation de la dimension fractale de l'échantillon 1.	107
Figure VI.27. Variation de la dimension fractale de l'échantillon 1.	107
Figure VI.28. Variation de la dimension fractale de l'échantillon 2.	108

Chapitre VII :

Figure VII.1. Résultats de la régression linéaire	113
Figure VII.2. Graphe des résultats des trois variables DF2D, DF3D et la masse donné par l'ACP	115
Figure VII.3. Graphe des individus donné par l'ACP	115

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II :

Tableau II.1. Classification courante des roches selon la teneur en carbonate et en argile.	26
---	----

Chapitre IV :

Tableau IV.1. Les résultats des caractéristiques physiques (YAHMIL, 2018).....	55
---	----

Tableau IV.2. Résultats finales pour les caractéristiques chimiques	57
--	----

Tableau IV.3. Les masses de tous les échantillons durant l'essai de Gel-Dégel.	69
--	----

Tableau IV.4. Variation de la masse des échantillons au cours de l'essai de Dégradabilité.	78
--	----

Tableau IV.5. Variation de la masse des échantillons sous l'effet des canicules	83
--	----

Chapitre V :

Tableau V.1. Résultats de la dimension fractale verticale et horizontale de l'échantillon.....	86
---	----

Tableau V.2. Résultats de la dimension fractale horizontale de la marne de Boghni	89
--	----

Tableau V.3. Résultats de la dimension fractale verticale de la marne de Boghni	89
--	----

Tableau V.4. Résultats de la dimension fractale horizontale de la marne DEM.....	90
---	----

Tableau V.5. Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 1	92
---	----

Chapitre VI :

Tableau VI.1. Résultats de la dimension fractale horizontale et verticale de l'échantillon témoin.....	94
---	----

Tableau VI.2. Résultats de DF horizontale et verticale de l'échantillon 1	95
--	----

Tableau VI.3. Résultats de la dimension fractale horizontale et verticale de l'échantillon 2.	95
---	----

Tableau VI.4. Résultats de la dimension fractale horizontale et verticale de l'échantillon témoin.....	96
---	----

Tableau VI.5. Résultats de la dimension fractale horizontale et verticale de l'échantillon.	96
---	----

Tableau VI.6. Résultats de la dimension fractale horizontale et verticale de l'échantillon 2.....	97
--	----

Tableau VI.7. Résultats de la dimension fractale horizontale et verticale de l'échantillon témoin.....	97
---	----

Tableau VI.8. Résultats de la dimension fractale horizontale et verticale de l'échantillon 1.	98
Tableau VI.9. Résultats de la dimension fractale horizontale et verticale de l'échantillon 2.	98
Tableau VI.10. Résultats de la dimension fractale horizontale et verticale de l'échantillon 1.	99
Tableau VI.11. Résultats de la dimension fractale horizontale et verticale de l'échantillon 2.	99
Tableau VI.12. Résultats de la dimension fractale horizontale et verticale de l'échantillon 1.	100
Tableau VI.13. Résultats de la dimension fractale horizontale et verticale de l'échantillon 2.	100
Tableau VI.14. Résultats de la dimension fractale horizontale de la marne Boghni.	101
Tableau VI.15. Résultats de la dimension fractale verticale de la marne Boghni.	101
Tableau VI.16. Résultats de la dimension fractale horizontale de la marne DEM.	102
Tableau VI.17. Résultats de la dimension fractale verticale de la marne DEM.	102
Tableau VI.18. Résultats de la dimension fractale horizontale de la marne Les Chabane.	103
Tableau VI.19. Résultats de la dimension fractale verticale de la marne Les Chabane.	103
Tableau VI.20. Résultats de la dimension fractale horizontale de la marne l'OPGI.	104
Tableau VI.21. Résultats de la dimension fractale verticale de la marne l'OPGI.	104
Tableau VI.22. Résultats de la dimension fractale horizontale de la marne CHU.	105
Tableau VI.23. Résultats de la dimension fractale verticale de la marne CHU.	105
Tableau VI.24. Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 1.	106
Tableau VI.25. Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 2.	106
Tableau VI.26. Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 1.	107
Tableau VI.27. Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 1.	107
Tableau VI.28. Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 2.	108

Chapitre VII :

Tableau VII.1. Représentation de tous les résultats à utiliser dans l'analyse statistique.	113
--	-----

INTRODUCTION GENERALE

La problématique des changements climatiques a été considéré l'un des problèmes majeurs du développement à l'échelle locale et régionale voire même à l'échelle internationale, les problèmes liés aux changements climatiques occupent une importante place parmi les préoccupations majeures contemporaines. Le changement climatique est un phénomène qui fait largement parler de lui compte tenu des fluctuations qui touchent le climat terrestre, et leur conséquence sur tous les aspects de la vie humaine.

Ce phénomène influe directement sur le comportement des sols où il est un facteur important dans la plupart des problèmes géotechniques tels que le retrait-gonflement, le gel-dégel, la percolation, le tassement et le glissement, etc. Beaucoup de pays souffrent de changement du volume et de la texture des sols en particulier les sols fins dont ils contiennent des proportions notables d'argiles et de limons, qui influent sur ses propriétés géotechniques intrinsèques. Ils gonflent et deviennent plastiques en présence d'eau, se rétractent avec la sécheresse, et foisonnent sous l'effet du gel. Alors, ces sols sont considérés comme mauvais ou médiocres et ne présentent pas, par conséquent, les performances nécessaires pour supporter le trafic de chantier, la chaussée et le trafic futur.

Notre travail s'inscrit dans cette thématique et est une suite de l'étude de nos camarades YAHMIL et OUAKIF.T où ils ont présenté les résultats des essais d'identification des sols et des essais climatiques au laboratoire (gel-dégel ; dégradabilité ; canicule) ainsi que les résultats du calcul de la dimension fractale en 2D avec la méthode Box Counting, on se basant sur le calcul de la dimension fractale en 3D avec la méthode Différentiel Box Counting avec un programme implémenté par le logiciel MATLAB et on comparant les résultats avec une étude statistique avec logiciel R.

Pour mener à bien ce travail, nous l'avons scindé en deux parties :

➤ **La première partie** : est la partie bibliographique, comportant trois chapitres :

Le chapitre I : est consacré aux généralités sur les changements climatiques et leurs conséquences dans le monde.

Le chapitre II : présente des généralités sur l'influence des changements climatiques sur les sols fins.

Le chapitre III : est consacré à la définition des fractales et la dimension fractale et leurs méthodes de calculs en Génie Civil.

➤ **La deuxième partie** est la partie expérimentale subdivisée sur quatre chapitres :

Le chapitre IV : regroupe les résultats des essais d'identification des sols étudiés et les essais climatiques (Gel-Dégel, Dégradabilité et les canicules) réalisés au laboratoire.

Le chapitre V : porte sur la détermination de la dimension fractale en 2D calculée par la méthode de Box Counting avec le logiciel MATLAB, avant et après chaque essai. Ce qui nous a permis de faire une comparaison entre les résultats obtenus après les essais et ceux obtenus après le calcul de la dimension.

Le chapitre VI : englobe les résultats du calcul de la dimension fractale par la méthode tridimensionnelle (3D) de Comptage Différentiel de Boîtes (DBC) avec le logiciel MATLAB R2015a.

Le chapitre VII : présente la comparaison et la corrélation entre les résultats des deux méthodes 2D et 3D et d'autres paramètres avec une analyse statistique par le logiciel R.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and rounded corners on the right, framing the chapter title.

Chapitre I : **Changements climatiques**

I-1) Introduction

Au fil du temps, les changements climatiques sont devenus de plus en plus un sujet d'inquiétude pour l'humanité tout entière. La pression exercée sur la plupart des espaces de vie, engendre des dysfonctionnements des mécanismes environnementaux et sociologiques, et se matérialise par une dégradation perceptible à plusieurs échelles.

I-2) Notion de climat

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

Dans un sens plus large, le climat est la description statistique de l'état du système climatique (DUMAS.P et al, 2005).

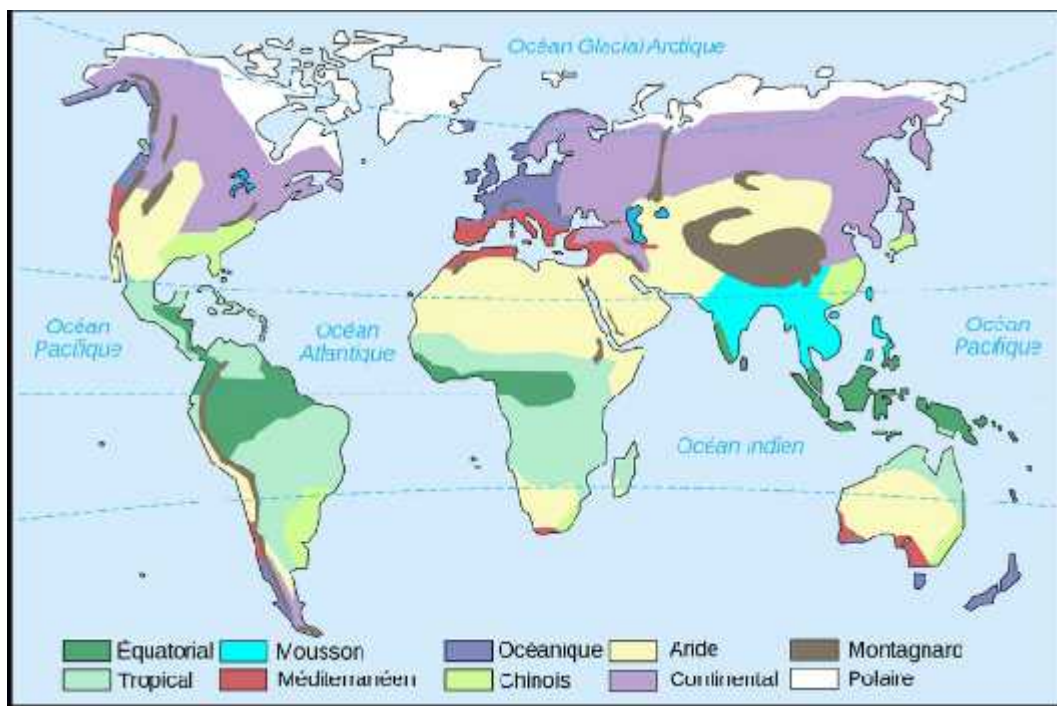


Figure I.1. Carte simplifiée des climats mondiaux (RHISSA.A, 2018).

I-3) Changements climatiques dans le monde

Les changements climatiques sont des changements importants dans les phénomènes climatiques : plus de canicules, ou inversement plus de précipitations, fréquence de tempêtes ou des ouragans plus élevée, etc. Il s'agit d'étudier et d'anticiper les variations de température pour l'ensemble du globe et sur des temps longs (étude du climat à grande

échelle) et non la variabilité des températures à l'échelle de quelques jours ou sur une saison.

On notera que la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) dans son article 1, définit «changements climatiques» comme étant des« changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours des périodes comparables. ».

La CCNUCC fait ainsi une distinction entre les« changements climatiques» qui peuvent être attribués aux activités humaines altérant la composition de l'atmosphère, et la« variabilité climatique» due à des causes naturelles.

Le changement climatique touche toutes les régions du monde .Les calottes polaires fondent et le niveau des océans est en hausse (FARAH.A, 2014).

Dans certaines régions les phénomènes météorologiques extrêmes et les précipitations sont de plus en plus fréquents, tandis que d'autres sont confrontées à des vagues de chaleur et des sécheresses de plus en plus extrêmes (FARAH.A, 2014).

I-4) Différents indices de changement climatique

Le changement climatique des dernières décennies se caractérise, avec un degré estimé de fiabilité supérieur à 90 %, par :

- une augmentation des températures de l'air affectant les huit premiers kilomètres de la basse atmosphère ;
- une diminution de la fréquence des froids extrêmes et une augmentation des vagues de chaleur ;
- une influence directe de la diminution de la couche d'ozone de la stratosphère;
- une amplification du phénomène El Niño, responsable d'un renforcement des pluies et des sécheresses dans diverses régions des tropiques ;
- une réduction de l'extension de la couverture neigeuse et de la durée de gel des lacs et des rivières ;
- le recul des glaciers de montagne ;
- une réduction de l'étendue de la glace de mer (banquise) au printemps et en été dans l'hémisphère Nord. Cette diminution est estimée à 40 % de son épaisseur ;
- une élévation du niveau de la mer de 10 à 20 cm au cours du XXI^e siècle ;
- une augmentation des précipitations pendant tout le vingtième siècle dans les hautes et moyennes latitudes de l'hémisphère nord. Les précipitations semblent inchangées sur les

continents de l'hémisphère sud. Les données en domaine océanique sont insuffisantes pour établir un bilan ;

- un accroissement de la proportion et de la fréquence des cyclones tropicaux de niveau 4 et 5 (les plus élevés de l'échelle de Saffir-Simpson) observé dans le golfe du Mexique et aux Etats-Unis (GRACES, 2006).

I-4-1) Les températures

La température est un paramètre clé dans l'étude et la caractérisation des climats vue son rôle prédominant dans le rayonnement et le bilan énergétique d'où son importance capitale dans les études qui touchent de près ou de loin le domaine du changement climatique.

La température représente donc un facteur limitant vue son implication dans le contrôle de l'ensemble des phénomènes métaboliques et par ce fait le conditionnement total de la répartition de tous les êtres vivants (RAMADE.F, 1984).

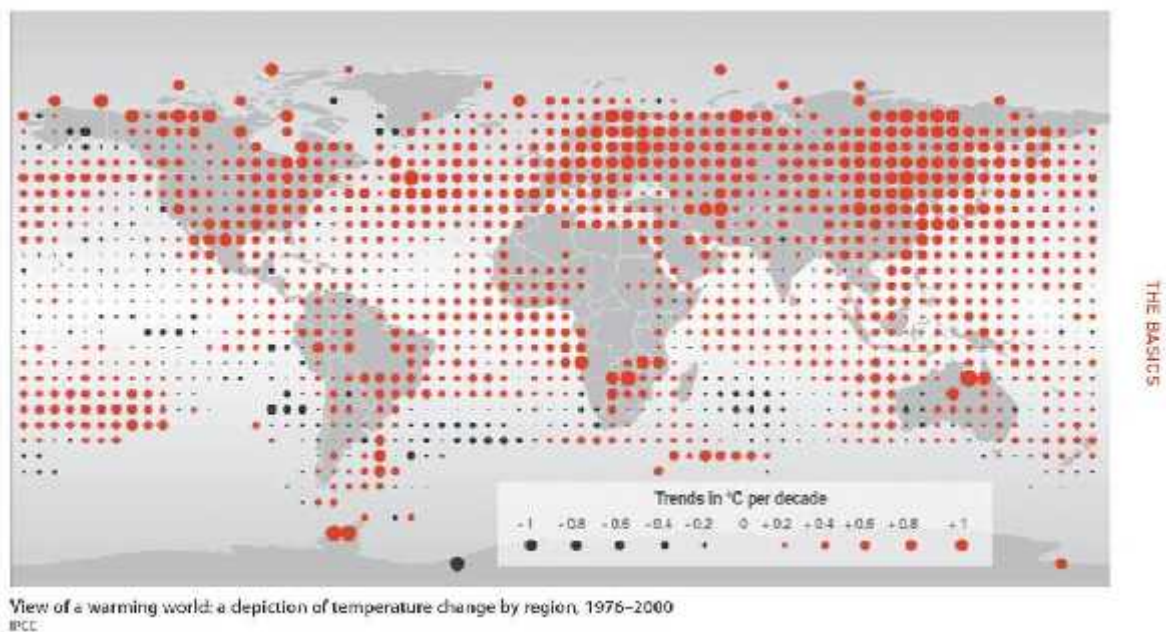


Figure I.2. Vue d'un réchauffement de la planète : une représentation du changement de température par région, 1976-2000 (HENSON.R, 2008).

I-4-2) Les canicules (vagues de chaleur)

Une canicule c'est un épisode de températures élevées pendant plusieurs jours consécutifs, de jour comme de nuit sur une période prolongée dans une zone relativement étendue. Elle survient avec un réchauffement très important de l'air, ou avec une invasion d'air très chaud qui provoque notamment une baisse significative de l'amplitude thermique entre le

jour et la nuit, la chaleur s'accumulant plus vite qu'elle ne s'évacue par convection ou rayonnement.

En standard, une vague de chaleur est qualifiée de canicule si elle est égale ou dépasse certains seuils en intensité et en durée. Elle peut être accompagnée d'un niveau d'humidité élevé, ce qui accroît la sensation de chaleur. Elle favorise aussi la pollution de l'air en augmentant le taux de particules en suspension, le risque d'incendie de forêt et la présence d'ozone troposphérique et d'oxydes d'azote, sources de pollution photochimique. Cette pollution peut être exacerbée en ville à cause des îlots de chaleur urbains (GREUILLET.C, GALSOMIES.L, 2013).

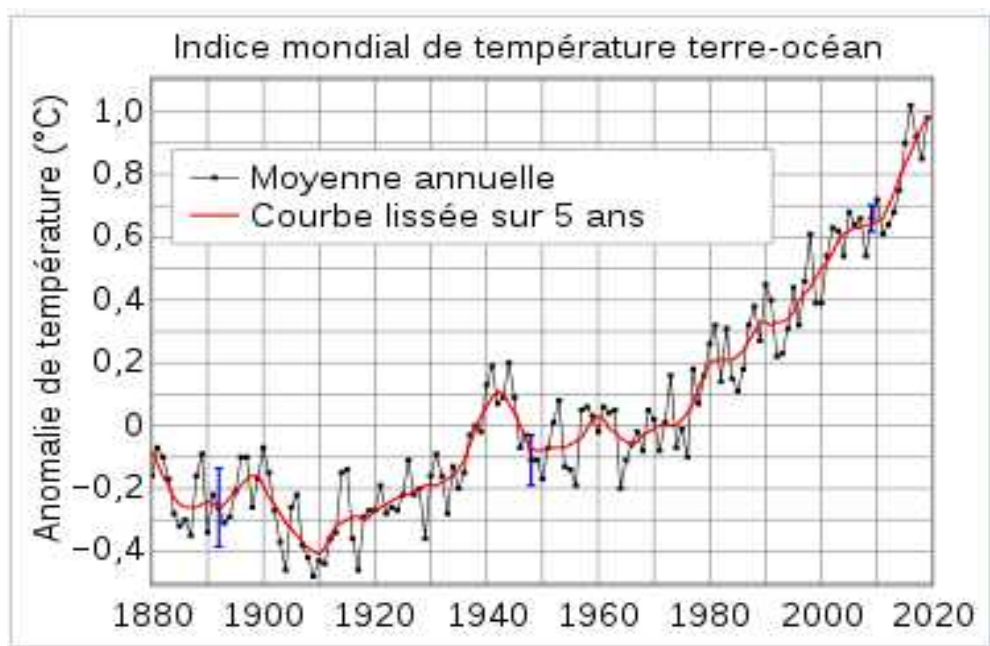


Figure I.3. Graphique des anomalies des températures globales moyennes de surface (LENSSEN.N.al, 2019).

I-4-3) Les précipitations

Les précipitations sont des apports d'eau parvenant au sol sous formes liquides (pluie ou rosée) ou solides (neige ou grêle) en provenance directe ou indirecte de la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique. Les précipitations sont mesurées à la surface de la terre en millimètres.

Le terme lame d'eau tombée est également employé pour quantifier les précipitations.

I-4-4) L'humidité

Le paramètre humidité désigne en météorologie la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air. La vapeur d'eau est l'une des formes que l'eau peut prendre sur terre. Les autres sont la forme liquide (océans, lacs, pluie...) et la forme solide (glaciers, banquise, neige...).

L'humidité relative de l'air, ou degré hygrométrique, correspond au rapport de la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air sur la pression de vapeur saturante (ou tension de vapeur) à la même température. Elle est donc une mesure du rapport entre le contenu en vapeur d'eau de l'air et sa capacité maximale à en contenir dans ces conditions. Ce rapport changera si on change la température ou la pression bien que l'humidité absolue de l'air n'ait pas changé. Elle est mesurée à l'aide d'un hygromètre.

En météorologie, on quantifie l'humidité de l'air de deux manières : l'humidité absolue et l'humidité relative (https://fr.wikipedia.org/wiki/Humidit%C3%A9_relative).

I-5) Causes des changements climatiques

Trois facteurs influencent directement l'équilibre énergétique de notre planète :

-) Le rayonnement solaire total, qui dépend de la distance du soleil et de l'activité solaire.
-) L'albédo, ou le reflet des rayons du soleil renvoyés depuis la terre vers l'espace.
-) La composition chimique de l'atmosphère (gaz à effet de serre).

I-5-1) Le rayonnement solaire

Il est évident que le rayonnement solaire reçu par la terre est déterminant pour la température à la surface de la planète. Avant que l'homme ne rejette massivement dans l'atmosphère les réserves de carbone accumulées dans les gisements de pétrole ou de charbon, ce sont surtout les fluctuations du rayonnement solaire qui influençaient la température à la surface de la terre.

Ces fluctuations se sont traduites par des variations de la température à la surface de la terre. Le graphique (Figure I.4) montre la variation de « radiation solaire » de 1978 à 2008 ; Elle est d'un peu moins de 2 W/m^2 pour une radiation moyenne de 1366 W/m^2 , ceci se traduit par une variation du rayonnement reçu par unité de surface de la Terre de l'ordre de $0,3 \text{ W/m}^2$ (appelé « solar forcing » sur le graphique ou forçage solaire en français).

On est actuellement dans une situation où le rayonnement solaire par unité de surface terrestre est de $0,15 \text{ W/m}^2$ inférieur au rayonnement moyen (FARAH.A, 2014).

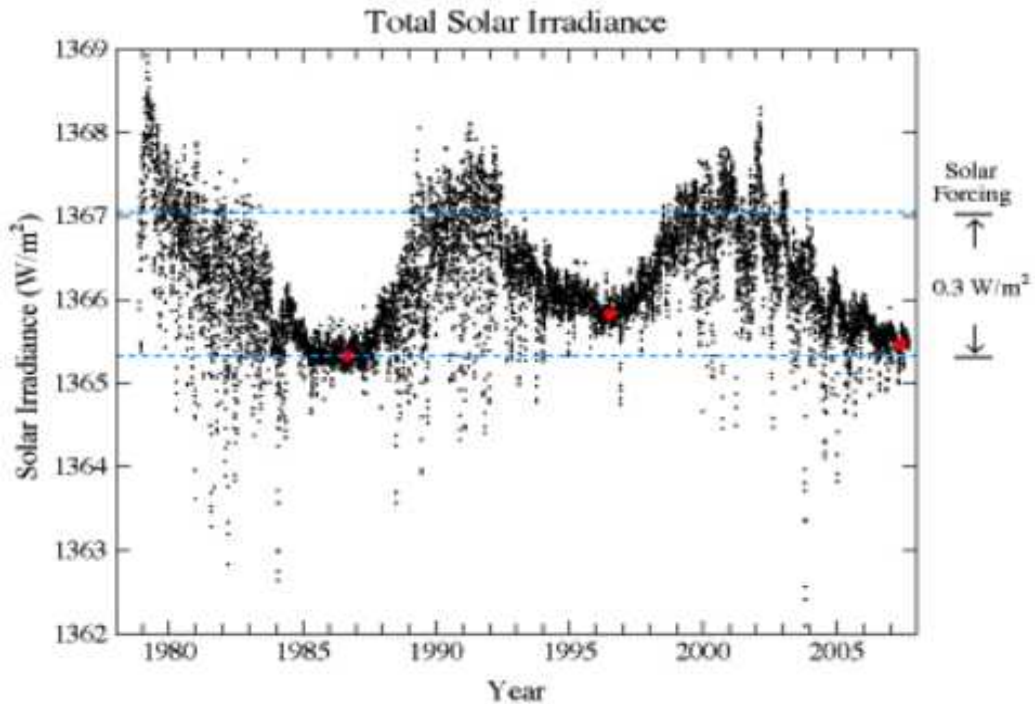


Figure I.4. Irradiation Solaire selon l'analyse des mesures satellitaires (WILLSON, R C et al, 2003).

I-5-2) Les aérosols

Ensemble de particules solides et liquides en suspension dans l'air, généralement d'une taille comprise entre $0,01 \mu\text{m}$ et $10 \mu\text{m}$ et séjournant au moins plusieurs heures dans l'atmosphère. Les aérosols peuvent être d'origine naturelle ou anthropique. Ils peuvent influencer sur le climat de deux façons :

- directement, en agissant et en absorbant le rayonnement ;
- indirectement, en agissant comme noyaux de condensation pour la formation de nuages ou la modification des propriétés optiques et de la durée de vie des nuages (DUMAS P et al, 2005).

I-5-3) L'effet de serre

❖ Définition

Les gaz à effet de serre absorbent efficacement le rayonnement infrarouge thermique émis par la surface de la terre, par l'atmosphère elle-même en raison de la présence de ces gaz et par les nuages. Le rayonnement atmosphérique est émis dans toutes les directions, y compris vers la surface de la terre. Par conséquent, les gaz à effet de serre retiennent la

chaleur dans le système surface-troposphère: c'est ce qu'on appelle « l'effet de serre » (Figure I.5).

Dans la troposphère, le rayonnement infrarouge thermique est étroitement lié à la température de l'atmosphère à l'altitude à laquelle il est émis, cette température diminuant en général avec l'altitude. En fait, le rayonnement infrarouge émis vers l'espace provient d'une altitude où la température est en moyenne de -19°C , en équilibre avec le rayonnement solaire net incident, alors que la surface de la terre se maintient à une température beaucoup plus élevée, de $+14^{\circ}\text{C}$ en moyenne. Une augmentation de la concentration de gaz à effet de serre accroît l'opacité de l'atmosphère au rayonnement infrarouge et entraîne donc un rayonnement effectif vers l'espace depuis une altitude plus élevée et à une température plus basse. Il en résulte un forçage radiatif qui entraîne un renforcement de l'effet de serre; c'est ce qu'on appelle :

« L'effet de serre renforcé » (GIEC, 2008).

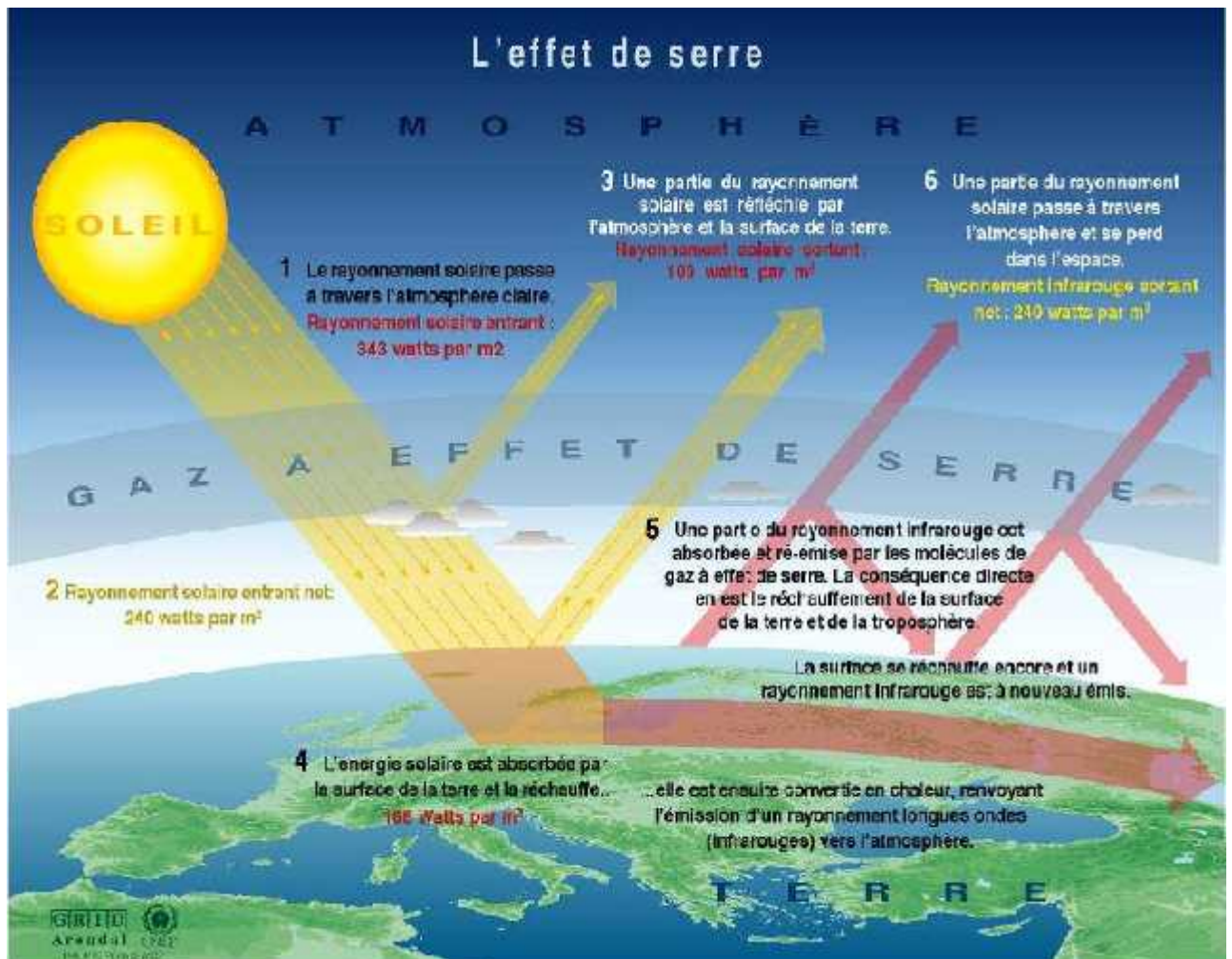


Figure I.5. Processus de l'effet de serre (DAMIEN.C, 2005).

❖ **Les principaux gaz à effet de serre**

Les principaux gaz à effet de serre (GES) naturellement présents dans l'atmosphère sont (Figure I.6) :

- J la vapeur d'eau (H_2O) et les gouttelettes d'eau des nuages, qui sont à l'origine de 72 % de l'effet de serre naturel. Le réchauffement climatique accentue l'évaporation de l'eau, ce qui assèche les terres, accroît l'effet de serre et le réchauffement des océans ;
- J le dioxyde de carbone (CO_2), qui est le principal gaz à effet de serre (en quantité), est à 97 % d'origine naturelle et à 3 % d'origine anthropique, mais ces 3 % représentent 66 % de l'effet de serre anthropique ;
- J le méthane (CH_4), qui est responsable de 17 % de l'effet de serre anthropique du fait de son potentiel de réchauffement global élevé égal à 34 fois celui du CO_2 à cent ans (en prenant en compte les rétroactions climatiques), mais qui persiste moins de dix ans dans l'atmosphère. Il est rejeté pour les trois quarts par les humains ;
- J le protoxyde d'azote (N_2O) ;
- J l'ozone troposphérique (O_3).

Les gaz à effet de serre industriels comprennent aussi des hydrocarbures halogénés comme :

- J les hydrochlorofluorocarbures, comme le HCFC-22 (un fréon) ;
- J les chlorofluorocarbures (CFC) ;
- J les hydrofluorocarbures (HFC) ;
- J le tétrafluorométhane (CF_4) ;
- J l'hexafluorure de soufre (SF_6) et le pentafluorure de soufre trifluorométhyle (CF_3-SF_5).

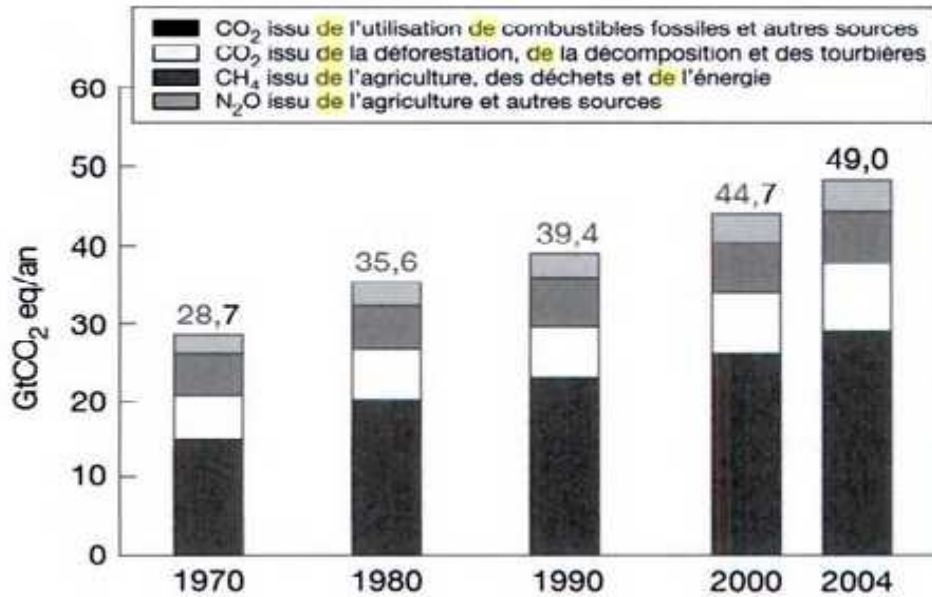


Figure I.6. Emissions mondiales de gaz à effet de serre de sources anthropogéniques 1970 à 2004 (GIEC,2007)

I-6) Changements climatiques dans l'Algérie

L'Algérie se situe sous un climat de transition, entre la zone tempérée et la zone tropicale, cette position la met sous l'influence directe du climat méditerranéen au Nord et du climat désertique au Sud.

En Algérie, pays dont la plus grande partie est désertique, les changements climatiques constituent une préoccupation majeure. En effet, de par sa position géographique, l'Algérie est exposée aux effets négatifs des changements climatiques et des émissions des gaz à effet de serre, notamment les inondations, la sécheresse et les températures élevées.

D'après des études réalisées par l'Office Nationale Météorologique (ONM) sur l'évolution des températures, elles ont révélé que celles-ci sont en hausse depuis 1990, date du début des émissions à effet de serre.

Concernant la pluviométrie en Algérie, l'étude fait ressortir un recul de 12% pour la période 1990-2005 en comparaison avec 1961-1990, causant une sécheresse à grande échelle au moment même où d'autres régions enregistrent des inondations dont celle de Bâb El Oued en 2001 et dans la ville d'El Taref en 2012. L'évolution des températures en Algérie montre une hausse sur l'ensemble du territoire au cours des saisons d'hiver et d'automne et une hausse nette des températures minimales et maximales dans toutes les

stations de l'Algérie du Nord et se prolonge jusqu'à nos jours. Durant ces 20 dernières années, les températures maximales ont augmenté plus que les minimales.

Quant aux précipitations, pour les mêmes périodes l'examen montre qu'en automne et en hiver, il y a diminution des pluies sur le Nord, et en printemps dans l'Est du pays (FARAH.A, 2014).

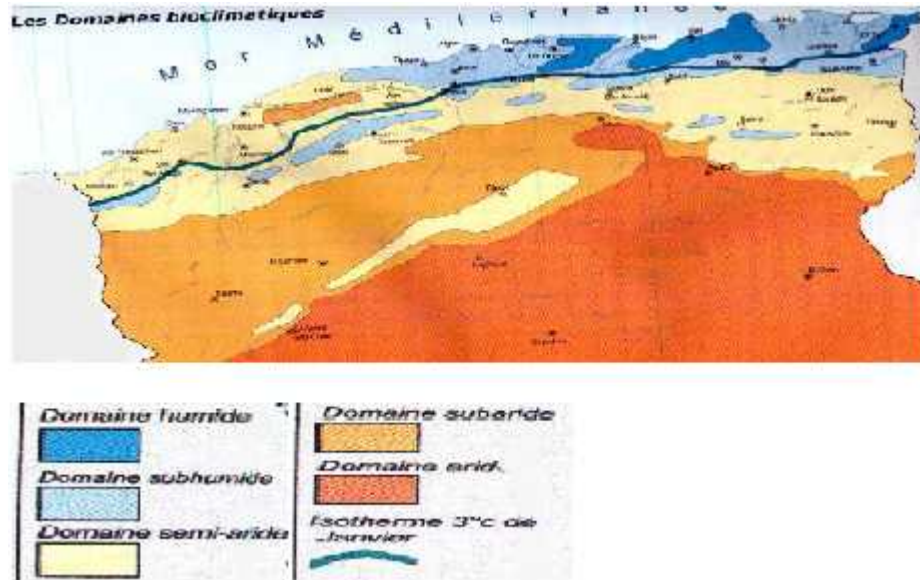


Figure I.7. Les principaux domaines bioclimatiques de l'Algérie (BEN, 2008).

I-7) Wilaya de Tizi-Ouzou

I-7-1) Situation géographique

La wilaya de Tizi-Ouzou présente un relief montagneux fortement accidenté qui s'étale sur une superficie de 2 994 km². elle comprend une chaîne côtière composée des Dairas de Tizirt , 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.8. Wilaya de Tizi-Ouzou.

I-7-2) Le climat de wilaya de Tizi-Ouzou

Tizi-Ouzou se situe dans la zone du climat méditerranéen. En raison des massifs montagneux qui entourent la ville, il neige chaque année en hiver entre décembre pour les hautes altitudes (600 m et +), et 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. A partir de novembre les températures sont de 5°C au minimum. Quelques hivers à Tizi-Ouzou sont marqués par des records de chaleur : en 2012, par exemple, les températures ont dépassé les 17 °C. La température la plus élevée jamais enregistrée à Tizi-Ouzou date de juillet 1901 avec 50°C et la température la plus basse date de février 1982 avec -11°C. La ville de Tizi-Ouzou bénéficie d'un climat tempéré chaud. A Tizi-Ouzou, les précipitations sont plus importantes en hiver qu'en été. Selon la classification de Koppen-Geiger, le climat est de type Csa. Tizi-Ouzou affiche une température annuelle moyenne de 17.9 °C. La moyenne des précipitations annuelles atteints 896 mm. Les variations des températures et des précipitations pour les années 2018,2019 et 2020 de Tizi-Ouzou sont présentées dans les figures ci-dessous :

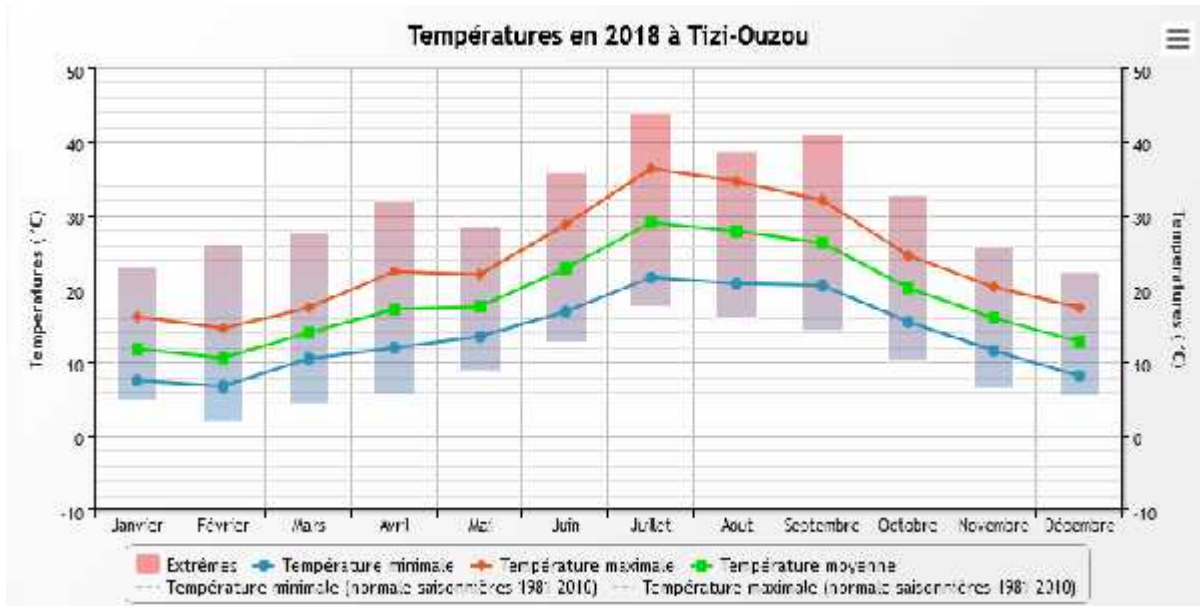


Figure I.9. Température annuelle de Tizi-Ouzou année 2018 (www.infoclimat.fr).

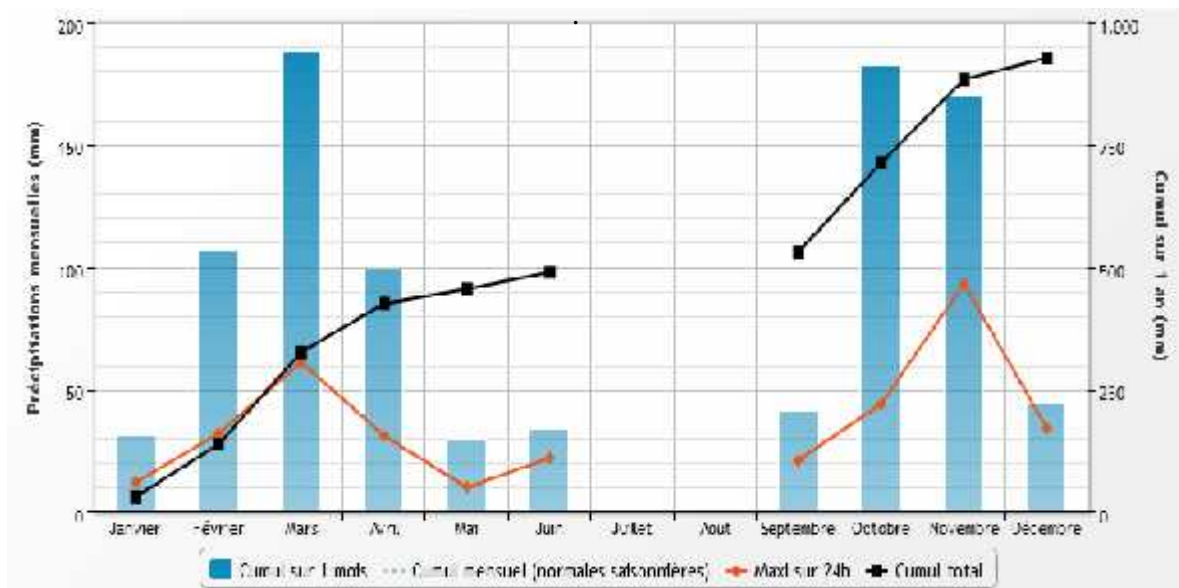


Figure I.10. Précipitations en 2018 à Tizi-Ouzou (www.infoclimat.fr).

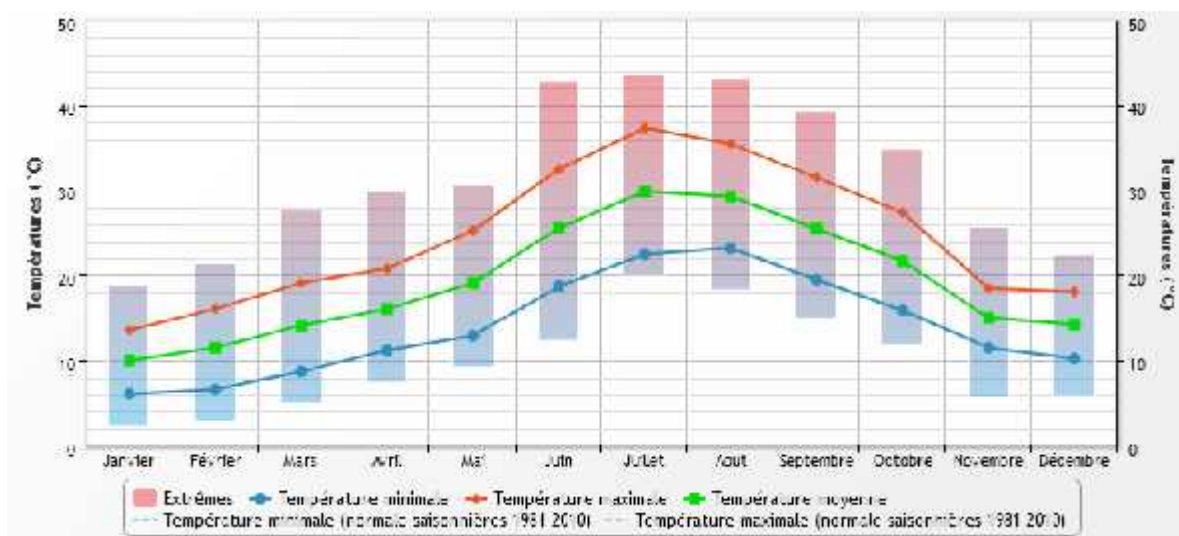


Figure I.11. Température annuelle de Tizi-Ouzou année 2019 (www.infoclimat.fr).

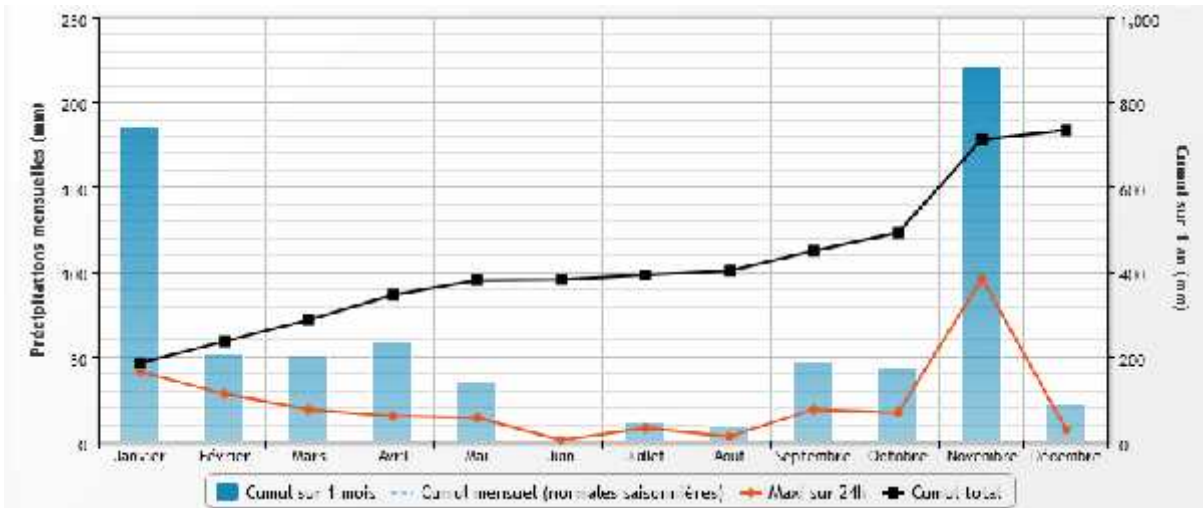


Figure I.12. Précipitations en 2019 à Tizi-Ouzou (www.infoclimat.fr).

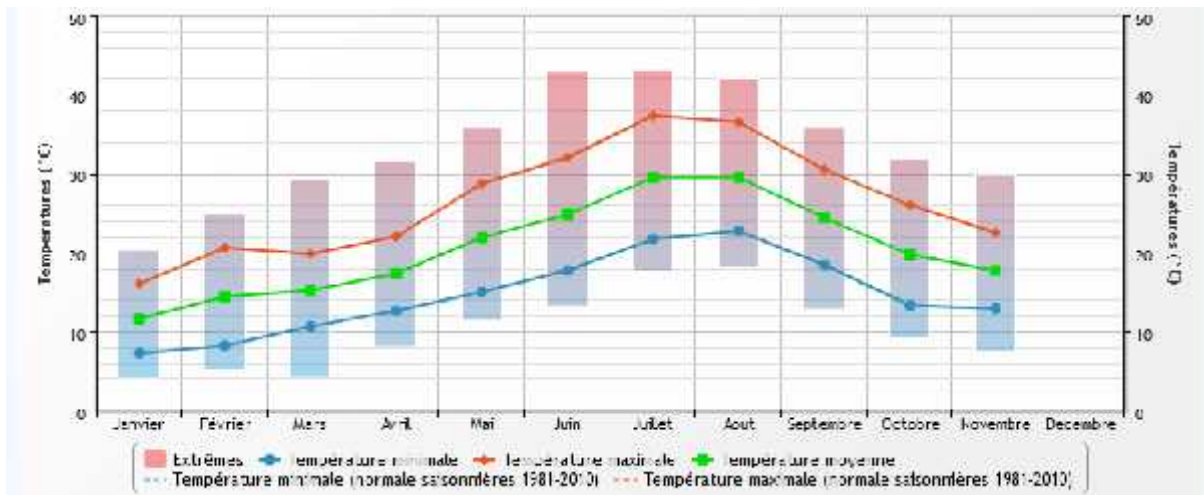


Figure I.13. Température annuelle de Tizi-Ouzou année 2020 (www.infoclimat.fr).

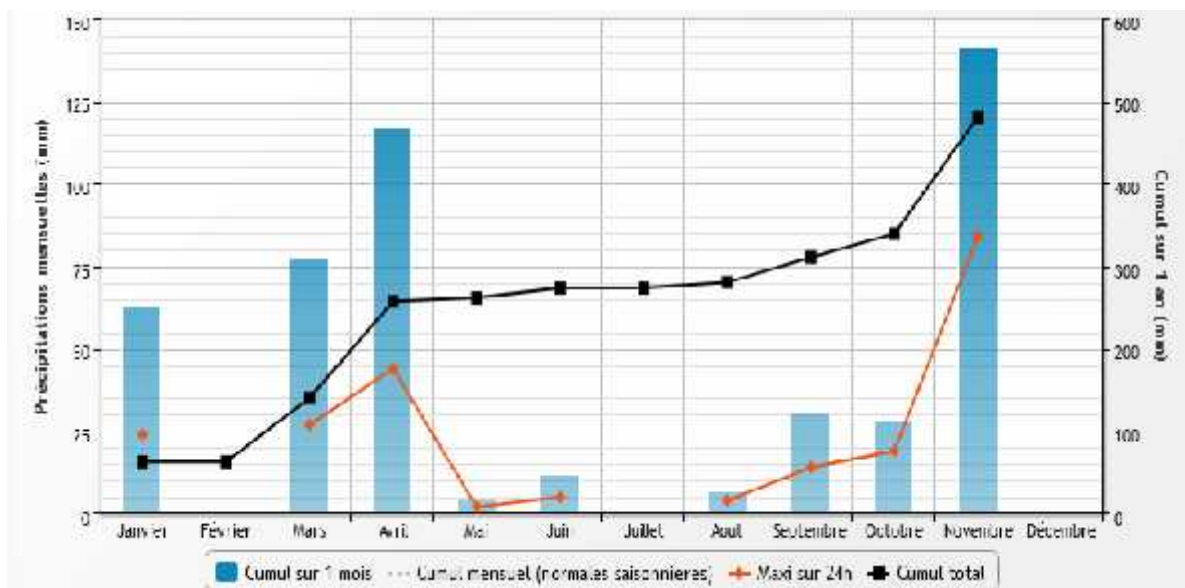


Figure I.14. Précipitations en 2020 à Tizi-Ouzou (www.infoclimat.fr).

I-8) Conséquences des changements climatiques en générale

Le changement climatique modifie l'équilibre thermique de la Terre et a de nombreuses conséquences sur l'homme et l'environnement.

Les conséquences directes du changement climatique provoqué par l'activité humaine sont les suivantes:

-) hausse des températures maximales
-) hausse des températures minimales
-) hausse du niveau de la mer
-) hausse de la température des océans
-) intensification des précipitations (fortes pluies et grêle)
-) recul et fonte des glaciers
-) dégel du permafrost.



Des fontes glaciers



Sécheresse



Inondations



Fortes grêles

Figure I.15. Quelques conséquences du changement climatique.

Les conséquences indirectes du changement climatique qui concernent directement la population et l'environnement sont les suivantes :

-) augmentation des crises alimentaires et de l'eau, notamment dans les pays en voie de développement

-) risques sanitaires en raison de la hausse des températures et des vagues de canicule
-) conséquences économiques pour l'élimination des conséquences climatiques
-) prolifération des nuisibles et des maladies
-) perte de la biodiversité en raison de la capacité et de la vitesse d'adaptation limitées de la faune et de la flore
-) acidification des océans due aux concentrations de HCO_3 élevées dans l'eau en raison de la hausse des concentrations de CO_2 (GRACES, 2006).

I-9) Conséquences des changements climatiques dans le domaine de génie civil

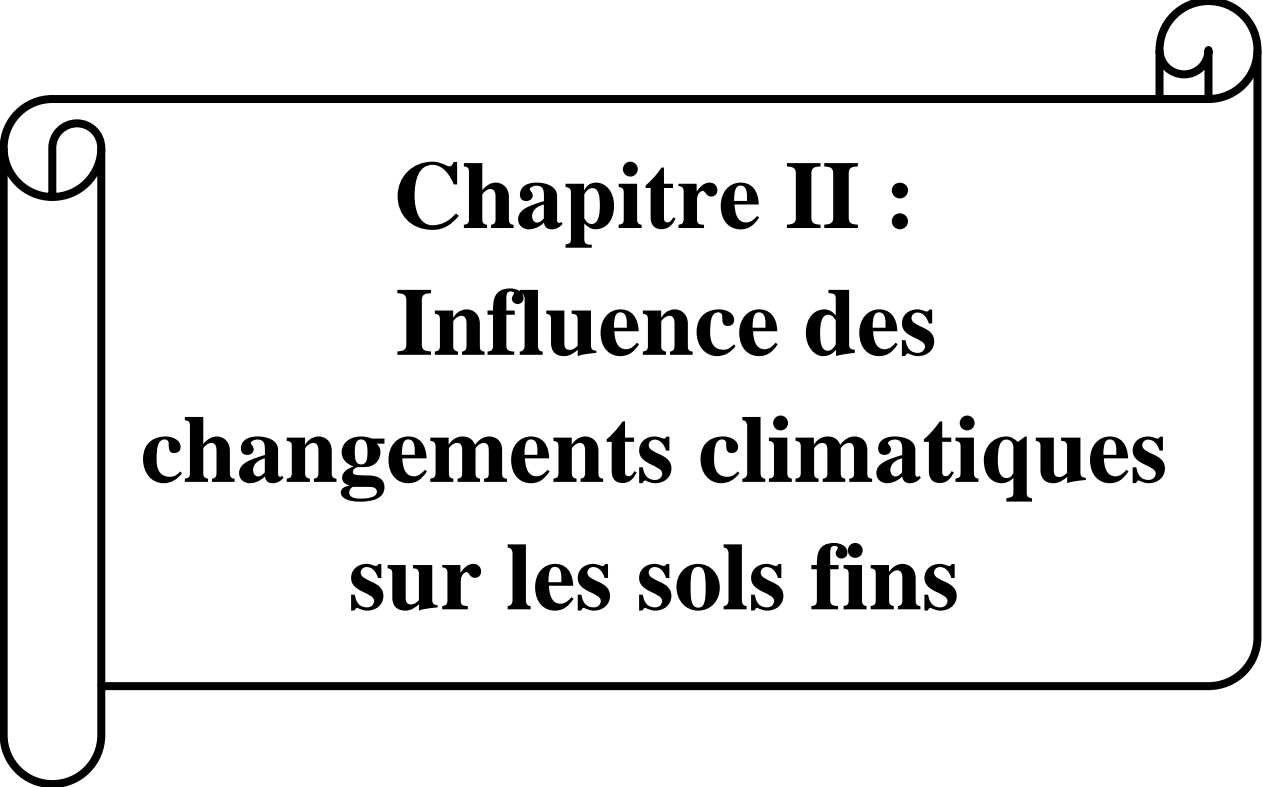
-) corrosion des armatures dans le béton.
-) exfoliation au niveau des tunnels.
-) augmentation des glissements de terrain.
-) sécheresse qui cause des fissurations ainsi des dégradations de sol.
-) retrait-gonflement des sols.
-) L'abondance des précipitations cause des déformations au niveau des routes etc.

I-10) Conclusion

Nous sommes impuissants face à certaines colères que subit la terre. Mais aussi responsables, nous devons être prudents car le climat de demain dépend pour partie des choix d'aujourd'hui.

Le changement climatique est un risque qui touche plusieurs domaines de la vie et toutes les régions du monde qu'il faut contrer par des mesures d'adaptation.

Dans le chapitre suivant on va voir les sols et leurs problèmes causés par les changements climatiques.



**Chapitre II :
Influence des
changements climatiques
sur les sols fins**

II-1) Introduction

Les sols fins y compris les argiles, limons, marnes, etc. sont des sols d'assise pour un grand nombre de constructions dans le monde entier, dont il faut bien les prendre en charge lors de la conception des projets afin d'éviter certains dégâts (glissement des terrains, tassement...) liés aux phénomènes d'origine climatique tel que le retrait-gonflement, le gel-dégel, etc.

Dans ce chapitre on va présenter les types des sols fins et sa composition minéralogique et leurs problèmes dus aux changements climatiques.

II-2) Généralité sur les sols fins

Comme tous les autres types de sols, les sols fins sont des matériaux meubles issus de la dégradation et de la décomposition des roches par des agents atmosphériques et des activités biologiques. Ils sont caractérisés par une forme en feuillet (le rapport de la longueur sur l'épaisseur est supérieur à 10), ce qui donne aux particules une apparence semblable à celle d'une feuille de papier. En général, ces particules sont plus flexibles que les particules volumineuses. Les sols qui en sont constitués sont donc plus compressibles et ils se déforment facilement sous l'effet d'une charge statique, par contre, ils peuvent présenter une meilleure stabilité face aux vibrations et aux chocs (BOUDLAL.O ,2013).

II-3) Composition minéralogique des sols fins

Les sols sont généralement le résidu de l'altération de différents types de substrats rocheux ou meubles, leur composition minéralogique dépend donc directement de celle de la roche mère. Cependant, l'altération peut modifier cette composition. Les particules solides des sols sont composées de divers minéraux. Ils sont souvent classés en quatre catégories (minéraux primaires, minéraux secondaires, sels et matières organiques) suivant leur composition, leur mode de formation et leur cause de formation, (XIANG-LING.LI, 1999).

II-4) Différentes types de sols fins

Selon COLLINS (1974), les sols fins sont les matériaux dans lesquels les particules de nature argileuse occupent une place prédominante. Cependant, lorsque les particules argileuses sont supérieures à 3%, et les particules grossières sont inférieures à 10 %, le matériau est classé comme étant un sol fin.

Les sols à grains fins regroupent évidemment tous les sols dont les particules sont invisibles à l'œil nu. Suivant la classification des sols par granulométrie, le vocable sols fins désigne en général les argiles, les silts et les limons.

- J) **Les silts et les limons**, sont composés de fines particules de roche dont le diamètre équivalent varie de 0,002 mm à 0,08 mm, et dont la forme peut être observée à la loupe ou au microscope optique. Habituellement, même dans des conditions similaires de compacité, le silt ne peut supporter des charges aussi importantes que le gravier et le sable. Sa compressibilité est d'ailleurs plus grande que celle de ces deux types de sols, ce qui occasionne des tassements accrus. Quant à sa perméabilité, elle est très faible, (ROBITAILLE.V et TREMBLAY.D, 1997).
- J) **Les argiles**, sont constituées de particules cristallines qui proviennent de la décomposition chimique des constituants de roche. Le diamètre équivalent des particules d'argile varie approximativement de 1 nm à 0,002mm, (ROBITAILLE.V et TREMBLAY.D, 1997).

II-5) Les argiles

D'une manière générale, un sol contenant plus de 3% de particules argileuses possède déjà des propriétés d'un sol argileux. Lorsque la proportion de particules argileuses dépasse 30%, le sol est considéré comme une argile, (XIANG-LING LI, 1999).

Les particules d'argile présentent la fraction minérale inférieure à 2 μm . 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 en général, les charges qu'elle peut supporter sont de loin inférieures à celles que supportent le gravier et le sable. Les particules d'argile, contrairement à celles des autres types de sols, 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 la façonner, une opération pratiquement irréalisable avec le gravier ou le sable, (ROBITAILLE.V et TREMBLAY.D, 1997).

II-5-1) Les minéraux argileux

Les sols fins (les argiles) sont essentiellement composés de minéraux argileux. Les caractéristiques physico-chimiques de ces derniers sont donc des facteurs déterminants pour le comportement mécanique. Les particules des minéraux argileux présentent, en effet, deux caractéristiques particulières et importantes, (XIANG-LING LI, 1999) :

- Elles sont de très petite taille et associent l'eau à leur structure, ce qui leur confère des propriétés colloïdales intéressantes du point de vue géomécanique ;

- La majorité des minéraux argileux se caractérise par une microstructure lamellaire ou foliaire organisée elle-même selon une intégration multi-échelle. En conséquence, la surface spécifique des minéraux argileux ainsi que la capacité d'échange cationique peuvent être élevées. Ces deux paramètres rendent compte de plusieurs propriétés hydromécaniques importantes, tels que le phénomène d'adsorption d'eau autour des particules argileuses et au sein de la structure foliaire, la capacité de gonflement chez certaines espèces minérales, l'étendu du domaine plastique, etc.

Les trois familles les plus connues de minéraux argileux sont la kaolinite, la montmorillonite et l'illite.

- La kaolinite

Ce nom vient du mot Kauling, qui désigne le haut sommet d'une colline située près de Jaucha Fu en Chine où cette argile blanchâtre a été découverte il y a quelques siècles.

La kaolinite est formée de couches élémentaires comprenant chacune un feuillet tétraédrique et un feuillet octaédrique qui renferme des atomes d'aluminium (gibbsite).

Les argiles de la famille de la kaolinite sont les constituants essentiels de la plupart des argiles utilisées en céramique. Ces minéraux sont relativement inactifs, non gonflants. La formule chimique de cette famille est du type $[\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$ pour une demi-maille, elle est donc assez riche en alumine (BOUDLALO, 2013).

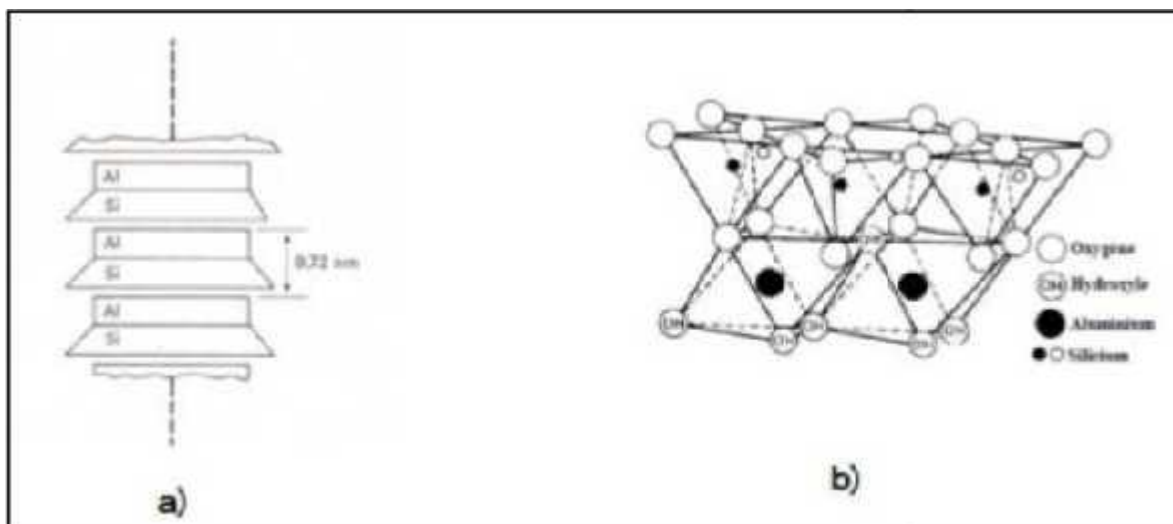


Figure II.1. Schéma de la structure de la kaolinite (LAMBE.T, 1953)



Figure II.2. Photographie d'une kaolinite prise au microscope électronique à balayage (MITCHELL.J, 1976).

-La montmorillonite

La montmorillonite a été découverte à Monmorillon 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 (smectites) 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 alors une famille de minéraux argileux actifs. La formule chimique des montmorillonites est du type $[\text{Si}_4\text{Al}(2-x)\text{Mg}_x\text{O}_{10}(\text{OH})_{2x}(\text{cations échangeables})_n\text{H}_2\text{O}]$.

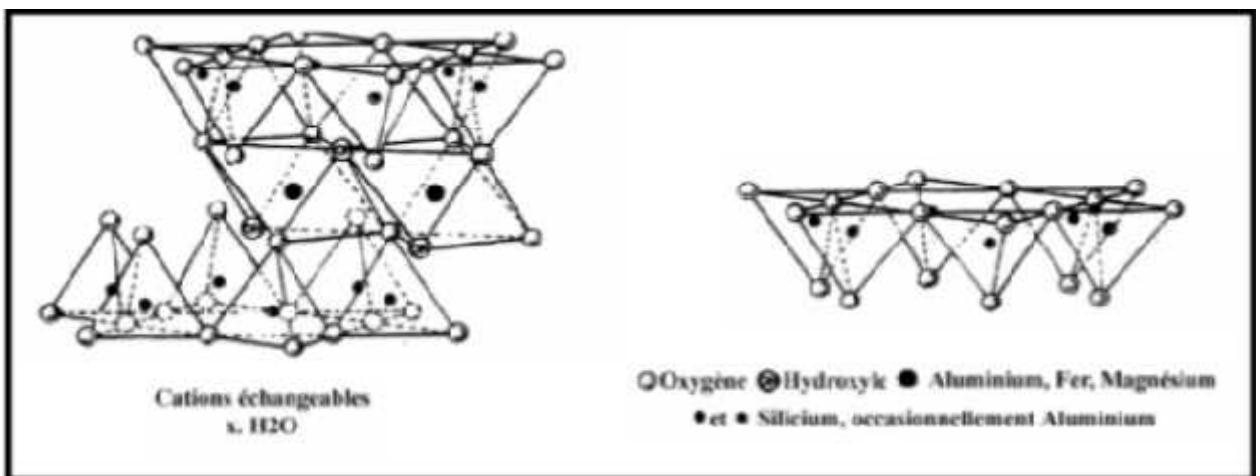


Figure II.3. Vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite (GRIM, 1959)

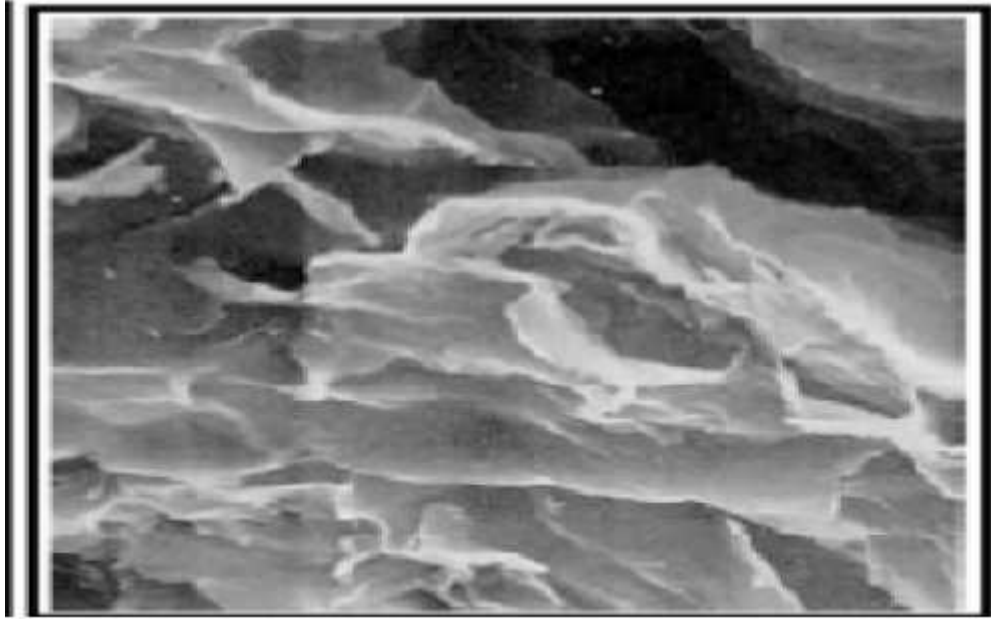


Figure II.4. Photographie d'une montmorillonite prise au microscope électronique à balayage (MITCHELL.J, 1976)

- L'illite

L'illite 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 de l'illite sont parmi les minéraux les plus répandus à la surface de la terre. La structure de l'illite (Figure II.5) 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 : $[\text{Si}(4-x)\text{Al}_x\text{Al}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2x\text{K}]$.

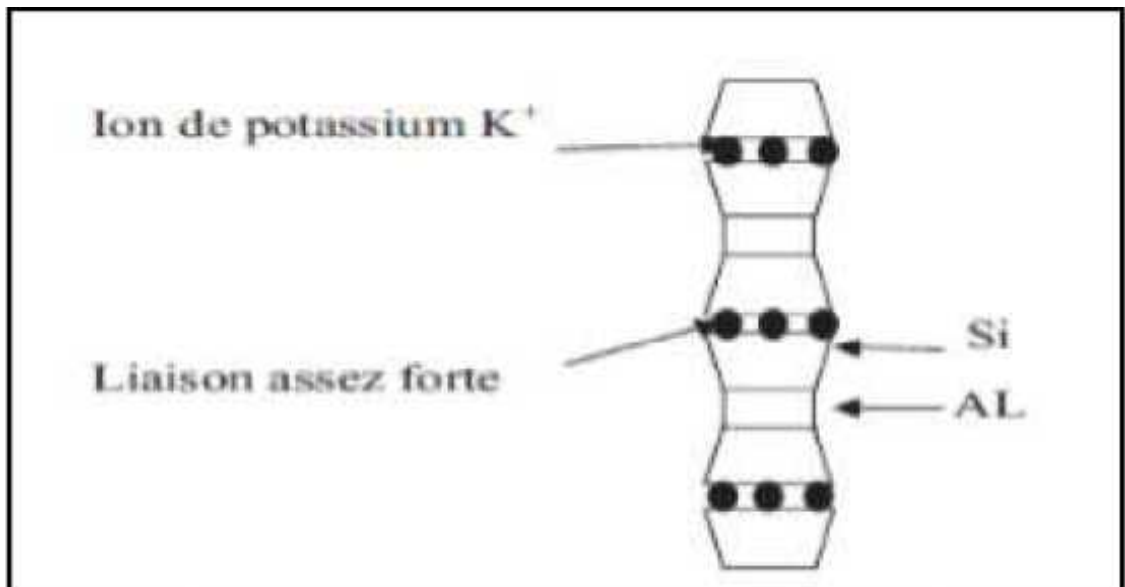


Figure II.5. Structure d'illite (LAMBE.T, 1953)

II-6) Les minéraux argileux et le système « argile – eau »

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

II-7) Les marnes

II-7-1) Origine

Ce sont des roches d'origine superficielle formée par des dépôts de sédiment au niveau de la surface terrestre, la plus grande partie résulte d'un dépôt en milieu aquatique. Les roches sédimentaires peuvent résulter d'un processus d'altération ou d'érosion.

-)] Si l'altération est prédominante, on trouvera des minéraux d'altération aux cotés des minéraux présents dans les roches mères. On parle de roches résiduelles,
-)] Si l'érosion est prédominante, on obtient après transport, sédimentation et diagenèse, des roches détritiques,
-)] Si la roche mère mise en solution peut conduire à la formation de roche d'origine chimique (tufs calcaire), de roches d'origine ou biochimique (calcaires coralliens).

II-7-2) Définition de la marne

Dans la nature, et dans un très grand nombre de cas, les minéraux argileux sont associés à d'autres minéraux, ce qui donne naissance à de nouvelles roches argileuses, parmi elles on cite les marnes.

En pétrographie, on définit les marnes comme étant des roches composées d'un mélange de carbonates et de 30 à 70 % d'argiles. Suivant le pourcentage d'argile contenue dans la roche, on parle de marne argileuse, de marne, de calcaire marneux, et de calcaire.

En géotechnique, les ingénieurs confrontés aux problèmes du comportement des marnes en Génie Civil (fondation d'ouvrages) et en travaux publics (couches de chaussées), et dont les préoccupations sont d'ordre pratique, ont introduit pour ces matériaux des éléments d'appréciation tenant compte de leur comportement sous des sollicitations d'ordre dynamique ou physico-chimique (altérabilité), d'où la notion de roches évolutives en plus des critères pétrographique classique (DELAHAYE.D et LE ROUX.A, 1975).

Donc on donne à la marne la définition suivante :

Une marne est une roche plus ou moins carbonatée, cohérente et à cassure terne à l'état sec, pouvant devenir plastique en présence d'eau et contenant de 10 à 90% d'argile.

II-7-3) Les différents types de marne

Les différents éléments composant la marne sont responsables de la couleur et de l'aspect permettent de définir la marne rencontrée par une appellation.

- Selon la couleur :

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

- Selon les constituants remarquables:

- Les marnes micacées ;
- Les marnes sableuses ;
- Les marnes dolomitiques ;
- Les marnes bitumineuses ;
- Les marnes glauconieuses ;
- Les marnes gypseuses, etc.

- Selon l'intérêt stratigraphique et paléontologique:

- Les marnes à spongiaires ;
- Les marnes à foraminifères ;
- Les marnes à pholadomyies ;
- Les marnes à radiolaires, etc.



Figure II.6. Les différents types de marne.

Ces appellations qui compliquent singulièrement le problème amènent à la genèse de ces matériaux.

II-7-4) Genèse des marnes

Les argiles qui rentrent dans la constitution des marnes proviennent soit de l'altération des massifs émergés, (les argiles héritées), soit de la reprise des sols où se mêlent les argiles héritées et les argiles néoformées. Après un transport, plus ou moins long, les minéraux argileux arrivent au bassin de sédimentation. Dans ce cas, les marnes auront une origine détritique. Dans les étapes proprement chimiques du cycle sédimentaire, les néoformations dominent (carbonate, silex, phosphate). Il existe aussi des néoformations de silicates et en particulier d'argiles. Les minéraux argileux dans ce cas s'édifient de toute pièce comme les autres minéraux d'origine chimique à partir des ions en solution dans l'eau. Au cours, et après le dépôt, interviennent les phénomènes de diagénèse (somme de processus de formation des roches à partir des boues. DUNOYER.G (1969) a distingué les phénomènes suivants:

- a) **Diagénèse des carbonates** : l'étude de la sédimentologie des carbonates, a fourni de très nombreuses données sur les premiers stades de la diagénèse :
- Ceux qui affectent la composition minéralogique et chimique (remplacement, recristallisation, dissolution, cimentation, formation de nodule),
 - Ceux qui altèrent la structure (fracturation, déformation plastique, tassement par dessiccation), (SCHMIDT.V, 1965);
- b) **Diagénèse des minéraux argileux** : les transformations diagénétiques affectent particulièrement les minéraux argileux en raison de leur taille, de leur surface spécifique élevée, et de leur structure feuilletée facilitant les échanges d'ions entre le minéral et son entourage.

L'ensemble des phénomènes diagénétiques conduit à la formation d'un matériau dont les propriétés dépendront en grande partie, de l'intensité des phénomènes qui se sont produits.

II-7-5) Caractéristiques de la marne

Les marnes apparaissent constituées de trois phases : phase carbonatée, phase sableuse et phase argileuse.

Les caractéristiques mécaniques sont liées à l'importance respective de chacune des phases, mais aussi à la nature minéralogique de la phase argileuse. La présence d'argiles montmorillonitiques ou encore d'argiles fibreuses induit des caractéristiques mécaniques

mauvaises. Cependant, cette influence particulière des argiles peut être tempérée ou au contraire exacerbée suivant les types de textures. Si les liaisons entre carbonates sont abondantes et fortes, le matériau aura un comportement de roche. Au contraire si les carbonates sont noyés dans une matrice argileuse, le matériau aura un comportement d'un sol.

Le comportement du matériau dépend des proportions des composants, de la texture initiale et de la fraction argileuse (DELAHAYE.D et LE ROUX.A, 1975).

Comme les argiles, les marnes sont tendres, finement poreuses, friables quand elles sont sèches, plastiques lorsqu'elles sont mouillées. Mais, à la différence des argiles, elles font effervescence avec les acides à cause de la présence du calcaire. La finesse des éléments constitutifs (minéraux argileux, carbonates et, parfois, silice en faible quantité) place les marnes dans le groupe des lutites, ou pélites. La teneur en carbonate (CaCO_3) ou en argile (Tableau II.1) sont des paramètres essentiels permettant la classification de certaines roches (PEJON.O et al, 1997).

Delahaye et Le Roux (DELAHAYE et LE ROUX, 1975), ont défini la marne comme étant un matériau de transition entre le calcaire et l'argile ; c'est une roche carbonatée contenant de 30 à 70 % d'argile. Ainsi, elle tient de la fraction carbonatée une structure plus ou moins résistante et de la fraction argileuse une possibilité d'évolution par destruction de la structure par suite de l'action de l'eau sur l'argile, conduisant à un matériau plastique.

Tableau II.1. Classification courante des roches selon la teneur en carbonate et en argile.

Classification de Jung		Classification LCPC	
Roches	% d'argile	% CaCO_3	Roches
Calcaire	0 - 5	0 - 10	Argile ou Silt
Calcaire argileux	5 - 35	10 - 30	Argile ou Silt-Marne
Marne	35 - 65	30 - 70	Marne
Argile calcaire	65 - 95	70 - 90	Calcaire-Marneux
Argile	95 - 100	90 - 100	Calcaire

Cette définition purement pétrographique, a été sensiblement élargie sur le plan du pourcentage d'argile. En pratique, en génie civil, le nom marne peut-être attribué pour toutes roches carbonatées contenant de 10 à 90 % d'argile, que l'effervescence à l'acide chlorhydrique dilué à froid soit visible ou non sur le matériau.

II-7-6) L'altération des marnes



Figure II.7. L'altération de la marne (KICHI.H, 2013)

L'altération des marnes se traduit essentiellement par une dégradation de la structure de la roche en surface sous l'effet de divers mécanismes (BUFFALO.M ,1989).

La couverture, le drainage, la morphologie, la stratification par rapport au pendage, le climat, agissent simultanément sur l'altération des marnes.

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

- La détérioration des propriétés mécaniques,
- La diminution du poids volumiques sec,
- La modification des caractéristiques chimiques,
- L'apparition des fissures,
- L'évolution de la marne (matériaux argileux),
- Le changement de couleur de l'état naturel.
- L'augmentation de la teneur en eau de saturation.

II-8) Comportement des sols soumis au gel-dégel

Les sols peuvent subir des endommagements lorsque l'eau présente dans les pores gelé et augmente de volume. Deux phénomènes doivent particulièrement être suivis; l'apparition d'eau gelée dont la masse volumique plus faible que celle de l'eau liquide peut entraîner des gonflements du milieu poreux et la migration d'eau par diffusion à travers la structure poreuse vers les zones gelées, appelée cryosuccion, le degré de saturation en eau et la vitesse de refroidissement sont des facteurs qui ont une forte influence sur la façon dont le gel va se manifester (OURRAD.K, 2018).

II-8-1) Les échanges thermiques à partir de la surface du sol

On sait que la radiation interne du globe est constante, et presque insignifiante : elle représente à peu près le deux-millième de la radiation externe. La température du sol et du sous-sol dépendra donc de la température de la surface du sol : c'est de celle-ci qu'il convient de préciser les facteurs.

La surface du sol se refroidit par convection, par évaporation ou fusion, par rayonnement surtout. Si la conductibilité de l'air est faible, des courants naissent incessamment au contact de la surface topographique, dont la température est différente de celle de l'air. C'est encore le sol qui fournira les quantités de chaleur nécessaires aux changements d'état de l'eau qu'il contient.

Quant au rayonnement thermique du sol, il est proportionnel à la quatrième puissance de la température absolue, ce rayonnement obscur à grande longueur d'onde, et arrêté par la vapeur d'eau, et variera donc en sens inverse de la nébulosité il est plus important dans les parties concaves du relief, parce que commandé par la distance zénithale il dépend enfin du pouvoir émissif, qui caractérise chaque roche, ou plutôt chaque élément de la surface terrestre (le « sol vrai » peut-être reporté par la nature de la couverture végétale à plusieurs mètres de hauteur) : ce pouvoir émissif devient extraordinairement élevé parfois, dans le cas de la neige en particulier.

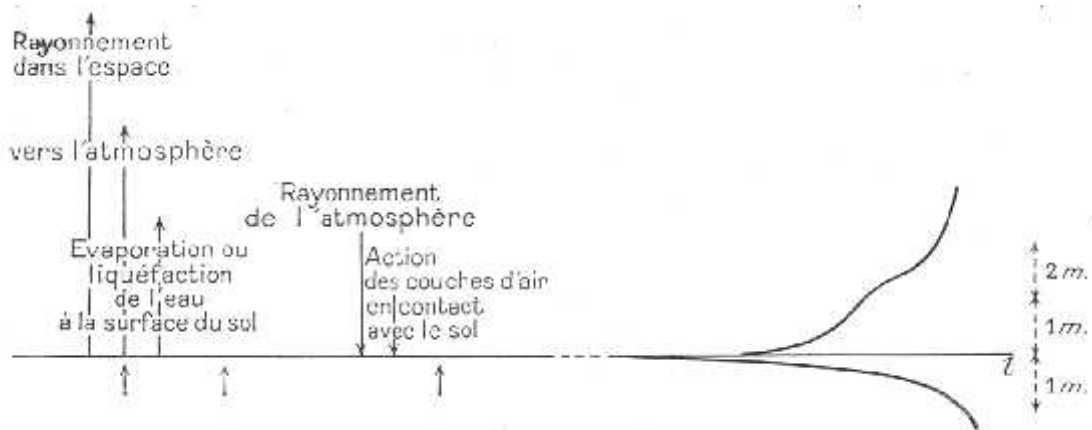


Figure II.8. Echanges thermiques et profil vertical des températures (GUILLIEN.Y, 1949).

Inversement, la surface du sol s'échauffe par condensation ou congélation d'humidité, par conduction, par rayonnement, par radiation. Les apports calorifiques d'une averse, d'un arrosage très léger sont sensibles ceux de masses d'air allogènes peuvent n'être pas négligeables. Le rayonnement thermique de l'atmosphère variera, lui aussi, en fonction de la température et de la pression de la vapeur d'eau : il sera maximum en été et par temps

couvert il pourra compenser l'effet du rayonnement terrestre. Enfin la radiation externe, qui comprend des ondes courtes en même temps que des ondes longues, sera pour une part la radiation diffuse du ciel, pour une autre la radiation directe du soleil : et comme cette dernière est de beaucoup la plus importante, la température du sol dépendra étroitement de faits astronomiques (latitude, saison, heure) puis, beaucoup plus qu'on ne l'eût pensé, de faits de relief (pente, exposition).

Elle dépendra aussi du pouvoir réfléchissant de la surface du sol, l'albédo, qui dans le cas de la neige fraîche peut atteindre 80 % et du revêtement de cette surface, de son tapis végétal en particulier, qui peut faire passer l'albédo de 10 à 1. Mais toujours le refroidissement et réchauffement de la surface du sol seront fonction de la capacité calorifique (produit de la masse par la chaleur spécifique) et de la conductibilité du sol (GUILLIEN.Y, 1949).

II-8-2) Les échanges d'humidité dans le sol sous l'action du gel

Lorsque la température du sol tombe au-dessous de 0°, la circulation de la vapeur d'eau provenant des couches profondes ne s'interrompt pas : elle amène des condensations et des congélations (BESKOW.G, 1935). Mais aux mécanismes de la montée capillaire, d'autres beaucoup plus efficaces peuvent se substituer, qui assurent la migration de l'eau vers les surfaces réfrigérantes, sur lesquelles tendent à se former les cristaux de glace (TROLL.C, 1928). Au sein du système dispersé que constitue le sol plus ou moins riche en eau, la formation de germes cristallins semble d'autant plus aisée que la sursaturation est plus intense, et le refroidissement plus rapide. Le développement des cristaux consiste en un allongement progressif vers la surface réfrigérante.



Figure II.9. Les cristaux de glace.

Leur alimentation (et leur multiplication) dépend évidemment des propriétés du sol et du sous-sol, en particulier de leur tassement (d'où la sensibilité extrême des routes à la cryergie), de leur perméabilité et de leur granulométrie. Il est nécessaire d'insister sur ce dernier point: l'ascension de l'eau sous l'action du gel n'est possible que dans les sols suffisamment riches en grains d'un diamètre inférieur à 0,02 mm dans un gravier ou dans un sable bien lavés de leurs éléments fins, dans une roche à gros pores, les cristaux de glace rempliront simplement les interstices, et chasseront l'eau en excès vers le bas inversement, les argiles, les marnes, les sables fins ou à éléments fins suffisamment nombreux pourront être parcourus par des mouvements ascensionnels déterminés par le gel de leur partie supérieure; de même les roches très finement poreuses, comme la craie.

C'est ainsi que jaillissent du sol les Pipkrakes (CAILLEUX.A et THELLIER.E, 1947), à la suite d'un simple refroidissement nocturne des couches inférieures de l'air. Dans les sablières de la Somme, on peut voir les petites aiguilles de glace souligner une stratigraphie parfois très fine : hautes à peine de quelques millimètres, elles se pressent exclusivement sur les bancs argileux mais qu'apparaisse un lit de granules crayeux, elles dépasseront nettement 5 cm à Cagny, novembre 1948. Le développement des pipkrakes peut se poursuivre, en l'absence d'un dégel diurne, et si le gel ne pénètre pas dans le sol, tarissant les arrivées d'eau. Dans les régions très froides, à tjäle, on ne trouvera donc « les cheveux de glace » qu'en période d'instabilité atmosphérique inversement ils sont de règle dans les domaines océaniques à hiver, dans les montagnes méditerranéennes et surtout subtropicales, où ils semblent avoir leur domaine d'élection : nulle part peut-être on n'a signalé des exemples aussi saisissants qu'au Japon, où ils peuvent mesurer 1,20 m.

Que le gel vienne à s'enfoncer au-dessous de la surface du sol, c'est désormais en profondeur qu'auront lieu la formation et le développement des cristaux. Encore faut-il que la descente de l'isotherme 0 ne soit pas trop rapide, que l'eau ait le temps d'émigrer. En ce cas, les cristaux apparaissent à l'état dispersé, ou se groupent en lentilles dont chacune peut correspondre à un arrêt dans le mouvement des isothermes : ces lentilles, plus ou moins horizontales, pourront être faites de glace transparente ou au contraire fibreuse leur épaisseur variera de quelques millimètres à 20 ou 40 cm en Suède, à 12 pieds dans les formations fossiles de l'Alaska. Mais la cristallisation ne saurait descendre tout à fait jusqu'à l'isotherme de 0° : au niveau inférieur du sol gelé, une partie de l'eau venue du sous-sol restera à l'état liquide la pression d'ailleurs amènera des phénomènes de surfusion quelle que soit sa température, le sol gelé naturel contiendra de l'eau, en même temps que de la glace.

Cette accumulation d'humidité à proximité de la surface du sol est caractéristique : elle peut atteindre 80 r/c, en poids, alors que le pouvoir de rétention des sols drainés, à une température supérieure à 0°, ne paraît pas atteindre 30%.

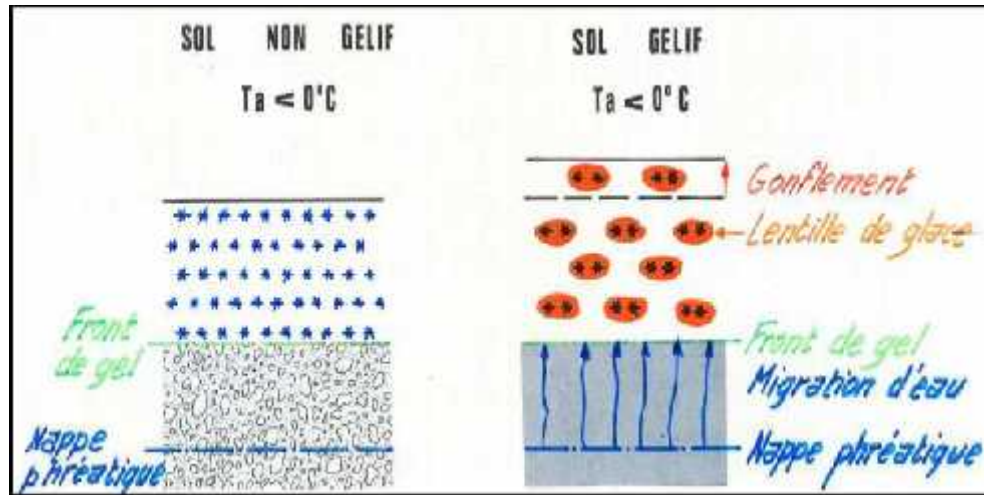


Figure II.10. Le gel dans les deux types de sols.



Figure II.11. Exemple de phénomène de gel sur le sol.

II-9) L'influence climatique sur les sols fins

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

Les cycles climatiques hiver et été avec toutes leurs caractéristiques influencent sur le comportement des sols fins, parmi ces influences le retrait-gonflement, les fissurations et

les transformations des minéraux qui causent des glissements de terrain (OURRAD.K, 2018).

II-10) Le retrait-gonflement

Le retrait-gonflement est un mouvement de tassement différentiel du sol spécifique aux terrains argileux (les argiles sont gonflantes et varient en fonction de leur teneur en eau) la variation de volume d'un terrain est consécutive à l'alternance des périodes de sécheresse (déshydratation superficielle) et des périodes pluvieuses (réhydratation), et elle provoque des désordres dans les constructions (fissuration, décollement d'élément jointifs).



Figure II.12. Gonflement d'une chaussée.

Le gonflement est le terme utilisé pour dire que le volume du sol augmente lorsqu'il absorbe de l'eau. Ce phénomène est au moins partiellement réversible et un sol gonflant subit un retrait (une diminution de volume) quand sa teneur en eau diminue. Dans les pays de climat sec, l'accent est mis sur le gonflement, mais dans les pays dont le climat est humide c'est sur le retrait que l'on insiste.

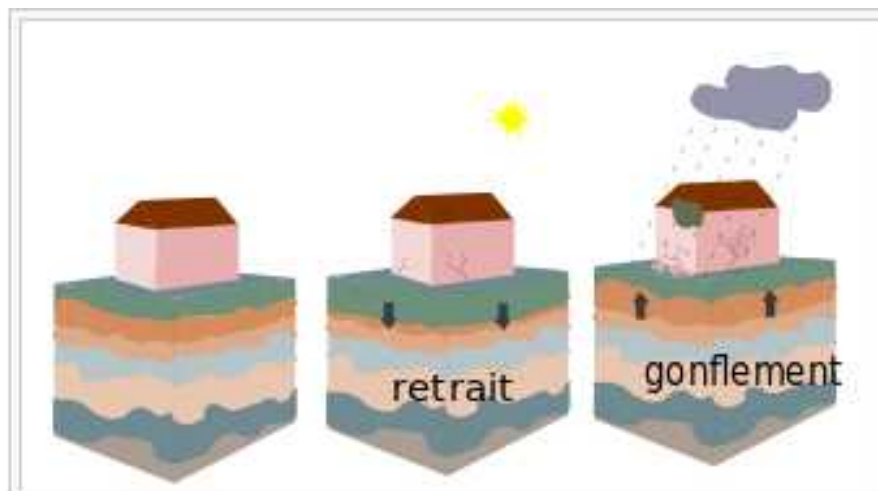


Figure II.13. Schéma simplifié de deux sources de désordre sur une maison construite dans fondations suffisantes sur un sol argileux (Wikipédia).

II-10-1) Le phénomène de leur retrait-gonflement

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

Les phénomènes de capillarité, et surtout de succion, sont à l'origine de ce comportement. Les variations de volume des sols argileux répondent donc à des variations de teneur en eau (on notera que des variations de contraintes extérieures – telles que les surcharges – peuvent, par ailleurs, également générer des variations de volume). Tous les sols présentent la particularité de contenir de l'eau en quantité plus ou moins importante : (Figure II.14)

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

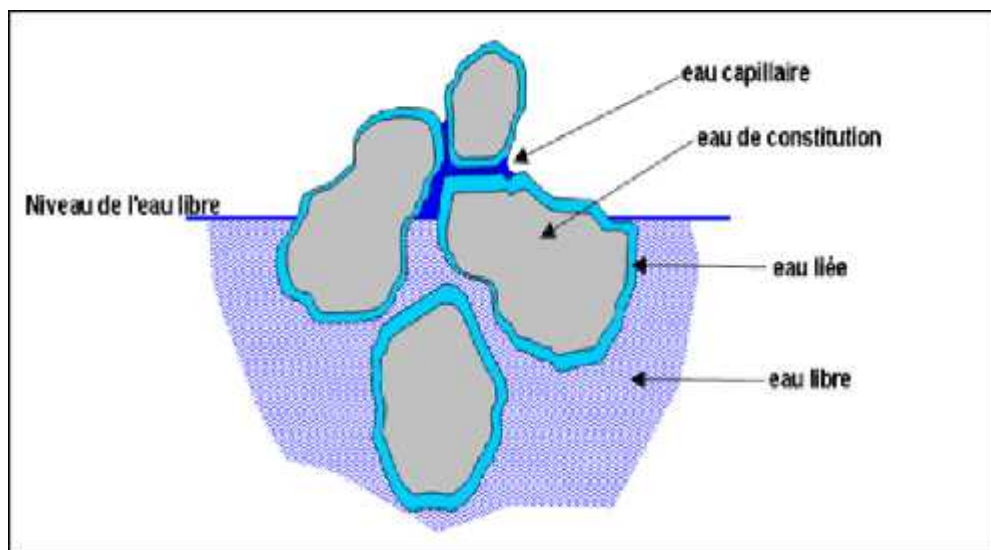


Figure II.14. L'état de l'eau dans les grains de sol.

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

II-10-2) Les facteurs intervenants dans le phénomène de retrait-gonflement des argiles

On distinguera les facteurs de prédisposition et les facteurs de déclenchement. Les premiers, par leur présence, sont de nature à induire le phénomène de retrait-gonflement des argiles, mais ne suffisent pas à le déclencher. Il s'agit de facteurs internes (liés à la nature des sols), et de facteurs dit d'environnement (en relation avec le site). Les facteurs de prédisposition permettent de caractériser la susceptibilité du milieu au phénomène et conditionnent sa répartition spatiale.

Les facteurs de déclenchement sont ceux dont la présence provoque le phénomène de retrait-gonflement, mais n'ont d'effet significatif que s'il existe des facteurs de prédisposition préalables. Leur connaissance permet de déterminer l'occurrence du phénomène (l'aléa et plus seulement la susceptibilité) (KELANEMER.A et HAMADOU.M, 2016).

II-11) 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 sols fins.

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.15 et II.16).



Figure II.15. Dessiccation d'un sol.



Figure II.16. Humectation.

II-12) Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre les différentes définitions et types des sols fins (argile, marne) et leurs caractéristiques. Ainsi que les différents problèmes (le retrait-gonflement, gel dégel et les fissures) qu'ils subissent à cause des changements climatiques.



Chapitre III :
Dimension fractale et
ses méthodes de calcul

III-1) Introduction

La structure d'un sol est faite des particules et d'éléments structuraux de dimension et de géométrie différente, formé par l'agrégation des particules plus petites. L'objectif essentiel était de déterminer l'état d'agrégation et la forme des grains résultant de ce processus du sol de façon à rendre compte de la variation de la structure ou de l'agrégation des sols.

Ce problème classique de la physique des sols a pris récemment une nouvelle dimension avec la prise de conscience que ces derniers sont à la fois des milieux fragmentaires et des milieux poreux, une représentation de sa structure pourrait lui être particulièrement appropriée (MANDELROT.B, 1983).

III-2) Définition

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

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

III-3) Origine des fractales

Depuis très longtemps, l'homme a été fasciné par les formes géométriques particulières qu'il observa dans la nature et qu'il créa pour décorer ses habitations, ses vêtements, ou encore ses lieux de culte. Au XIX^{ème} siècle, elles sont considérées comme des « curiosités » mathématiques jusqu'au milieu du XX^{ème} siècle. Elles n'acquièrent un statut à part entière que dans les années 1970, grâce au mathématicien franco-américain, **Benoît Mandelbrot**, né à Varsovie le 20 novembre 1924 et mort le 14 octobre 2010 à Cambridge, qui en a fait l'objet d'une nouvelle discipline mathématique : la géométrie fractale, rendue populaire par son ouvrage « *les Objets fractals : forme, hasard et dimension* » (MANDELROT. B, 1975).

III-4) Caractéristiques d'un objet fractal

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

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

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

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

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

Une fractale peut être une forme géométrique, un objet, une réalité observable dans la nature comme les surfaces de rupture, le relief d'une montagne, un caillou ou la morphologie d'une plante, un modèle mathématique, les grains d'un matériau granulaire, ou tout cela à la fois (MANDELBROT. B, 1983) (Figure III.1). On peut utiliser le mot « fractale » comme l'adjectif pour qualifier une « réalité » ayant certaines ou toutes les propriétés des fractales.

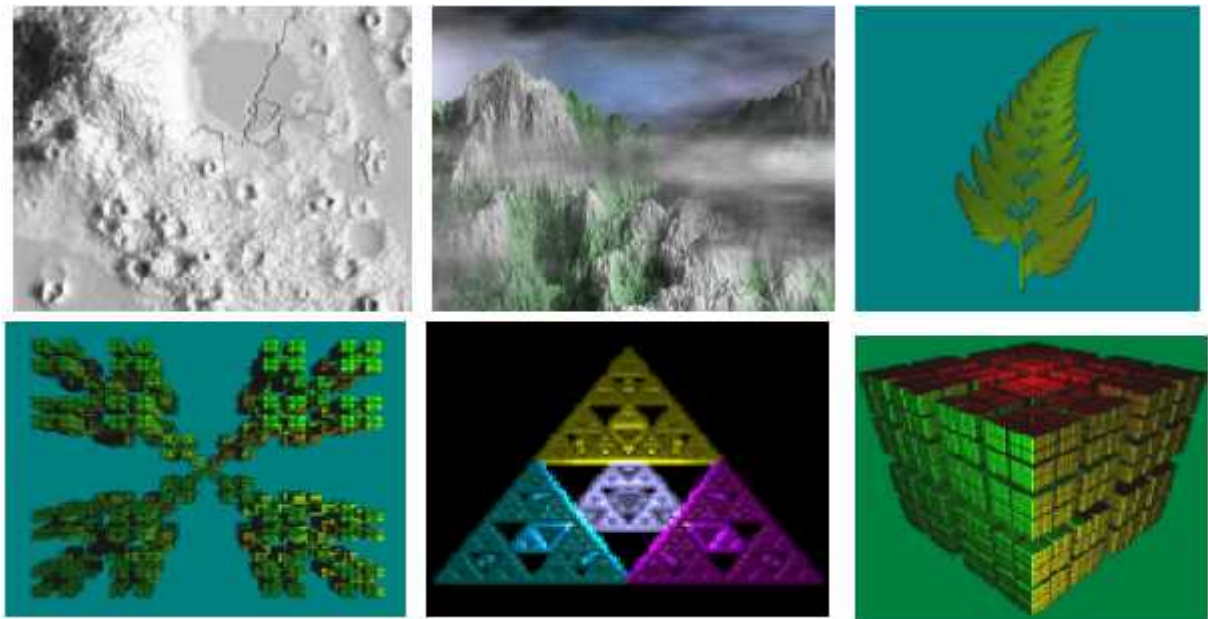


Figure III.1. Montagne fractale (BOUDET.A, 2008) et quelques objets fractals.

L'extension de ce terme est très vaste mais il existe une caractéristique à laquelle toute les fractales se soumettent : l'autosimilarité ; qui veut dire qu'un agrandissement d'un objet est identique à lui-même quelle que soit l'échelle à laquelle on l'observe, à ceci près qu'elles sont à une échelle différente et peuvent être légèrement déformées. Cette propriété est appelée aussi par les mathématiciens homothétie interne.

Un bon exemple qui présente cette définition c'est le chou-fleur qui est une très jolie fractale naturelle, chaque morceau que vous détachez présente la même structure que le tout et ainsi de suite (BOUZEBOUJJA.A, 2016).

III-5) Notion de la dimension

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

III-5-1) Dimension fractale

La dimension fractale est un nombre qui mesure le degré d'irrégularité ou de la fragmentation d'un objet, ou la mesure de la rugosité d'une surface, et cette notion de dimension fractale est appliquée aux objets invariants d'échelle. Pour introduire beaucoup plus sur la notion de la dimension fractale, il est indispensable de parler d'abord de la dimension euclidienne (Figure III.2).

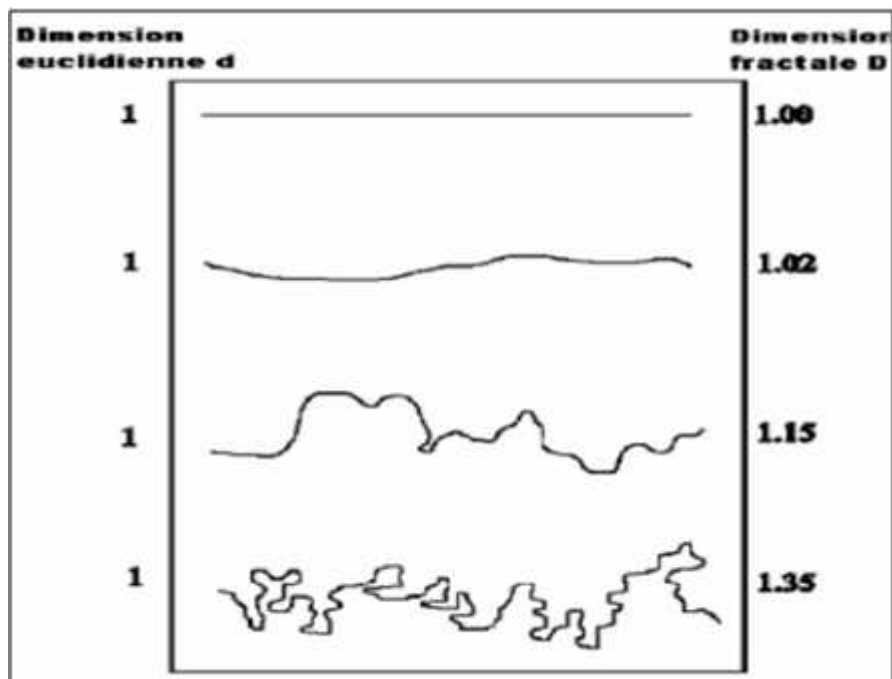


Figure III.2. Illustration du rapport entre dimensions fractale et euclidienne (ACHIR. M, 2011).

III-6) Application à la dimension fractale

III-6-1) Le flocon de Koch

La courbe de Von Koch a été décrite et démontrée en 1906 par le Mathématicien Suédois Helge VON KOCH (1870-1924). Elle est définie comme quatre copies d'elle même trois

fois plus petites. Sa dimension fractale s'exprime selon la dimension de Hausdorff-Besicovitch, elle est $D=1,26.9$ (CORALIE. A, 2013/2014).

III-6-2) Le triangle de Sierpinsky

La construction est très simple à comprendre : on part d'un triangle équilatérale que l'on divise en 4 triangle équilatéraux. On enlève le triangle central et on effectue la même opération sur les triangles conservés. L'ensemble obtenu, connu sous le nom de triangle de Sierpinsky (Figure III.3), a pour dimension fractale $\log 3 / \log 2$.

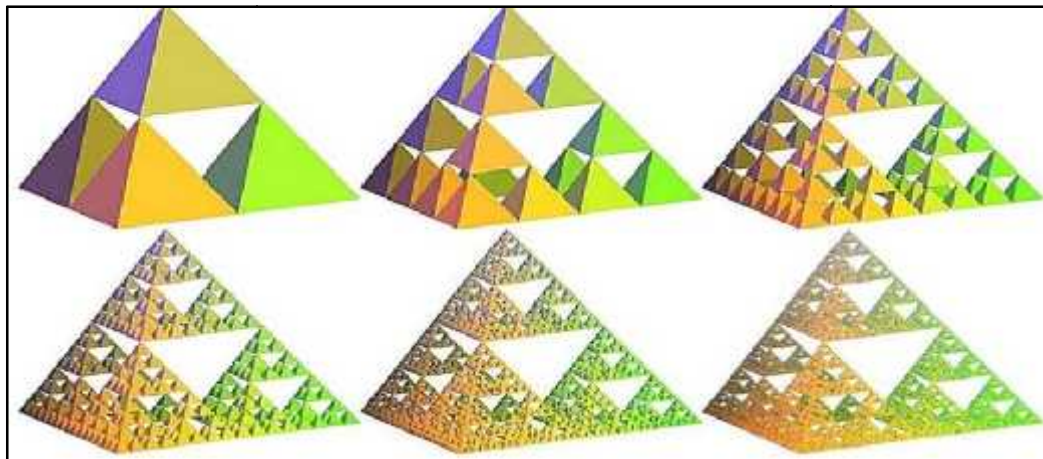


Figure III.3. Le triangle de Sierpinsky (LEHAMEL. M, 2011).

III-6-3) Le tapis de Sierpinsky

A partir d'un carré initial contenant un seul carré blanc, on construit à l'intérieur d'autres carrés blancs selon le procédé suivant : à chaque étape, on ajoute 8 carrés trois fois plus petits autour de chaque carré que l'on vient d'ajouter ; voir Figure III.4

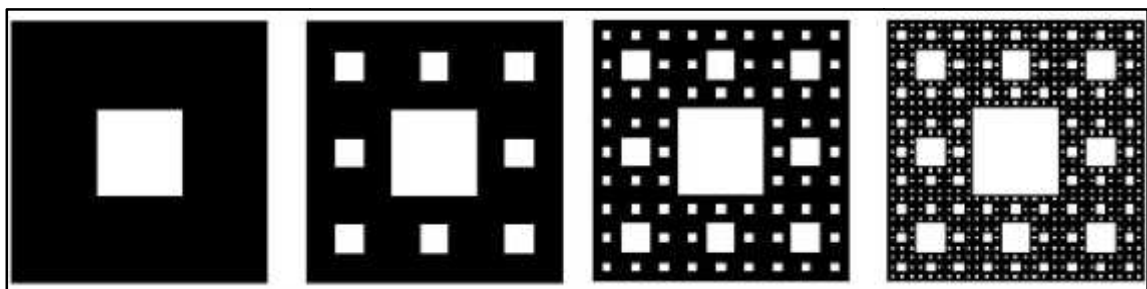


Figure III.4. Tapis de Sierpinsky (BOUDET. A, 2008).

III-6-4) Eponge de Menger

L'éponge de Menger (Figure III.5), parfois appelée éponge de Menger-Sierpinsky, est un solide fractal. Il s'agit de l'extension dans une troisième dimension de l'ensemble de Cantor et du tapis de Sierpinsky (on enlève les cubes de la même façon que le tapis de Sierpinsky). Elle fut décrite pour la première fois par le mathématicien autrichien Karl Menger en 1926.

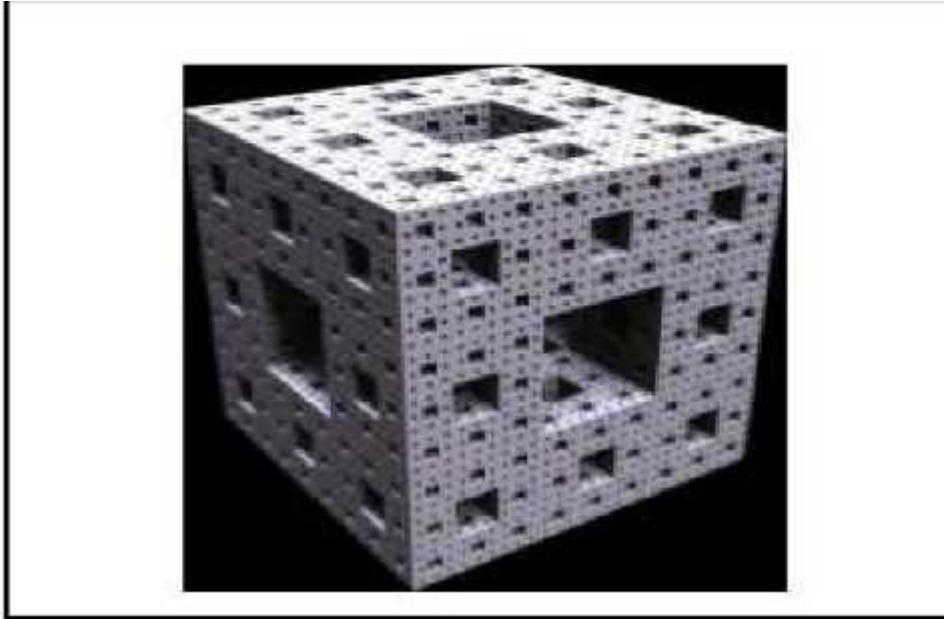


Figure III.5. L` Eponge de Menger-Sierpinsky (JOSIANE.L, 2006).

III-6-5) Ensemble de Cantor

En mathématiques, l'ensemble de Cantor (ou ensemble triadique de Cantor, ou poussière de Cantor) est un sous-ensemble remarquable de la droite réelle construit par le mathématicien allemand George Cantor.

III-6-6) Ensemble de Mandelbrot

La fractale de Mandelbrot est la visualisation d'un objet mathématique. Il s'agit en réalité d'une matrice de nombres, où la valeur de chaque nombre est représentée par une couleur. Chaque point de l'image est un nombre calculé par l'ordinateur selon une équation très simple:

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

Le plus étonnant est que, comme la nature, cette équation produit des formes complexes d'une grande beauté, en voici deux représentations (Figure III.6), une en plan large et un zoom sur un détail et la texture lumineuse de modèle de sorbet de la version quadratique du Mandelbulb, créée par PAUL NYLANDERE et enfin des autres modèles de MANDELBROT (Figure III.7) (BOUZEBODJA.A, 2016).

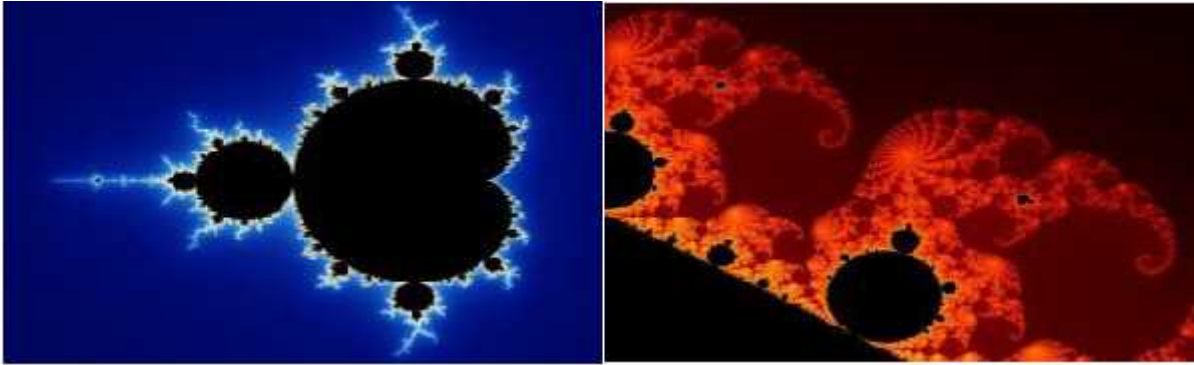


Figure III.6. Deux représentations, une en plan large et un zoom sur un détail
(BELCASTRO.P, 2009)

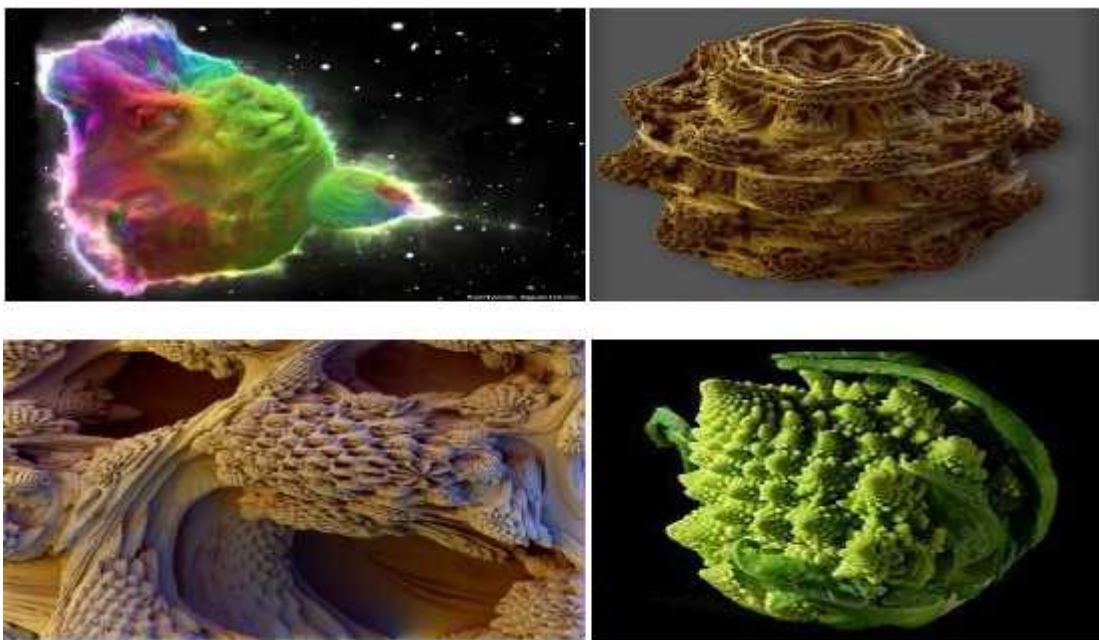


Figure III.7. La texture lumineuse de modèle de sorbet de la version quadratique du Mandelbulb (BELCASTRO.P, 2009).

III-6-7) Ensemble de Julia

La définition de cet ensemble est proche de celle l'ensemble de Mandelbrot qui est quant à lui unique tandis qu'il existe un ensemble de Julia pour chaque nombre complexe c choisi pour effectuer les calculs. L'ensemble de Julia « rempli » correspondant à une constante complexe, c et Z_0 c'est l'ensemble J_c des nombres complexes m tels que la suite des modules des termes de la suite (Z_n) définie par :

$$\begin{cases} Z_{n+1} = Z_n^2 + C \\ Z_0 = m \end{cases} \quad \text{Soit bornée} \quad \text{(III.2)}$$

On admettra que si cette suite n 'est pas bornée, alors la suite des modules tend vers l'infini:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} |Z_n| = +\infty \quad (\text{III.3})$$

Les ensembles de Julia forment une infinité d'ensembles de nombres complexes...

Les propriétés de l'ensemble de Julia ne sont pas strictement auto-similaires, elles sont parfois connexes, mais pas toujours. Il existe donc des fractales de Julia continues tandis que d'autres sont fragmentées.

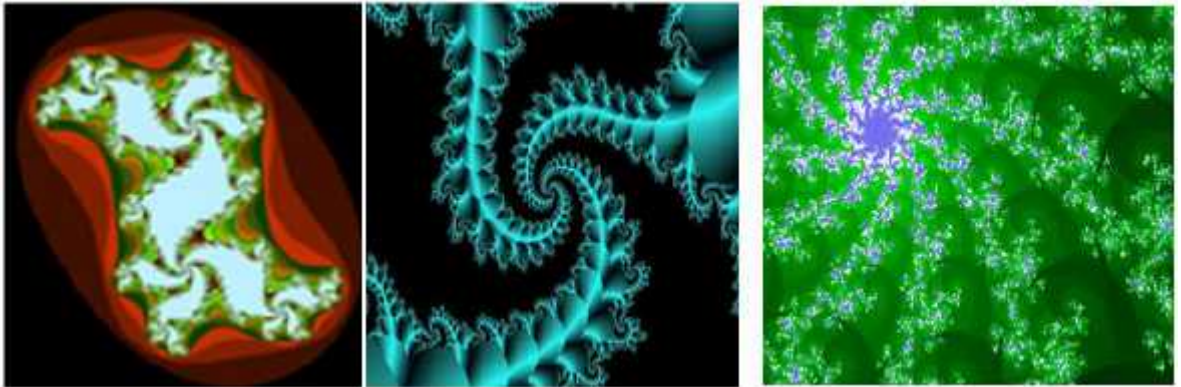


Figure III.8. Ensemble de Julia, création en spirale (BOUDET.A, 2008).

III-7) Exemple de calcul de la dimension fractale

Application sur la courbe de Von Koch (Figure III.9) (objet auto-similaire), on peut facilement évaluer D_F pour les courbes de Von Koch, où chacune des étapes d'itération fournit à chaque fois une approximation polygonale convenable. Dans le cas illustré ci-dessous, les mathématiciens trouvent, ce qui conduit aux valeurs indiquées sur la droite.

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

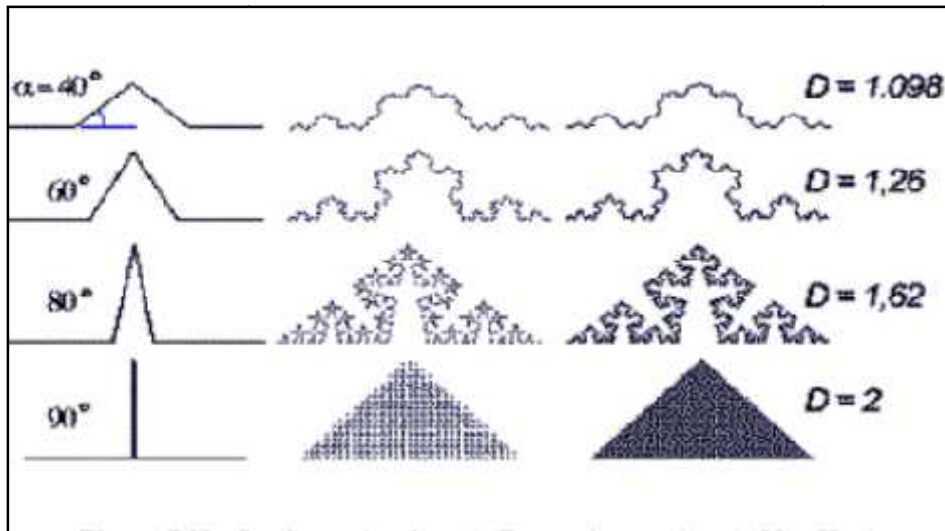


Figure III.9. La dimension fractale D pour les courbes de Von Koch (LATAGNE.K et al, 2002).

III-8) Le calcul de la dimension fractale en génie civil

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

La technique d'analyse est simple, elle consiste à réaliser un seuillage de l'image grise jusqu'à un niveau raisonnable afin d'extraire la surface du grain à partir du fond de l'image.

Puis, appliquant un certain nombre d'opérations comprenant l'ouverture, fermeture, et remplissage en blanc, l'image binaire est obtenue comme une couche au-dessus de l'image grise (Figure III.10). Cette image binaire est utilisée pour calculer la dimension fractale du grain.



Figure III.10. Exemple d'une image binaire obtenue après l'analyse d'image d'un grain de sable (ACHIR.M, 2011).

III-9) Les méthodes de calcul de la dimension fractale

Parmi les méthodes du calcul de la dimension fractale appliquées en génie civil on peut citer les méthodes suivantes :

-) Méthode de Surface-Périmètre (Area-Perimeter) (MANDELBROT.B, 1983).
-) Méthode du Diviseur (Line Divider) (MANDELBROT.B 1983).
-) Méthode des lignes parallèles (HYSLIP.J,VALLEJO.L,1997).
-) Méthode des masses (TYLER et WHEATCRAFT, 1992).
-) Méthode de compactage des boîtes (RUSSEL et al en 1980).
-) Méthode de compactage différentielle des boîtes.

Dans cette étude la méthode de compactage des boîtes (BC) et la méthode de comptage différentielle de boîtes (DBC) ont été utilisées.

III-10) Méthode de compactage des boîtes (Box Counting)

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.

Mandelbrot a montré que la distribution des fragments de roche est une distribution fractale. Comme il a aussi suggéré que la fragmentation fractale pourrait être mesurée en développant la dimension fractale de l'équation (III.4).

Cette méthode consiste à diviser l'image d'un grain en petits carrés et de dimensions identiques (faire un maillage), ainsi le contour du grain qui passe par ces boîtes est compté, et on refait la même opération mais cette fois avec des boîtes de tailles décroissantes et ainsi de suite...

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

$$N(X > x) = Kx^{-DF_{FR}} \quad (III.4)$$

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 (HUANG et ZHAN, 2002 ; WANG et al, 2006).

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 :

$$DF_{FR} = -m \quad (III.5)$$

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

III-10-1) Calcul de la dimension fractale du contour du grain seulement

Soit un grain donné, après prise de photo et traitement d'image on délimite le contour du grain et on lui applique le maillage par des carrés de dimensions identiques prédéterminées, on remarque le contour du grain et on lui applique le maillage par des carrés de dimensions identiques prédéterminées, on remarque que le contour du grain est situé à l'intérieur des grilles. Les carrés contenus dans le contour du grain sont comptés, et on refait la même opération du maillage mais cette fois-ci avec des dimensions décroissantes des cases et ainsi de suite (Figure III.11). La dimension fractale est ainsi calculée. Ce processus est répété pour chaque grain.

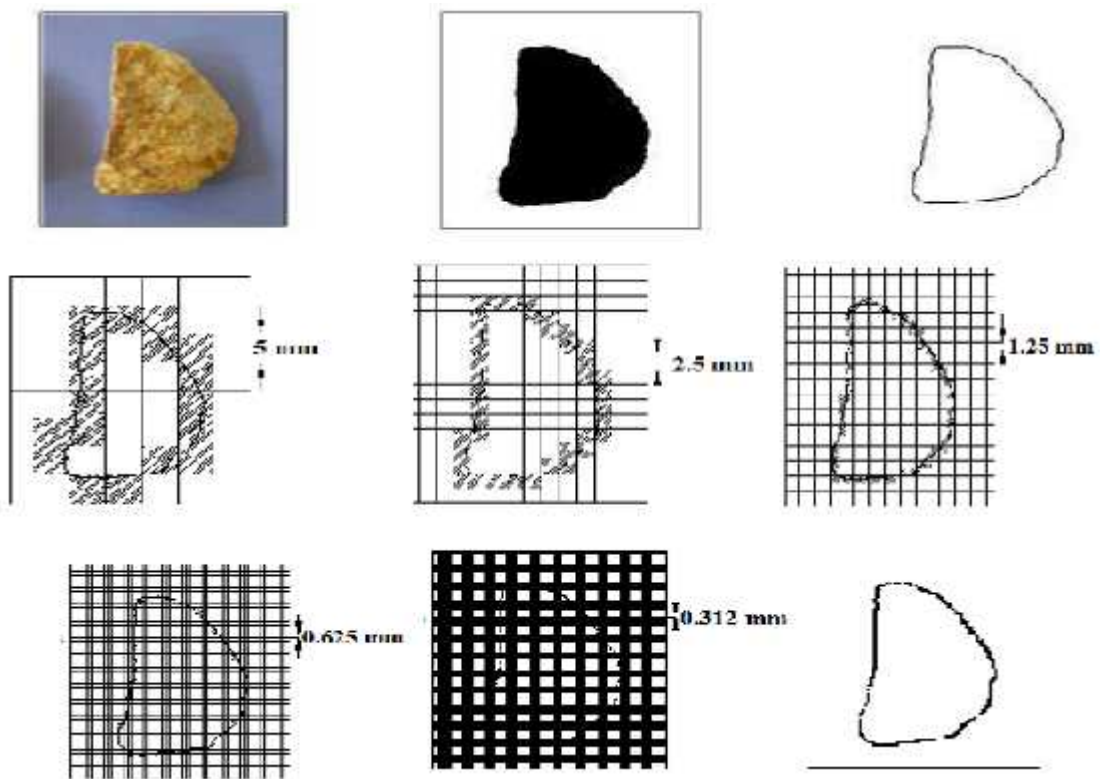


Figure III.11. Différentes étapes de maillage de l'image du grain et illustration de la méthode (OUTAYEB.S, 2016).

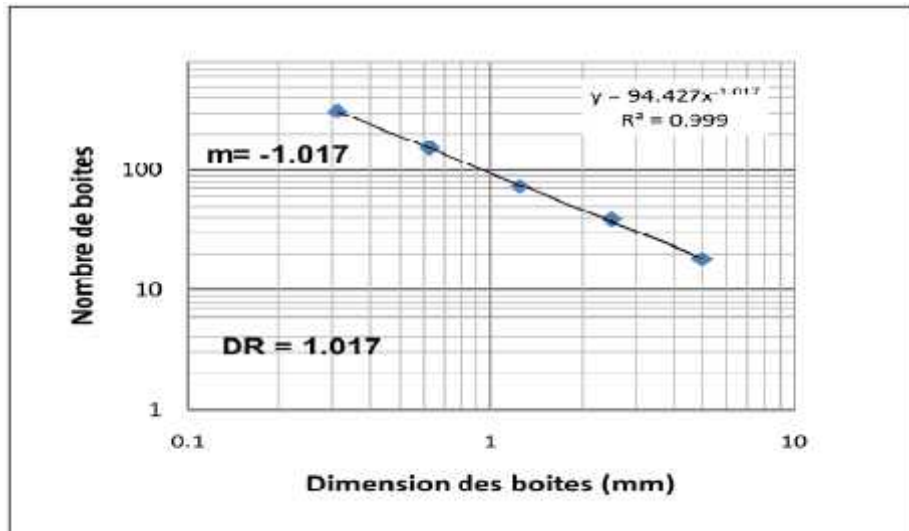


Figure III.12. Application de la méthode de Comptage des Boîtes, calcul de la dimension fractale de rugosité du contour du grain (ACHIR.M, 2011).

III-10-2) Calcul de la dimension fractale de la surface intérieure du grain

Soit le même grain donné dans la figure (III.11), on refait les mêmes opérations (maillage de l'image) que l'exemple N°1, mais cette fois-ci avec prise en compte du nombre de boîtes se trouvant à l'intérieur de la surface du grain ; voir la figure (III.13).

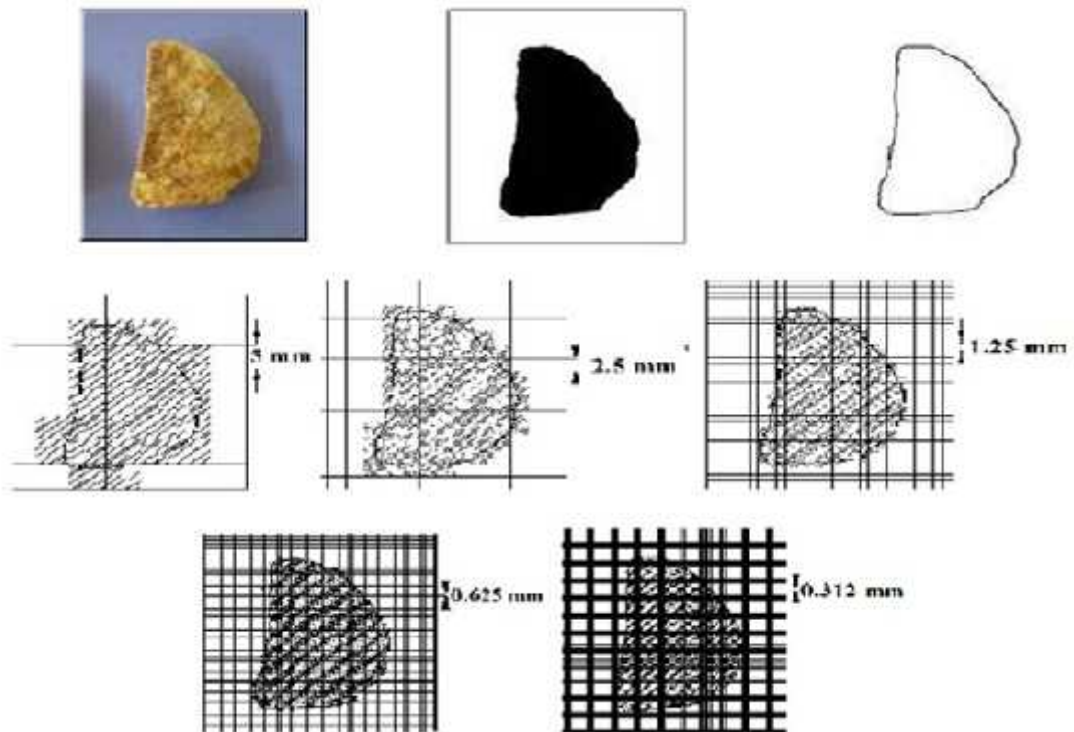


Figure III.13. Différentes étapes de maillage de l'image du grain avec prise en compte de la surface intérieure du grain (OUTAYEB.S, 2016).

III-11) Méthode de comptage différentielle de boîtes

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 :

$$\frac{M}{s} \in \mathbb{N} \quad (III.6)$$

Le rapport de partitionnement est alors :

$$r = \frac{s}{M} \quad (III.7)$$

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.14).

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

$$n_r(l, k) = l' - k' + 1 \quad (III.8)$$

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.14), nous avons :

$$S = S' = 3 \text{ et } n_r(l, k) = 6 - 1 + 1 = 6 \text{ cubes} \quad (III.9)$$

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

$$N_r = \sum_{l,k} n_r(l, k) \quad (III.10)$$

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

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

$$DF = \frac{\log(N_r)}{\log(1/r)} \quad (III.11)$$

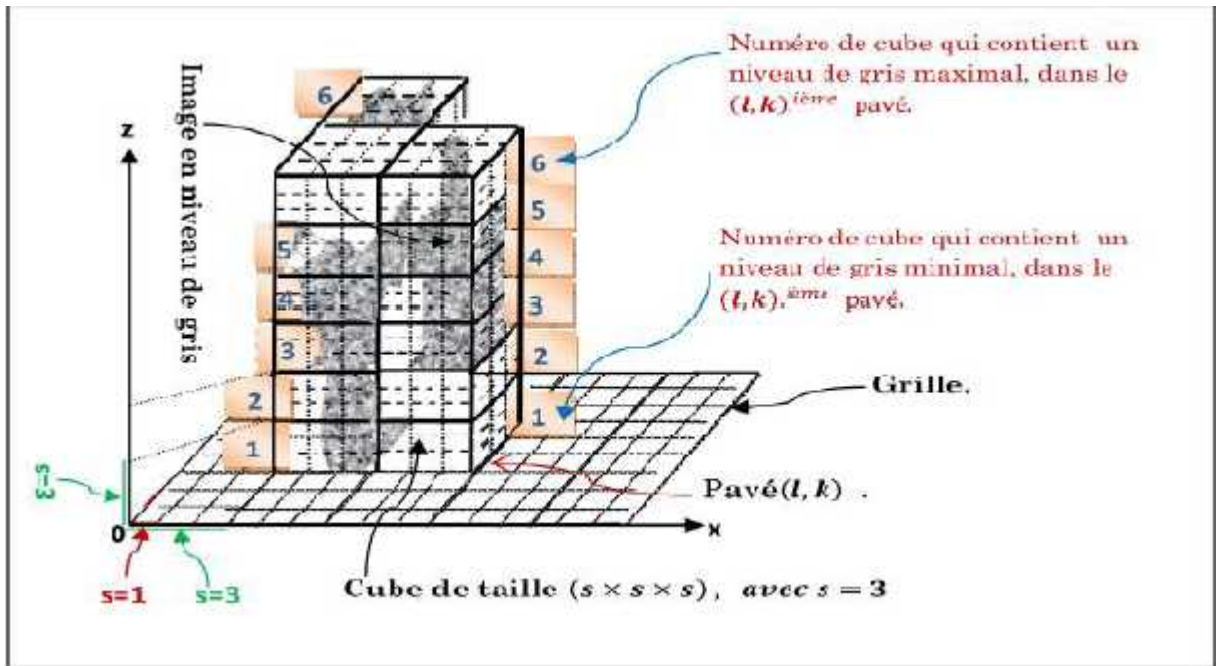


Figure III.14. Technique de Comptage Différentiel de Boîtes (CDB)
(BOUZEBOUDJA.A, 2016).

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 :

$$s' = (s \times G)/M \quad \text{(III.12)}$$

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 Nr (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.15). 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 Nr 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 :

$$\left(\frac{M}{2}\right) \quad s \quad 1 \text{ et } s' = \frac{s}{u} \quad \text{(III.13)}$$

: 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 s' afin d'avoir des cubes d'altitude «s'» très fine. $n_r(l,k)$ prend alors la forme suivante :

$$n_r(l,k) = \begin{cases} \text{ceil}\left[\frac{(l^r - k^r)}{s^r}\right] & \text{si } (l > k). \\ 1 & \text{si } (l = k). \end{cases} \quad \text{(III.14)}$$

➤ 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 :

$$\left(\log\left(\frac{1}{r}\right), \log(N_r)\right) = \left(\log\left(\frac{1}{s}\right), \log(N_s)\right) \quad \text{(III.15)}$$

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

$$s' = s = 3 \text{ et } n_r(l,k) = \left\lceil \frac{(3-2)}{3} \right\rceil = 1 \text{ cube} \quad \text{(III.16)}$$

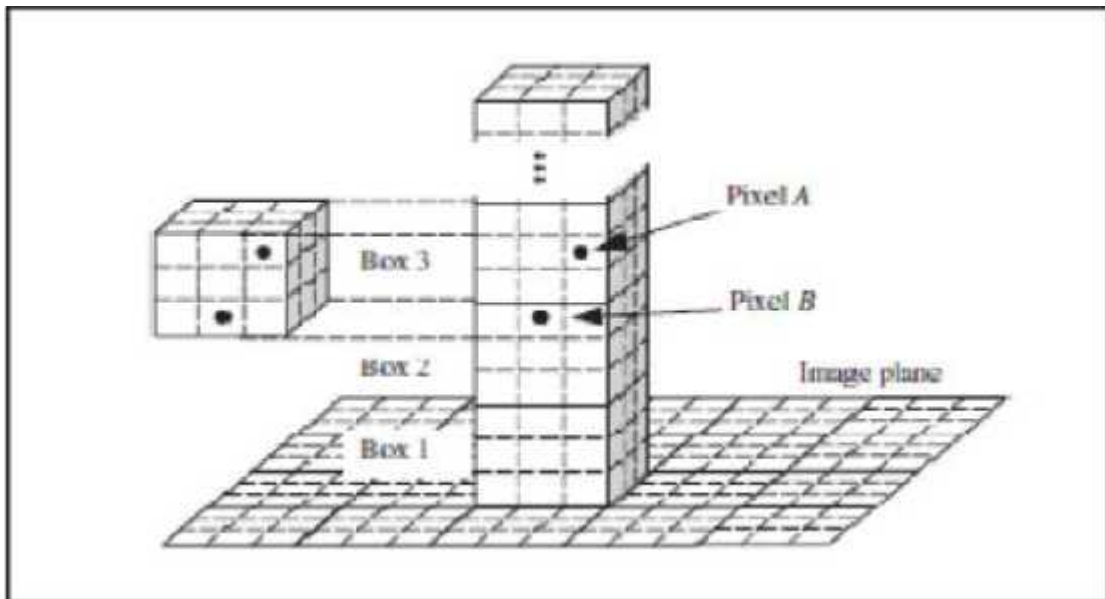


Figure III.15. Deux pixels appartenant à deux cubes différents d'altitude 3 alors que leur distance suivant (oz) est inférieure à 3 (BOUZEBODJA.A, 2016).

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 Pleshonov (PLESHANOV. V.S et al, 2010) se définit comme suit : pour une image de taille $(M \times M)$ prenant pour $\frac{M}{2}$ $s = I$, des cubes de taille $(s \times s \times s')$ tel que :

$$r = s \quad \text{(III.17)}$$

$$s = 2^g \quad \text{(III.18)}$$

$$g = 1, 2, \dots, \log(M) - 1 \quad \text{(III.19)}$$

$$G/s' = M/s \quad \text{(III.20)}$$

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 :

$$n_s(l, k) = g_{\max}(l, k) - g_{\min}(l, k) \quad \text{(III.21)}$$

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.16).

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

$$N_s = \sum_{l,k} C \left\lceil \frac{M \times (n_s(l,k))}{s \times G} \right\rceil \quad \text{(III.22)}$$

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

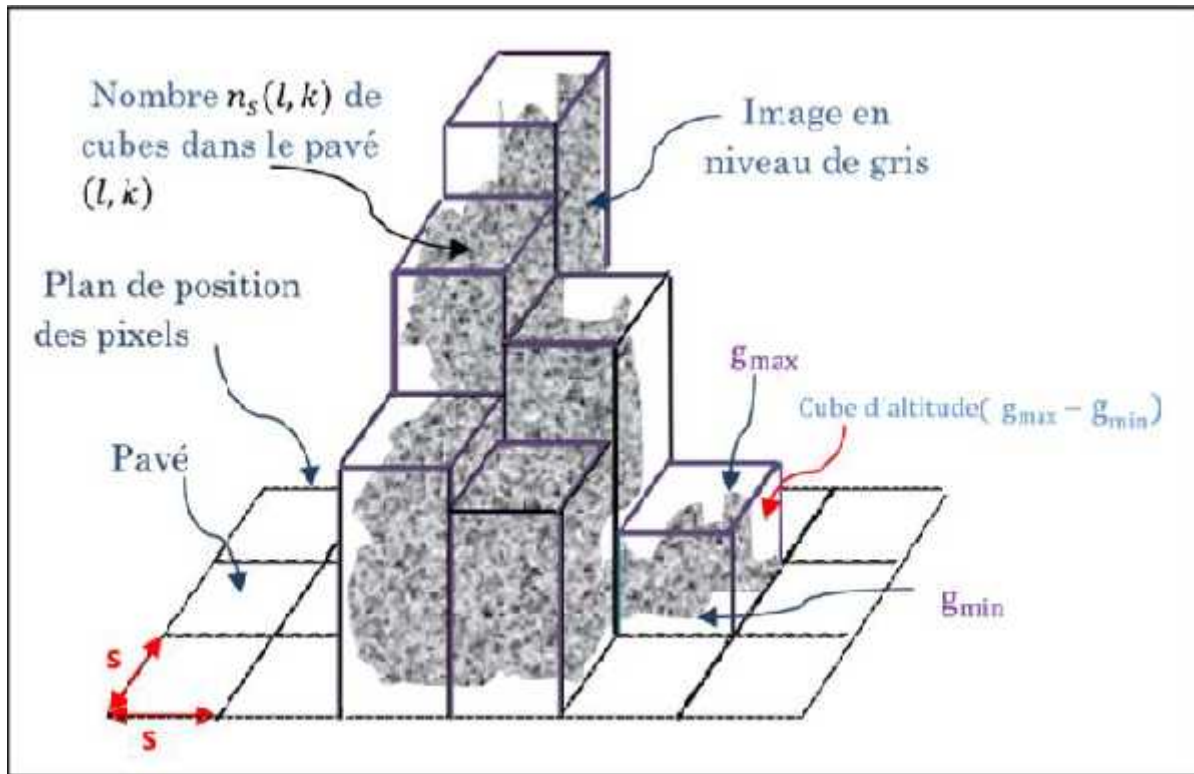


Figure III.16. Nombre N_s de cubes qui couvre l'image (BOUZEBODJA.A, 2016).

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 $r \leq M$.

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

$$n_r(i, j) = g_{\max}(i, j) - g_{\min}(i, j) \quad \text{(III.23)}$$

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

$$N_r = \sum_{i, j} c \left[\frac{M}{g} (n_r(i, j)) / r \right] \quad \text{(III.24)}$$

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 :

$$n_r(l, k) = 2 \left(\frac{\sigma(l, k)}{S^r} \right) + 1 \quad \text{(III.25)}$$

Où (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.

$$\sigma(l, k) = \sqrt{\frac{\sum_{i,j} (g(i,j) - m)^2}{N}} \quad \text{(III.26)}$$

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

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

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

III-12) Modélisation fractale de la structure du sol

C'est ainsi que l'on peut assez bien imaginer un sol formé de motte de terre se décomposant en agrégats, qui eux mêmes se décomposent en sous-agrégats similaires. L'observation de sections de ces mottes, à un plus grand niveau de résolution révèle de nouveaux détails de la structure, et le réseau des pores plus fins développé au sein des mottes présentes une forte analogie avec le réseau de macro-fissures.

Une première question se pose comment passer du stade qualitatif (cet objet fait penser à une fractale) au stade quantitatif, le quantifier par des paramètres caractéristiques d'une fractale ? Le paramètre essentiel, souvent le seul, déterminant un objet fractale est sa dimension fractale.

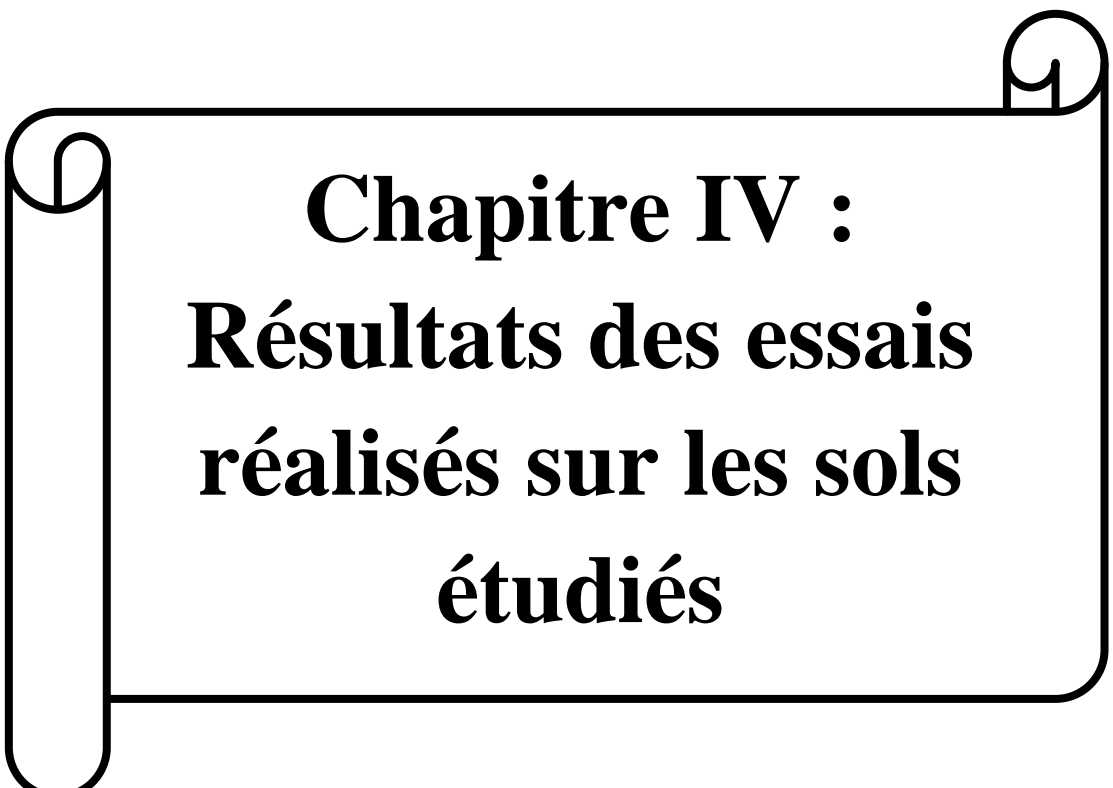
Un premier problème se pose en parcourant la littérature, abondante sur le sujet de la définition d'une dimension fractale, semble changer d'un article à l'autre et l'on se demande au premier abord si l'on mesure bien la même chose. Il ne s'agit pas ici de refaire un traité sur la géométrie fractale. Depuis l'ouvrage de référence de (MANDELBROT.B, 1982).

III-13) Conclusion

Nous avons présenté dans cette partie les différentes définitions sur les fractales et la dimension fractale. Il existe plusieurs méthodes du calcul de la dimension fractale pour la détermination de l'irrégularité de la forme et de la texture des grains ou des échantillons de sol. Elles sont basées sur les techniques d'analyse bidimensionnelles implémentées de théories fractales, elles ont montré une insuffisance dans la description de la structure géométrique de la surface du sol, de sorte que si on génère des surfaces de même forme

mais avec des dimensions fractales croissantes (par exemple 2D et 3D) on remarque une augmentation de la rugosité du sol.

La théorie fractale reste un bon moyen pour quantifier les caractéristiques du sol comme (la rugosité et la distribution dimensionnelles des particules), qui sont deux paramètres influençant sur son comportement.



Chapitre IV :
Résultats des essais
réalisés sur les sols
étudiés

IV-1) Introduction

Dans le domaine de la géotechnique, l'identification du matériau qu'on voudrait utiliser est la première étape à suivre. Cette opération se fait à l'aide des essais de laboratoire et in-situ.

Ces essais permettent la détermination des caractéristiques physiques et minéralogique du sol concerné. Ces dernières sont d'un grand intérêt, car elles servent non seulement à classer les sols mais nous renseignent aussi sur leur comportement mécanique, ce qui met à notre disposition des informations d'une extrême importance quant aux possibilités d'utilisation en construction civile.

Dans ce chapitre, on va présenter les résultats obtenus des essais d'identification des différents échantillons étudiés par deux étudiants OUAKIF.T (2017) et YAHMIL (2018) à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, ainsi que les résultats de leurs essais (Gel/dégel, dégradabilité et canicules) réalisés au laboratoire LGEA pour étudier l'influence des effets climatiques sur ces échantillons.

IV-2) Localisation géographique des marnes de la région de Tizi-Ouzou

D'après le géologue français **DANIEL RAYNOND (chercheur C.N.R.S)**, la marne est ré pondue sous tout le **Nord-Est de Tizi-Ouzou**. En effet, en carte géographique de la région de la grande Kabylie localise le gisement dans toute la vallée qui contourne le **Djebel Sidi- Balloua** et **Aissa-Mimoun**. L'étendue va de **Timizart à Mekla Nord**, de **Freha à Aghribe** vers le Nord-Est puis de **Boudjima à Makouda** vers le Nord en tirant jusqu'à **Oulad-Ouaret** par le Nord-Est et est limitée à l'Ouest par l'**Oued Sebaou**. Elle est par ailleurs sise à l'Ouest à **Dràa Ben Khedda** et **Boukhalfa**. La superficie des sites marneux est évaluée à 470 Km².

Les marnes utilisées dans cette étude ont été prélevées dans les sites suivants :

- L'échantillon N°01 est prélevé à «Boghni», date de prélèvement : 01/2018, **LNHC** (laboratoire national de l'habitat et de la construction) de **Tizi-Ouzou**; pour une réalisation d'une école, la profondeur de sondage est entre 10 m et 11,5 m.
- L'échantillon N°2 est prélevé d'un site à « Draa El Mizan » (DEM) (date de prélèvement : 01/2018 LNHC de Tizi-Ouzou) ; pour une réalisation de bâti, la profondeur de sondage est entre 13 m et 14 m.
- L'échantillon N°3 est prélevé à Tizi-Ouzou les Chabanes, (date de prélèvement : 04/2018 à une profondeur de 0m à 0.5m.

- L'échantillon N°4 est prélevé à Avenue Abane Ramdane (L'OPGI Bloc 17), (LNHC de Tizi-Ouzou), la profondeur de sondage est entre de 12 à 13 m.
- L'échantillon N°5 est prélevé à la Rue Lamali Ahmed (CHU Nedir Mohamed), (LNHC de Tizi-Ouzou), la profondeur de sondage de 5 à 6 mètres.

IV-3) Les essais d'identification

Les essais d'identification normalisés (la teneur en eau (w), la masse volumique, les limites d'Atterberg, la valeur de bleu de méthylène et l'analyse granulométrique par sédimentométrie...) sont réalisés au niveau du laboratoire pédagogique de la mécanique des sols du département de Génie Civil de l'université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou.

Dans ce chapitre, les résultats des échantillons des sols marneux N°1, N°2 et N°3 sont présentés et étudiés par YAHMIL (2018) et les échantillons N°4 et N°5 par OUAKIF.T (2017), l'ensemble de leurs caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques sont présentés dans ce qui suit.

IV-3-1) Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques correspondantes aux marnes étudiées sont présentées dans le tableau IV.1 :

Tableau IV.1. Les résultats des caractéristiques physiques (YAHMIL, 2018) et (OUAKIF.T, 2017).

Sites de prélèvement	W(%)	W _L (%)	W _P (%)	I _P (%)	I _C (%)	A _C	s(g/cm ³)	% 80µm	% 2µm	VBS
Boghni	26.42	49	25.92	23.08	0.978	1.142	2.78	99.84	20.40	7.99
DEM	12.46	49.5	25.56	23.94	1.547	1.542	2.61	95.02	15.52	7.5
Les Chabanes	2.58	45.78	20.41	25.36	1.703	1.510	2.29	99.83	16.79	6.01
L'OPGI	3.61	36.7	30.0325	6.6675	4.96	0.84	2.53	71	7.9	1
CHU Nedir	2.25	30.4	23.0769	7.3231	3.84	0.37	2.61	95	19.7	2.7

Avec : W: teneur en eau naturelle; 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 ; s: masse volumique des grains solides; VBS : valeur au bleu de Méthylène.

) Interprétation des résultats

A partir des résultats présentés dans le tableau IV.1 on constate que la marne de Boghni, DEM et Les Chabane sont des sols argileux ainsi la marne de l'OPGI est un sol limoneux, et la marne de CHU est un sol limoneux-argileux.

La limite de liquidité des marnes étudiées est comprise entre 30 et 50, ce qui indique qu'elles sont des sols moyennement plastiques comme il est présenté dans la figure IV.1.

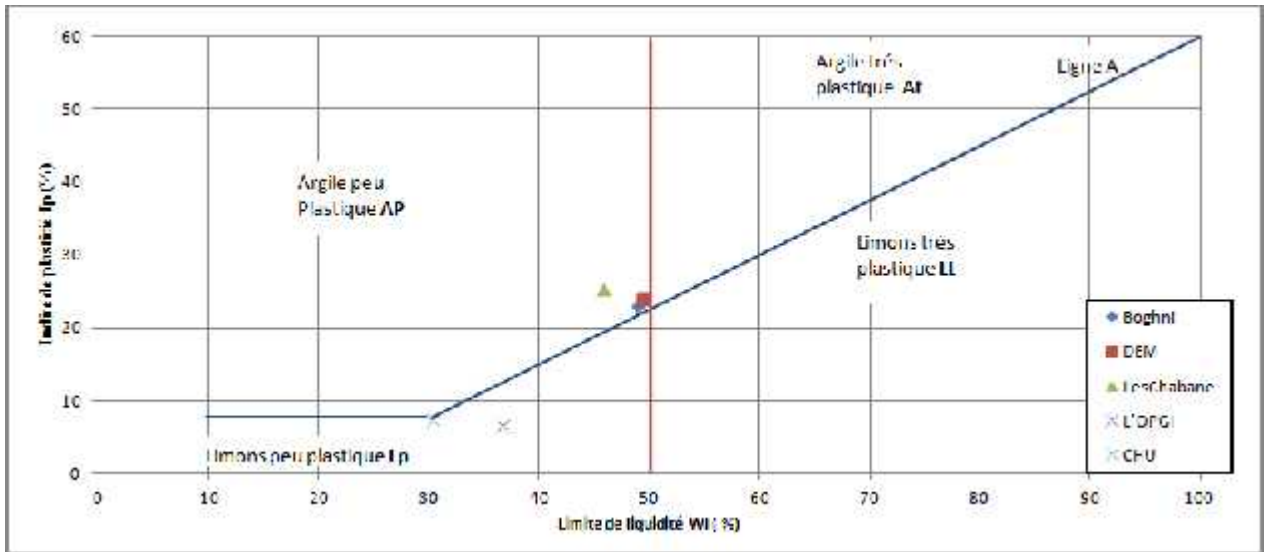


Figure IV.1. Présentation de la plasticité des sols étudiés dans l'abaque de Casagrande.

IV-3-2) Caractéristiques chimiques et minéralogiques

A/Caractéristiques chimiques des échantillons N°1, N°2 et N°3 : Réalisés au laboratoire LNHC de BOUIRA. Leurs résultats sont présentés dans le tableau IV.2.

A-1/Teneur en carbonate de calcium CaCO_3 (NF P 94 – 048) – Méthode du calcimètre

L'essai consiste à déterminer le volume de dioxyde de carbone (CO_2) dégagé sous l'action d'acide chlorhydrique en excès (dans des conditions de température et de pression atmosphériques connues) par un échantillon préparé pour l'essai (Tableau IV.2).

A-2/ Teneur en matières organiques-(NF P 94-047) - Méthode par calcination

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

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

A-3/ Sulfates solubles dans l'acide -selon la norme NF EN 1744-1(P 18-660-1)

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

La teneur en ion sulfate est exprimée en pourcentage de masse du granulat (Tableau IV.2).

A-4/ Chlorures solubles dans l'eau-NF EN 1744-1(P 18-660-1)

Une prise d'essai d'un granulat est traitée à l'eau pour en extraire les ions chlore. La méthode d'analyse du soluté est basée sur le titrage de **Volhard**, où l'on ajoute à la solution contenant les chlorures un excès d'une solution de nitrate d'argent ; la quantité n'ayant pas réagi est titrée en retour par une solution étalon de **thiocyanate**, en employant une solution de sulfate d'ammonium et de fer (III) comme indicateur. Les chlorures sont exprimés et rapportés en teneur en ion chlore en pourcentage massique du granulat (Tableau IV.2).

Tableau IV.2. Résultats finales pour les caractéristiques chimiques

Sites	CaCO ₃ (%)	MO(%)	SO ₄ (%)	Cl(%)
Boghni	10.10	0.97	traces	traces
DEM	25	5.01	traces	traces
Les Chabane	40.62	1.3	1.8	traces

B/ Caractéristiques minéralogiques pour les échantillons N°4 et N°5

Détermination et identification des minéraux des échantillons N°4 et N°5 des marnes étudiées par la méthode de diffraction **aux rayons X** (Figure IV.3 et IV.4).

- Modalités des essais : ANALYSES PAR DIFFRACTION AUX RAYONS X.
- Appareillage utilisé : DIFFRACTOGRAMME XPERT-PRO.
- Logiciel : DATA COLLECTOR, HIGHT SCORE.

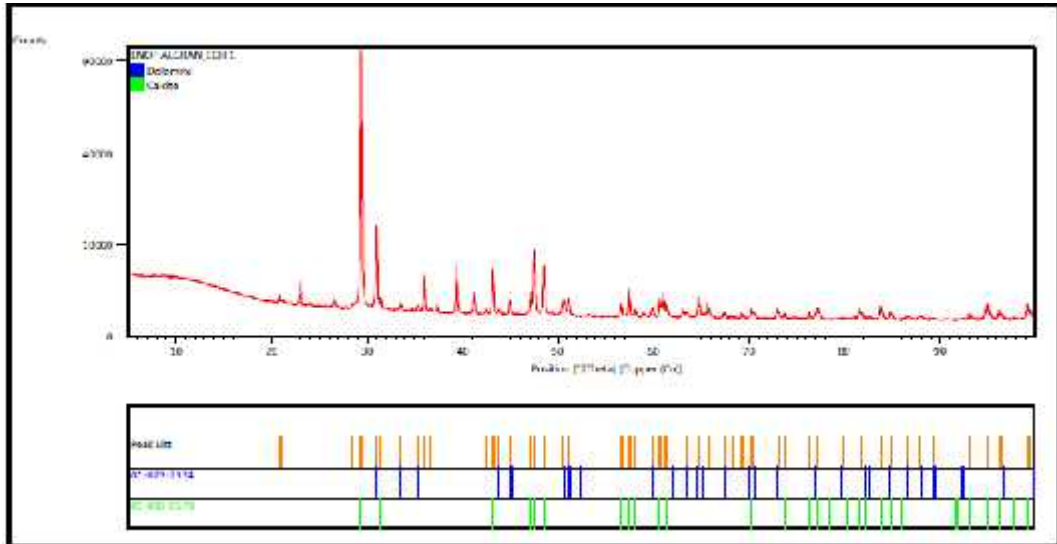


Figure IV.2. Diffractogramme aux rayons X de la marne 4.

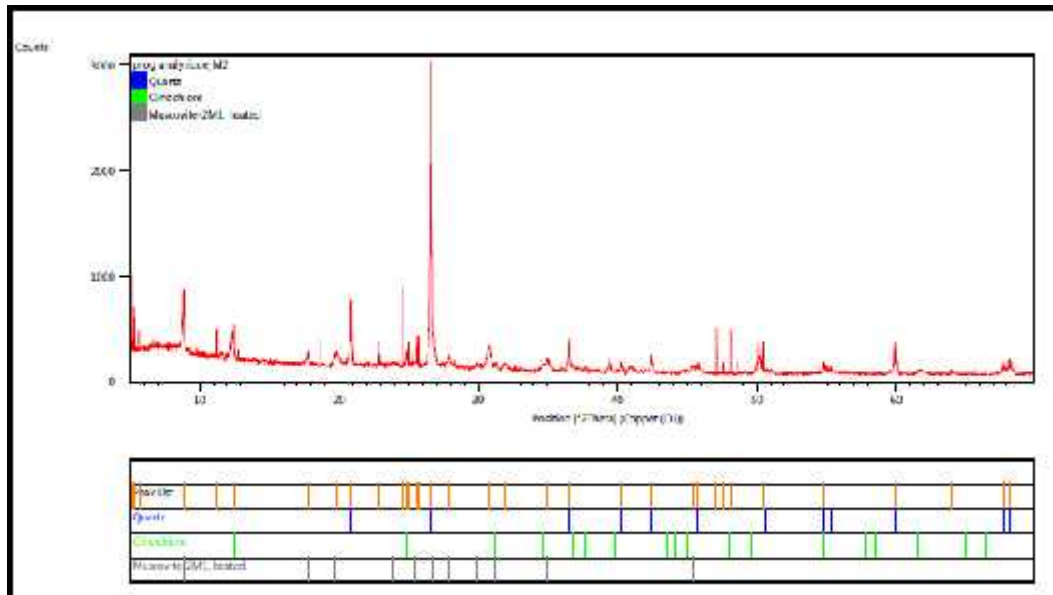


Figure IV.3. Diffractogramme aux rayons X de la Marne 5.

L'analyse des échantillons par la méthode de diffraction aux rayons X montre la composition minéralogique suivante :

-La Marne 4 est principalement composée par le quartz, la chlorite-serpentine et la muscovite (Figure IV.2).

-La Marne 5 est formée essentiellement par le quartz, le clinoclone et la muscovite (Figure IV.3).

IV-4) Les essais des effets climatiques au laboratoire

IV-4-1) Essai Gel-Dégel

IV-4-1-1) Principe de l'essai

Après avoir imbibé les échantillons à la pression atmosphérique, ils sont soumis à 10 cycles de gel-dégel. Chaque cycle comporte un refroidissement à $-17.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ et un dégel à une température de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. On étudie les sols après chaque cycle et on calcule le changement de leur dimension fractale.

Remarque

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

IV-4-1-2) 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 de 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.

On a choisi un échantillon naturel comme échantillons témoin pour chaque site.

IV-4-1-3) Images des échantillons

- Site Boghni



Figure IV.4. Marne de Boghni à l'état naturel.



Figure IV.5. Echantillon 1 après l'étuve.



Figure IV.6. Echantillon 2 après l'étuve.



Figure IV.7. Echantillon témoin après 5 cycles de Gel-Dégel.



Figure IV.8. Echantillon 1-2 après 5 cycles de Gel-Dégel.



Figure IV.9. Echantillon témoin après 10 cycles de Gel-Dégel.



Figure IV.10. Echantillon 1 après 10 cycles de Gel-Dégel.



Figure IV.11. Echantillon 2 après 10 cycles de Gel-Dégel.



Figure IV.12. Echantillon témoin à 48h après l'essai.



Figure IV.13. Echantillon 1 à 48h après l'essai.



Figure IV.14. Echantillon 2 à 48h après l'essai.

➤ **Site Draa-El-Mizan (DEM)**



Figure IV.15. Marne DEM à l'état naturel.



Figure IV.16. Echantillon 1 après l'étuve.



Figure IV.17. Echantillon 2 après l'étuve.



Figure IV.18. Echantillon témoin après 5 cycles de Gel-Dégel.



Figure IV.19. Echantillon 1-2 après 5 cycles de Gel-Dégel.

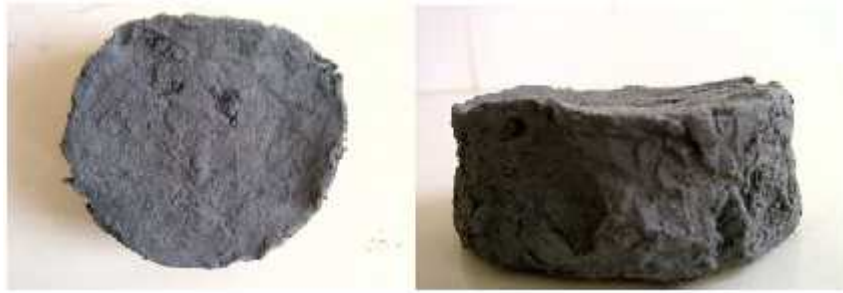


Figure IV.20. Echantillon témoin après 10 cycles de Gel-Dégel.



Figure IV.21. Echantillon 1 après 10 cycles de Gel-Dégel.



Figure IV.22. Echantillon 2 après 10 cycles de Gel-Dégel.

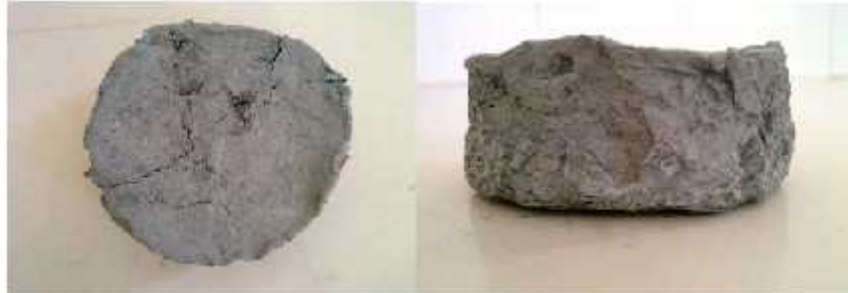


Figure IV.23. Echantillon témoin à 48h après l'essai.



Figure IV.24. Echantillon 1 à 48h après l'essai.

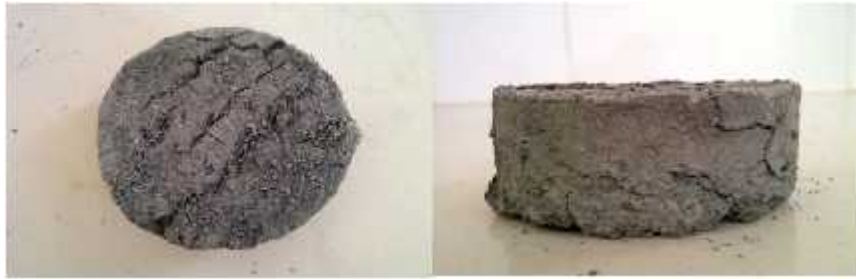


Figure IV.25. Echantillon 2 à 48h après l'essai.

➤ **Site les Chabane :**

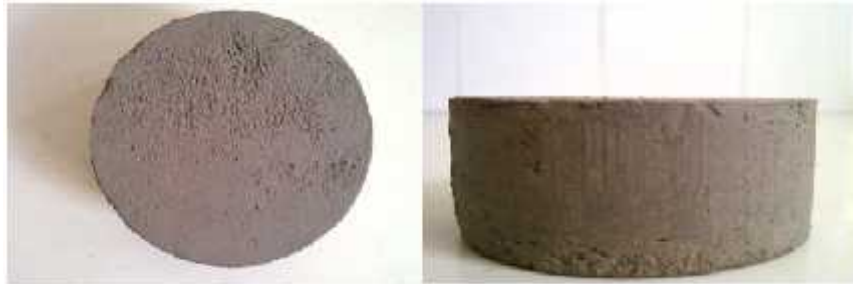


Figure IV.26. Marne Les Chabane à l'état naturel.



Figure IV.27. Echantillon 1 après l'étuve.



Figure IV.28. Echantillon 2 après l'étuve.



Figure IV.29. Echantillon témoin après 5 cycles de Gel-Dégel.



Figure IV.30. Echantillon 1-2 après 5 cycles de Gel-Dégel.

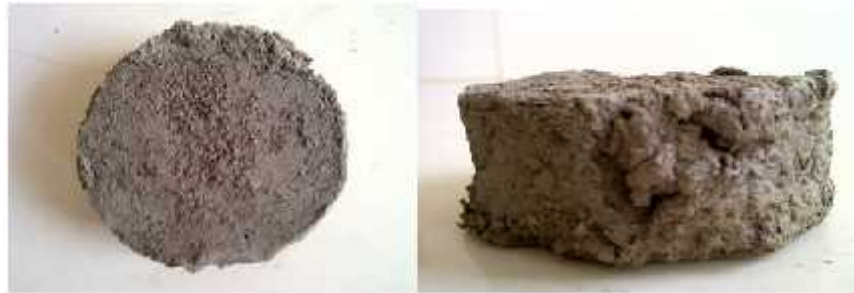


Figure IV.31. Echantillon témoin après 10 cycles de Gel-Dégel.



Figure IV.32. Echantillon 1 après 10 cycles de Gel-Dégel.



Figure IV.33. Echantillon 2 après 10 cycles de Gel-Dégel.



Figure IV.34. Echantillon témoin à 48h après l'essai.



Figure IV.35. Echantillon 1 à 48h après l'essai.



Figure IV.36. Echantillon 2 à 48h après l'essai.

➤ **Site de l'OPGI**



Figure IV.37. Echantillon 1 avant l'étuvage.



Figure IV.38. Echantillon 2 avant l'étuvage.



Figure IV.39. Echantillon 1 après l'étuvage.



Figure IV.40. Echantillon 2 après l'étuvage.



Figure IV.41. Echantillons 1 et 2 après 5 cycles de gel/dégel.



Figure IV.42. Echantillon 1 à la fin de l'essai gel/dégel.



Figure IV.43. Echantillon 2 à la fin de l'essai gel/dégel.

➤ Site CHU Nedir Mohamed



Figure IV.44. Echantillon 1 après l'étuve.



Figure IV.45. Echantillon 2 après l'étuve.



Figure IV.46. Echantillons 1 et 2 après 5 cycles de gel/dégel.



Figure IV.47. Echantillon 1 à la fin de l'essai gel/dégel.



Figure IV.48. Echantillon 2 à la fin de l'essai gel/dégel.

IV-4-1-4) Les résultats obtenus

Les résultats relevés avant l'essai (état naturel), après étuvage et à la fin d'essai de l'enceinte climatique (on a laissé les échantillons pendant 48h pour qu'on puisse démolir les tares), sont présentés ci-dessous (Tableau IV.3 et Figure IV.49).

Tableau IV.3. Les masses de tous les échantillons durant l'essai de Gel-Dégel.

		avant l'essai (g)	après l'étuve (g)	Fin de l'essai (g)
Boghni	Echantillon 1	156.250	122.704	163.039
	Echantillon 2	155.451	120.407	160.100
DEM	Echantillon 1	174.121	150.859	180.421
	Echantillon 2	179.613	158.147	183.107
Les Chabane	Echantillon 1	163.438	144.169	170.727
	Echantillon 2	169.529	148.462	174.521
L'OPGI	Echantillon 1	186.002	179.513	193.490
	Echantillon 2	179.213	173.722	185.004
CHU Nedir Mohamed	Echantillon 1	207.368	202.776	199.980
	Echantillon 2	171.126	169.229	174.002

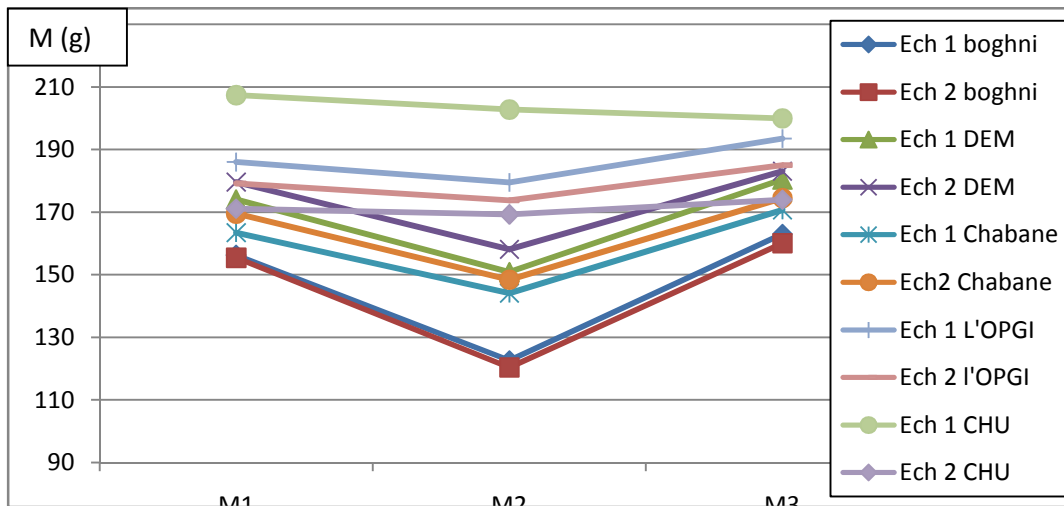


Figure IV.49. Variation de la masse de tous les échantillons au cours d'essai Gel-Dégel.

IV-4-1-5) Interprétation des résultats

L'évolution de l'état de la structure et de la texture des échantillons est suivie au cours des cycles d'essai par une prise de photos au début et à la fin de chaque cycle. Les observations ont montré une apparition des fissures de différentes tailles dans les échantillons.

D'après les résultats obtenus au cours de cet essai on remarque une diminution de la masse des sols étudiés après l'étuvage, ça s'explique par l'évaporation d'eau que constitue le sol,

comme on a constaté que les masses ont augmenté à la fin de l'essai, cela s'explique par le fait que les marnes ont absorbé de l'eau pendant la phase du gel (Figure IV.49).

IV-4-2) Essai de Dégradabilité

IV-4-2-1) 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.

IV-4-2-2) Le déroulement de l'essai

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

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

-Séchage pendant 16h ; Après chaque phase d'immersion et avant introduction de l'échantillon dans l'étuve, on procède au siphonage de l'eau restant dans le bac métallique jusqu'à ce qu'il n'y ait pas risque d'entraînement de particules solides dans l'écoulement.

On pèse les échantillons sans les particules fines à la fin de chaque cycle.



Figure IV.50. Mouillage des échantillons à l'aide d'une seringue.

IV-4-2-3) Les différentes images obtenus au cours de l'essai

1- Site Boghni



Figure IV.51. Marne de Boghni à l'état naturel.



Figure IV.52. Marne de Boghni après le 1^{er} cycle.



Figure IV.53. Marne de Boghni après le 2^{ème} cycle.



Figure IV.54. Marne de Boghni après le 3^{ème} cycle.



Figure IV.55. Marne de Boghni après le 4^{ème} cycle.

2- Site Draa El Mizan



Figure IV.56. Marne de DEM à l'état naturel.



Figure IV.57. Marne de DEM après le 1^{er} cycle.



Figure IV.58. Marne de DEM après le 2^{ème} cycle.



Figure IV.59. Marne de DEM après le 3^{ème} cycle.



Figure IV.60. Marne de DEM après le 4^{ème} cycle.

3- Site Les Chabane



Figure IV.61. Marne Les Chabane à l'état naturel.



Figure IV.62. Marne Les Chabanes après le 1^{er} cycle.



Figure IV.63. Marne Les Chabane après le 2^{ème} cycle.



Figure IV.64. Marne Les Chabane après le 3^{ème} cycle.



Figure IV.65. Marne Les Chabane après le 4^{ème} cycle.

4- Site l'OPGI

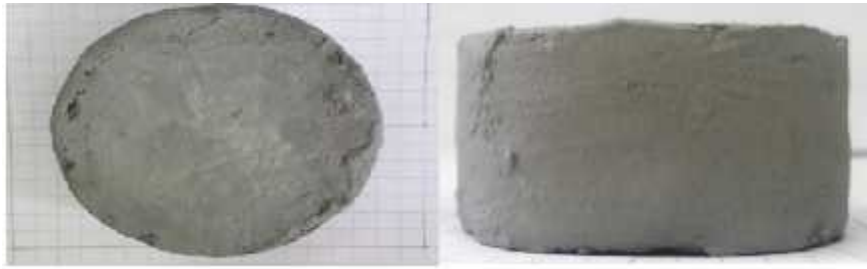


Figure IV.66. Echantillon 1 marne l'OPGI avant essai.



Figure IV.67. Echantillon 2 marne de l'OPGI avant essai.



Figure IV.68. Echantillon 1 marne de l'OPGI après le 1^{er} cycle.



Figure IV.69. Echantillon 2 marne de l'OPGI après le 1^{er} cycle.



Figure IV.70. Echantillon 1 marne de l'OPGI après le 2^{ème} cycle.



Figure IV.71. Echantillon 2 marne de l'OPGI après le 2^{ème} cycle.



Figure IV.72. Echantillon 1 marne de l'OPGI après le 3^{ème} cycle.



Figure IV.73. Echantillon 2 marne de l'OPGI après le 3^{ème} cycle.



Figure IV.74. Echantillon 1 marne de l'OPGI après le 4^{ème} cycle.



Figure IV.75. Echantillon 2 marne de l'OPGI après le 4^{ème} cycle.

5- Site CHU Nedir Mohamed



Figure IV.76. Echantillon 1 marne de CHU avant essai.



Figure IV.77. Echantillon 2 marne de CHU avant essai.



Figure IV.78. Echantillon 1 marne de CHU après le 1^{er} cycle.



Figure IV.79. Echantillon 2 marne de CHU après le 1^{er} cycle.



Figure IV.80. Echantillon 1 marne de CHU après le 2^{ème} cycle.



Figure IV.81. Echantillon 2 marne de CHU après le 2^{ème} cycle.



Figure IV.82. Echantillon 1 marne de CHU après le 3^{ème} cycle.



Figure IV.83. Echantillon 2 marne de CHU après le 3^{ème} cycle.



Figure IV.84. Echantillon 1 marne de CHU après le 4^{ème} cycle.



Figure IV.85. Echantillon 2 marne de CHU après le 4^{ème} cycle.

)] **Interprétation des résultats**

Le principe d'essai consiste à exposer alternativement les échantillons aux cycles de séchages-émersions. L'évolution de leur état est suivi au cours des cycles de séchage-émersion, par une prise de photos à la fin de chaque cycle. Les observations ont montré un gonflement volumique irréversible de tous les échantillons durant le premier et le deuxième cycle, ainsi qu'un changement de leur structure. Les fissures commencent à s'ouvrir, à partir du premier cycle, elles réapparaissent à chaque phase de séchage. Les échantillons ont subi un retrait cumulé au cours des cycles de séchage-émersions et l'élargissement des fissures est favorisé dans les plans de faiblesse préexistants sur la surface et à l'intérieur des échantillons.

IV-4-2-4) 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.4. Variation de la masse des échantillons au cours de l'essai de Dégradabilité.

Sites	Boghni	DEM	Les Chabane	L'OPGI		CHU	
				Echant 1	Echant 2	Echant 1	Echant 2
Avant l'essai	156.350	168.131	174.022	192,492	196,785	199,980	211,661
Après 1 ^{er} cycle	127.895	148.363	153.155	183,706	191,094	167 ,632	171,326
Après 2 ^{eme} cycle	127.097	147.863	153.055	183 ,606	190.940	167,537	171,229
Après 3 ^{eme} cycle	126.697	147.764	152.656	183,546	190.894	168,530	171,165
Après 4 ^{eme} cycle	125.799	146.665	149.960	183,146	190.795	167,502	171,026

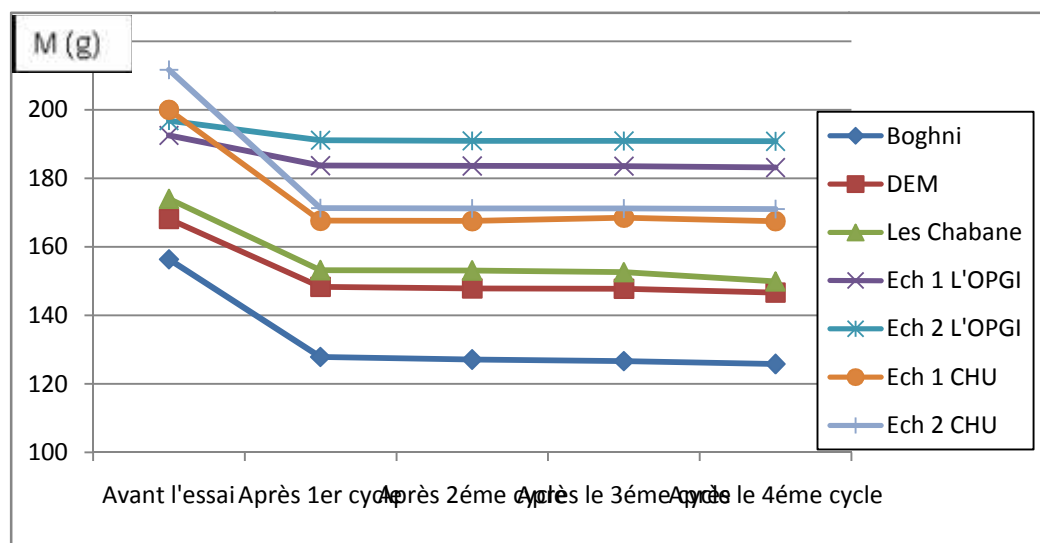


Figure IV.86. Variation des masses des échantillons au cours de l'essai de Dégradabilité.

J) **Interprétation des résultats**

Les résultats obtenus (Tableau IV.4) ont montré que les masses des échantillons diminuent après chaque cycle, c'est dû au phénomène de retrait-gonflement, qui a un rôle très important pour ces pertes.

IV-4-3) Essai aux canicules (pour les marnes de Boghni, DEM, Les Chabane)

IV-4-3-1) Principe d'essai

Après avoir imbibé les échantillons à la pression atmosphérique, ils sont soumis à 10 cycles de jour-nuit. Chaque cycle comporte un refroidissement à 20 °C et un réchauffement à une température de 57°C. On étudie les sols après chaque cycle et on calcule l'évolution de leur dimension fractale.

IV-4-3-2) Déroulement d'essai

Après avoir préparé les échantillons, il y a une procédure à suivre avant de poser les échantillons dans l'enceinte climatique qu'on a divisé en trois étapes :

1^{er} étape représente la saison d'hiver, on a imbibé les échantillons jusqu'à saturation à la pression atmosphérique pendant trois jours.

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

Et la dernière étape, les échantillons sont soumis aux canicules du mois de Juillet et le mois d'Août les mois les plus chauds de l'année, à l'aide du bulletin de la station météorologique de la wilaya de Tizi-Ouzou sis à Boukhalfa on a programmé l'enceinte climatique comme suit:

- J) Une température de 57c⁰, le degré d'humidité est de 30% et le degré de ventilation est 24% pendant 10h.
- J) Une température de 20c⁰, le degré d'humidité est de 75% et le degré de ventilation est 24% pendant 14h.

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

IV-4-3-3) Les images retenues des échantillons

1- Site Boghni



Figure IV.87. Site Boghni à l'état naturel.



Figure IV.88. Echantillon 1 après l'étuve.



Figure IV.89. Echantillon 2 après l'étuve.



Figure IV.90. Echantillon 1 à la fin de l'essai.



Figure IV.91. Echantillon 2 à la fin de l'essai.

2- Site Draa El Mizan



Figure IV.92. Site DEM à l'état naturel.



Figure IV.93. Echantillon 1 après l'étuve.



Figure IV.94. Echantillon 1 à la fin de l'essai.

3- Site Les Chabane



Figure IV.95. Site Les Chabane à l'état naturel.



Figure IV.96. Echantillon 1 après l'étuve.



Figure IV.97. Echantillon 2 après l'étuve.



Figure IV.98. Echantillon 1 à la fin de l'essai.



Figure IV.99. Echantillon 2 à la fin de l'essai.

) **Interprétation des résultats**

Le principe d'essai consiste à exposer alternativement les échantillons aux cycles de réchauffement -refroidissement.

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 observations ont montré un gonflement volumique irréversible de tous les échantillons durant la période d'imbibition jusqu'à saturation, et après l'étuve on a constaté l'apparition des microfissures qui se développent au cours de l'essai jusqu'à le dernier cycle ainsi qu'un changement de leur structure.

On peut dire que le phénomène a été engendré lorsque les minéraux se transforment et déclenchent le phénomène de retrait-gonflement (généralement la montmorillonite qui a des potentiels élevés pour le gonflement).

IV-4-3-4) Les résultats obtenus

Les résultats relevés avant l'essai (état naturel), après étuvage et à la fin d'essai de l'enceinte climatique sont présentés ci-dessous :

Tableau IV.5. Variation de la masse des échantillons sous l'effet des canicules.

		avant l'essai (g)	après l'étuve (g)	Fin de l'essai (g)
Boghni	Echantillon 1	153.854	146.270	133.187
	Echantillon 2	167.033	149.452	140.974
DEM	Echantillon 1	180.811	170.140	162.041
Les Chabane	Echantillon 1	175.919	165.100	155.052
	Echantillon 2	173.423	164.212	154.353

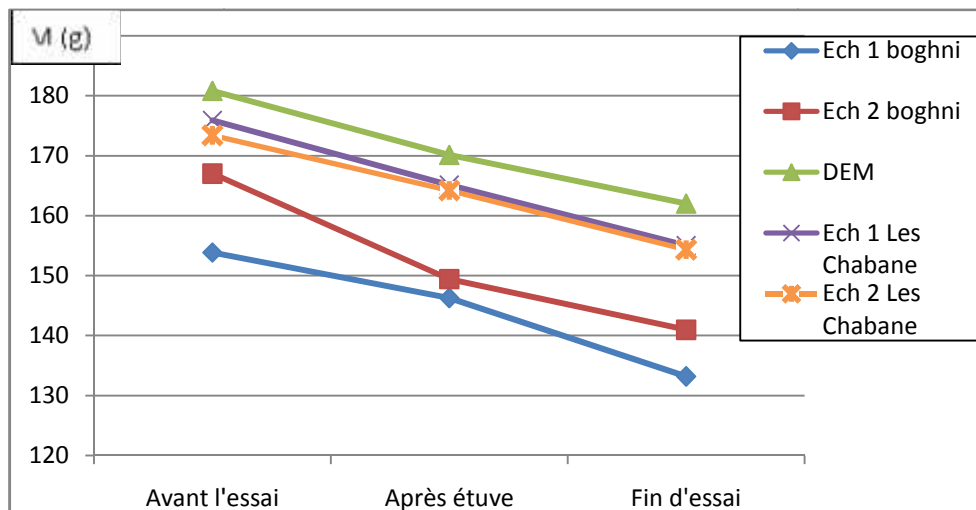


Figure IV.100. Variation de la masse des échantillons de (Boghni, DEM, Les Chabane) au cours d'essai aux canicules.

) Interprétation des résultats

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

IV-5) Conclusion

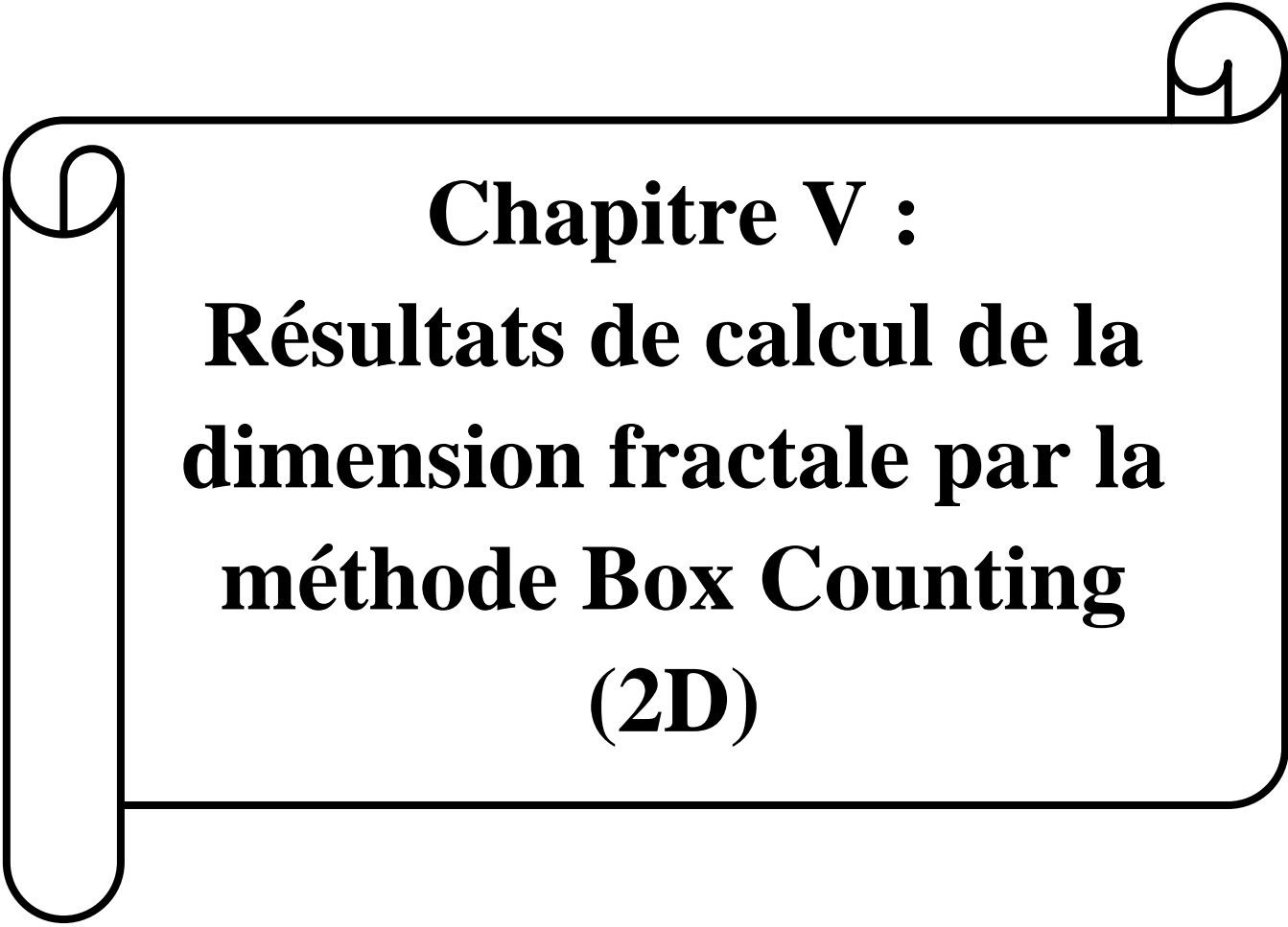
Dans ce chapitre on a présenté la nature de différents échantillons utilisés par les résultats des essais d'identification (caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques).

Les sollicitations saisonnières cycliques étudiés ; les effets de retrait-gonflement sur les échantillons et les fissures et même le changement de la texture et de la structure des

échantillons, qui ont progressé pendant le déroulement des essais ont été représentés dans ce chapitre.

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

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



Chapitre V :
Résultats de calcul de la
dimension fractale par la
méthode Box Counting
(2D)

V-1) Introduction

La complexité de la géométrie des grains de sol (forme, sphéricité, angularité, rugosité, pores, fissures, distribution en taille et diamètre...) et leur changement sous les effets climatiques cycliques jouent un rôle très important dans le comportement mécanique des matériaux, Il devient essentiel de les étudier pour les comprendre davantage. Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats des différentes mesures de la dimension fractale calculée par les étudiants YAHMIL (2018) et OUKIF.T (2017) dans leur projet de fin d'étude.

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

V-2) Application de la méthode de Box Counting

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

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

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

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

Exemple de calcul de la dimension fractale par le logiciel MATLAB R2009b (Figure V.1) :

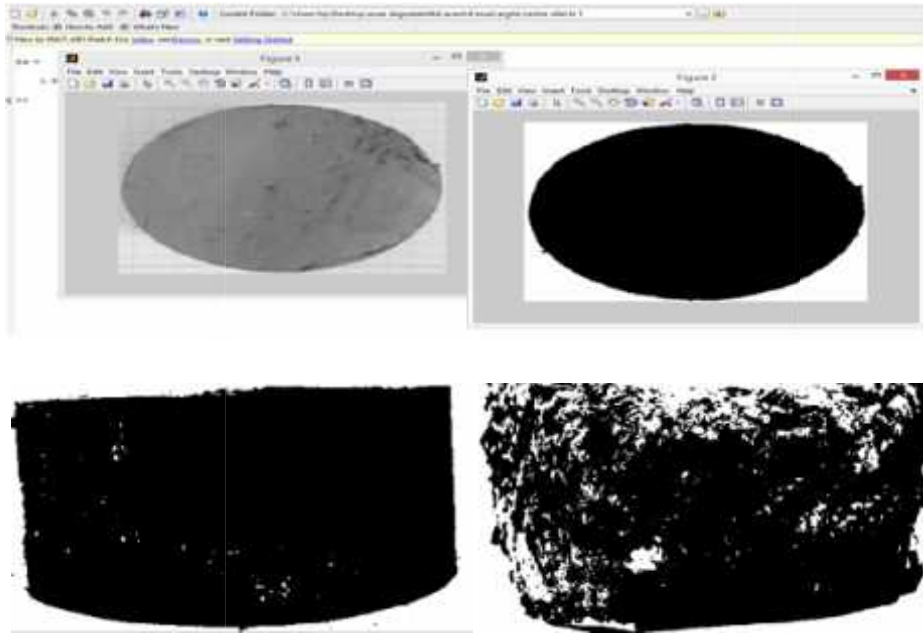


Figure V.1. Les étapes de calcul de la dimension fractale par le logiciel MATLAB.

V-3) Résultats et interprétations

V-3-1) Essai de Gel-Dégel

1- Marne Boghni

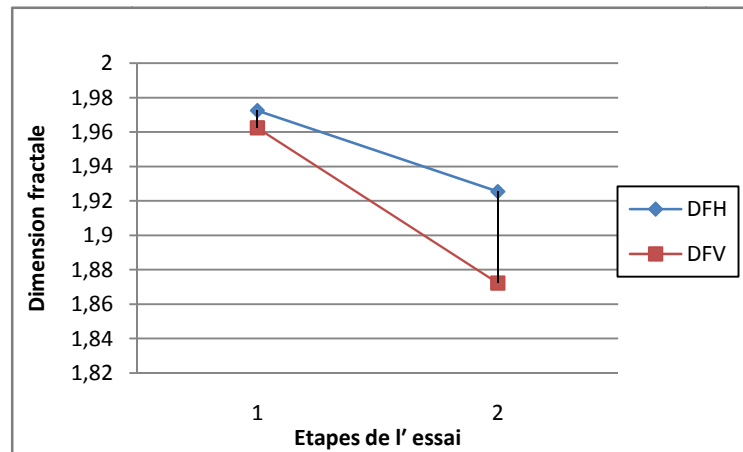


Figure V.2. Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon témoin.

Tableau V.1. Résultats de la dimension fractale verticale et horizontale de l'échantillon 1.

	Etapes de l'essai	Surface H	Surface V
1	Avant (naturel)	1,9775	1,8831
2	Après l'étuve	1,8466	1,8111
3	10 ^{ème} cycle (à 48h)	1,7871	1,7942

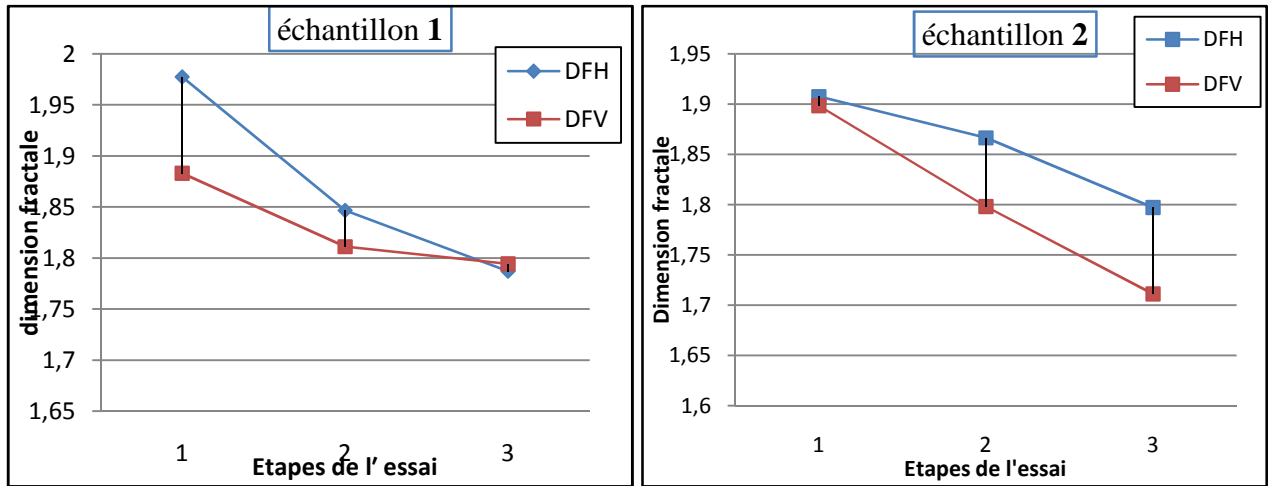


Figure V.3. Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour les échantillons 1 et 2.

2- Marne Draa El Mizan

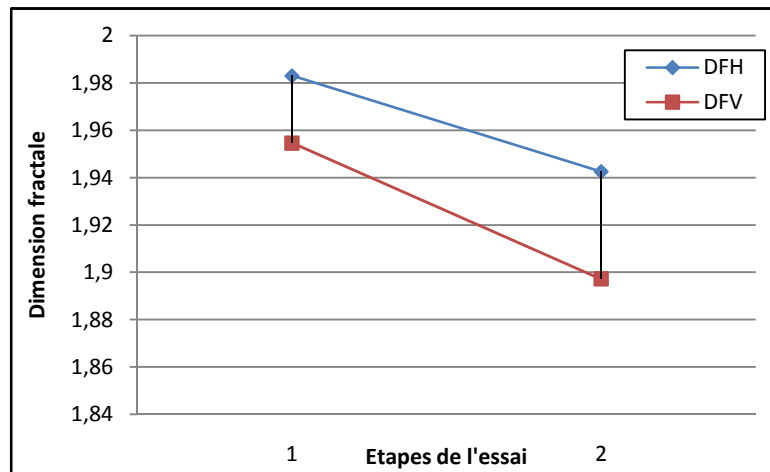


Figure V.4. Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon témoin.

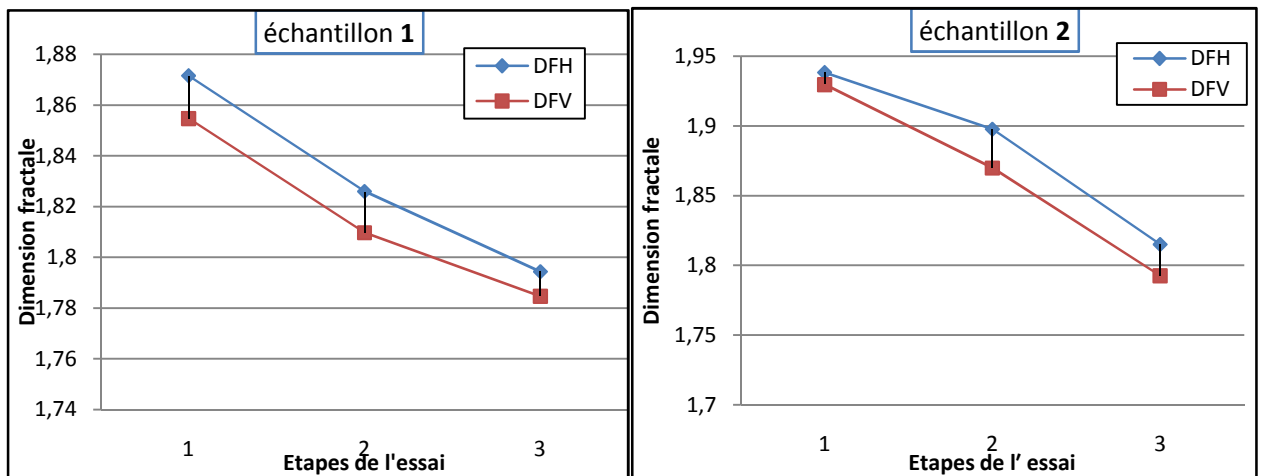


Figure V.5. Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour les échantillons 1 et 2.

3- Marne Les Chabane

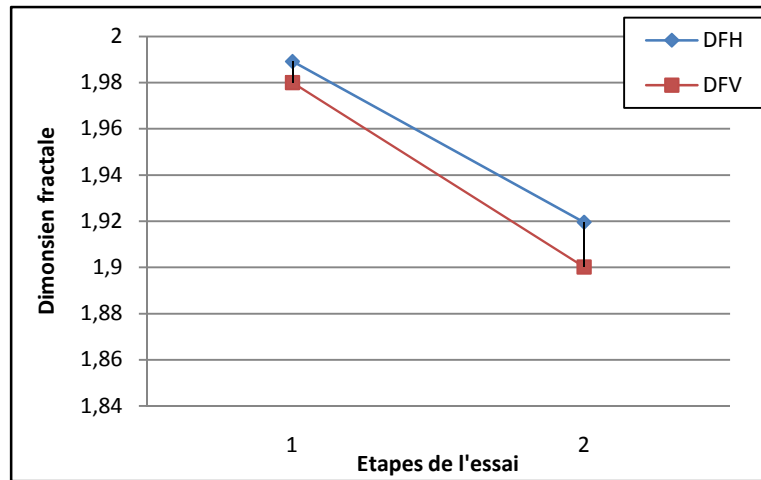


Figure V.6. Variation de la dimension fractale de l'échantillon témoin.

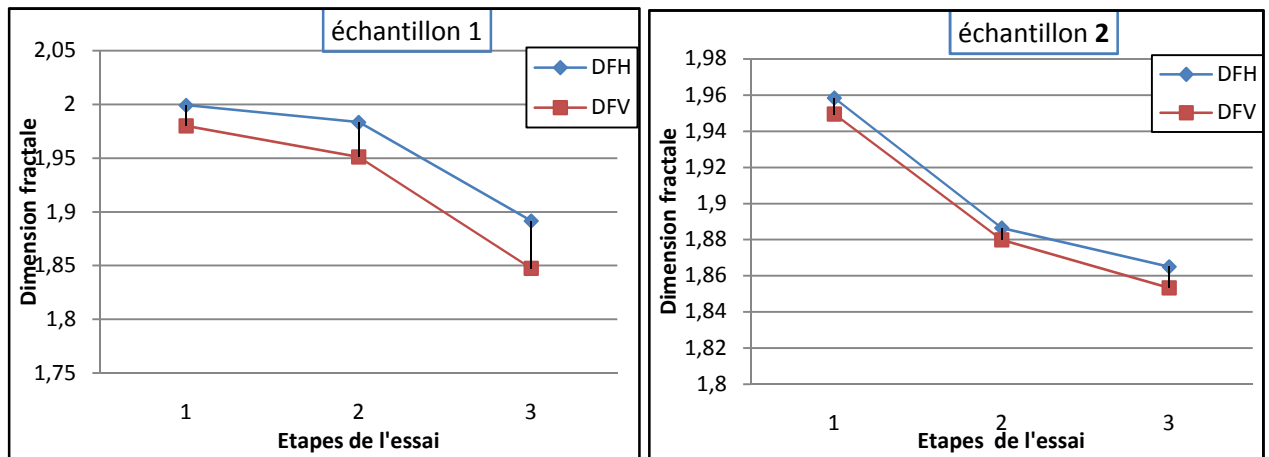


Figure V.7. Variation de la dimension fractale des échantillons 1 et 2.

4- Marne de L'OPGI

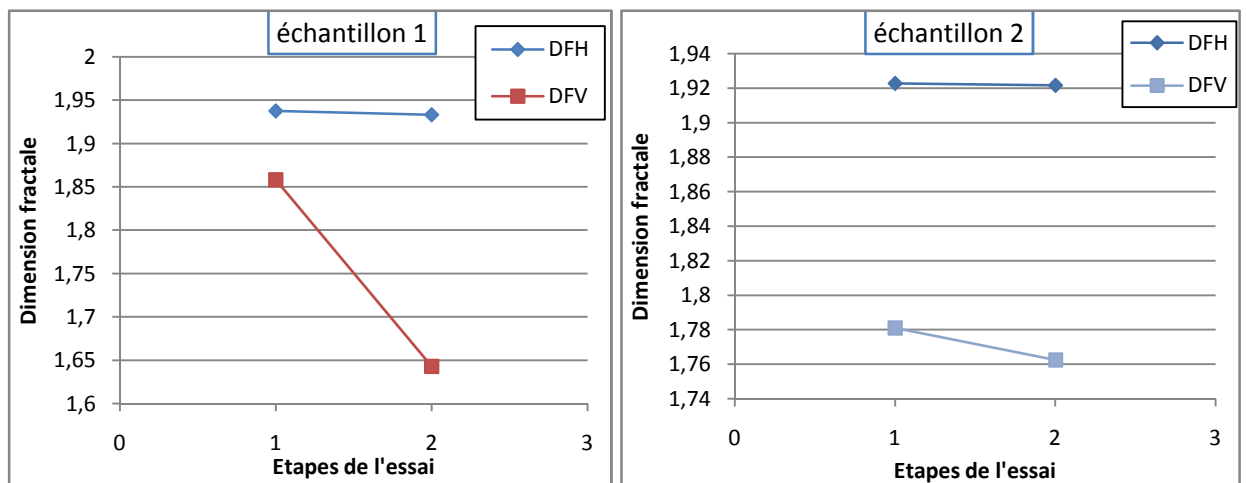


Figure V.8. Variation de la dimension fractale des échantillons 1 et 2.

5- Marne de CHU Nedir Mohamed

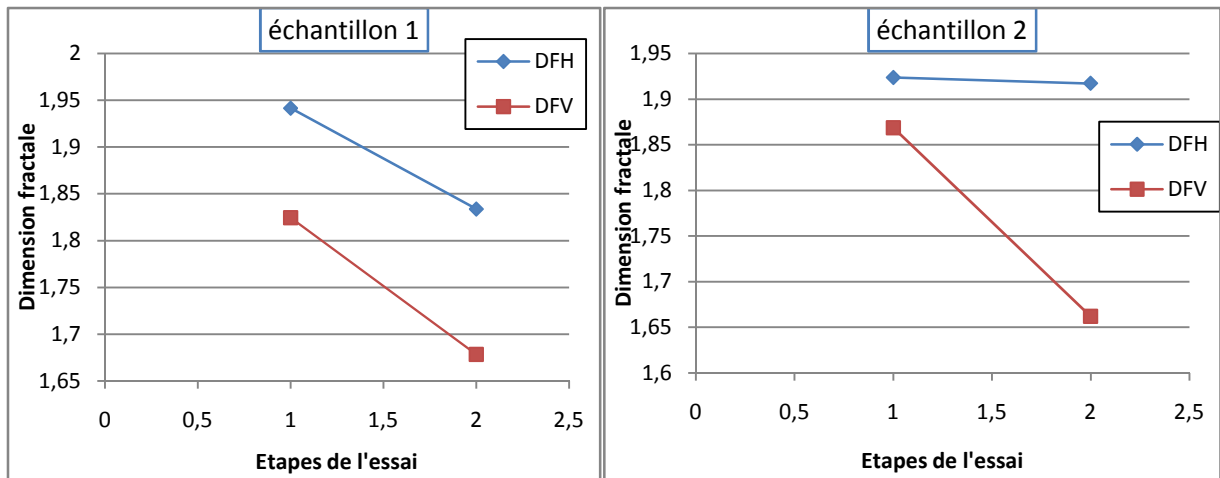


Figure V.9. Variation de la dimension fractale des échantillons 1 et 2.

V-3-2) Essai de Dégradabilité

1- Marne de Boghni

Tableau V.2. Résultats de la dimension fractale horizontale de la marne de Boghni.

Marne	DFH Avant essai	DFH après 1 cycle	DFH après 2 cycles	DFH après 3 cycles	DFH après 4 cycles
Boghni	1,9720	1,8654	1,8552	1,7681	1,6200

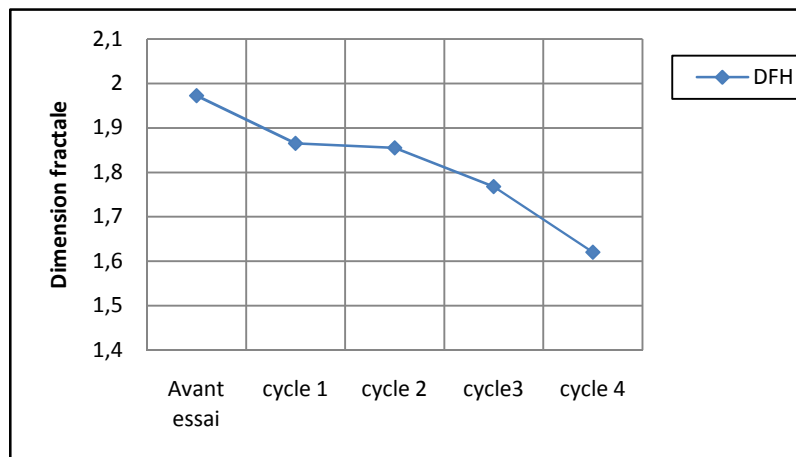


Figure V.10. Variation de la dimension fractale horizontale de la marne de Boghni.

Tableau V.3. Résultats de la dimension fractale verticale de la marne de Boghni.

Marne	DFV Avant essai	DFV après 1 cycle	DFV après 2 cycles	DFV après 3 cycles	DFV après 4 cycles
Boghni	1,9720	1,8654	1,8552	1,7681	1,6201

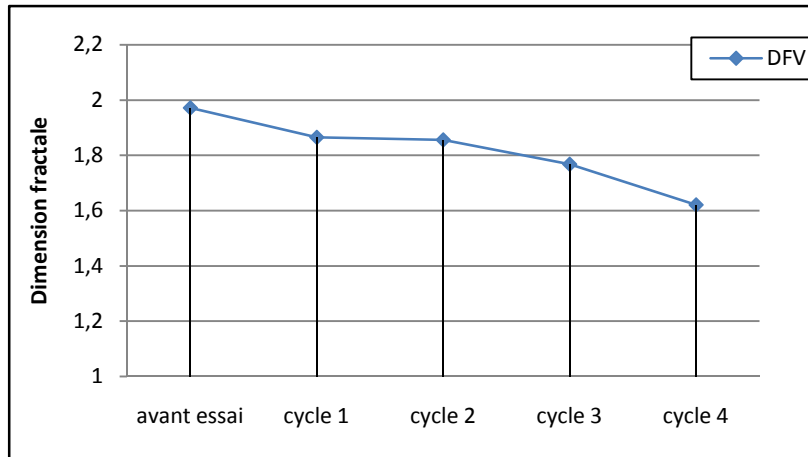


Figure V.11. Variation de la dimension fractale verticale de la marne de Boghni.

2- Marne de Draa El Mizan

Tableau V.4. Résultats de la dimension fractale horizontale de la marne DEM.

Marne	DFH Avant essai	DFH après 1 ^{er} cycle	DFH après 2 cycles	DFVH après 3 cycles	DFH après 4 cycles
DEM	1,9812	1,9532	1,8793	1,7891	1,6987

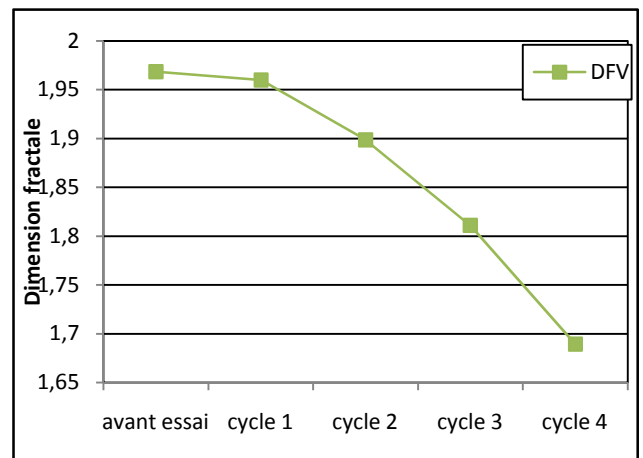
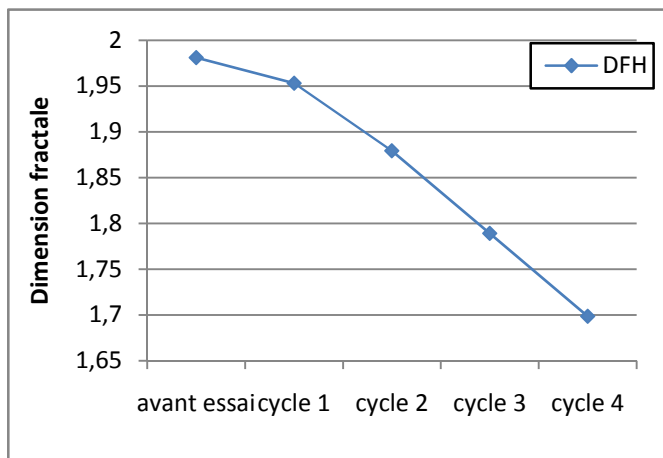


Figure V.12. Variation de la dimension fractale horizontale et verticale, respectivement, de la marne DEM.

3- Marne Les Chabane

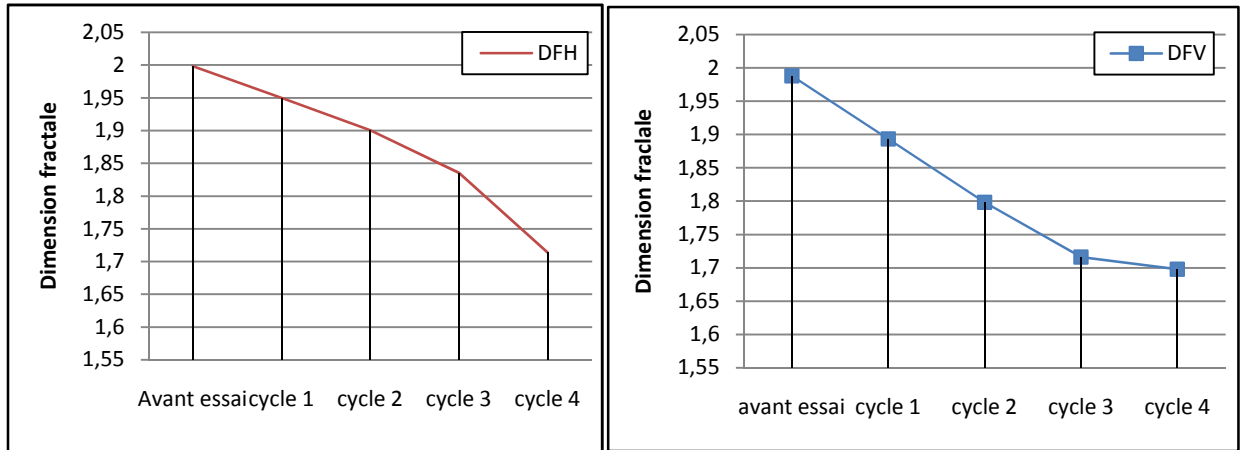


Figure V.13. Variation de la dimension fractale horizontale et verticale, respectivement, de la marne Les Chabane.

4- Marne de L'OPGI

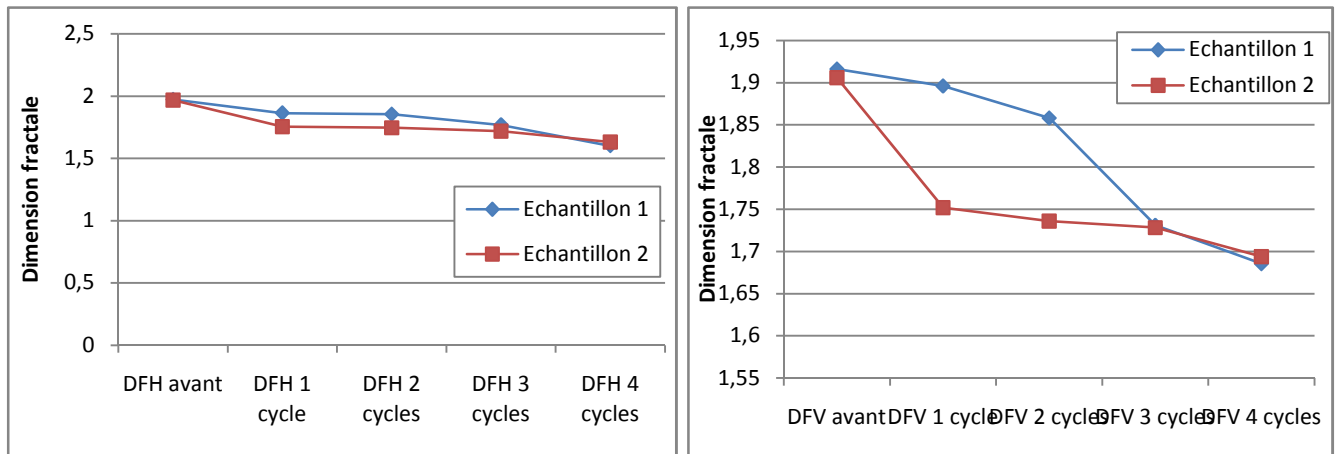


Figure V.14. Variation de la dimension fractale horizontale et verticale, respectivement, de la marne de l'OPGI.

5- Marne de CHU Nedir Mohamed

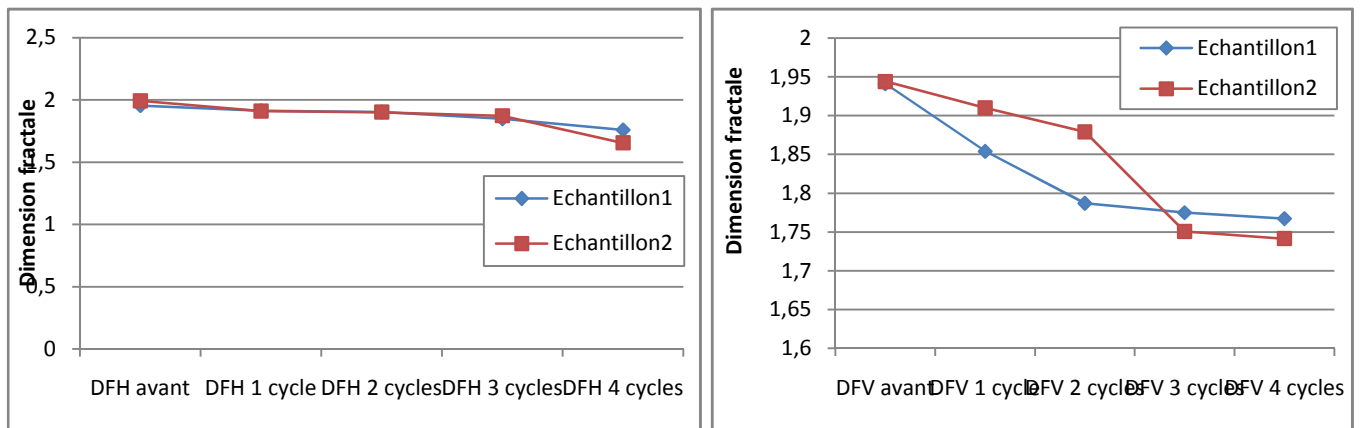


Figure V.15. Variation de la dimension fractale horizontale et verticale de la marne de CHU.

V-3-3) Essai aux canicules (pour les sites Boghni, DEM et Les Chabane)

1- Marne de Boghni

Tableau V.5. Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 1.

	Étapes de l'essai	Surface H	Surface V
1	Avant (naturel)	1,8852	1,8722
2	Après l'étuve	1,8041	1,7800
3	10 ^{ème} cycle	1,7441	1,7005

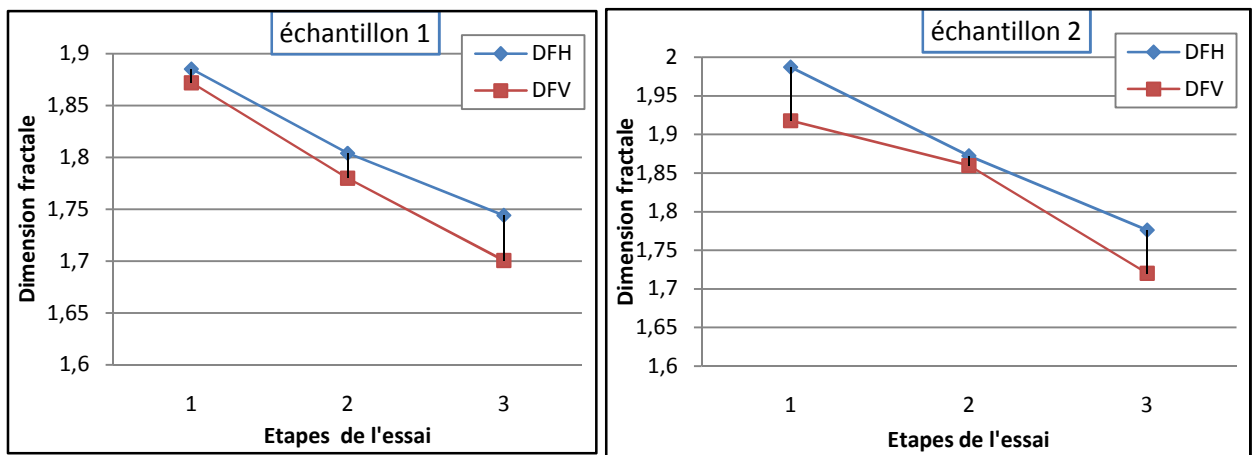


Figure V.16. Variation de la dimension fractale des échantillons 1 et 2.

2- Marne de Draa El Mizan

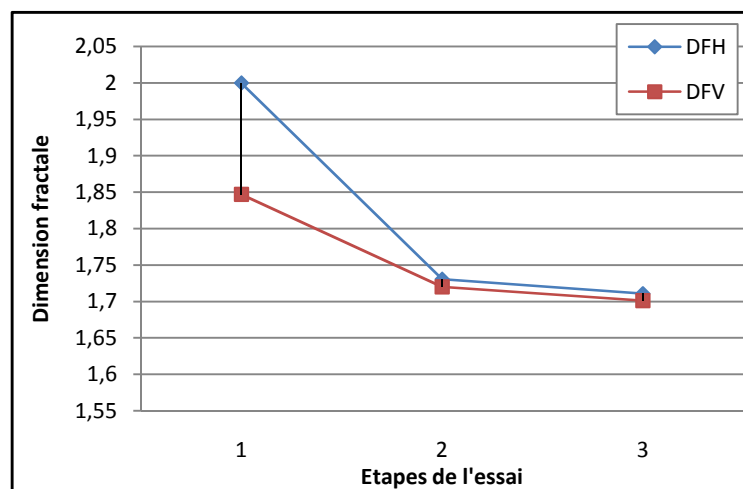


Figure V.17. Variation de la dimension fractale de l'échantillon 1.

3- Marne Les Chabanes

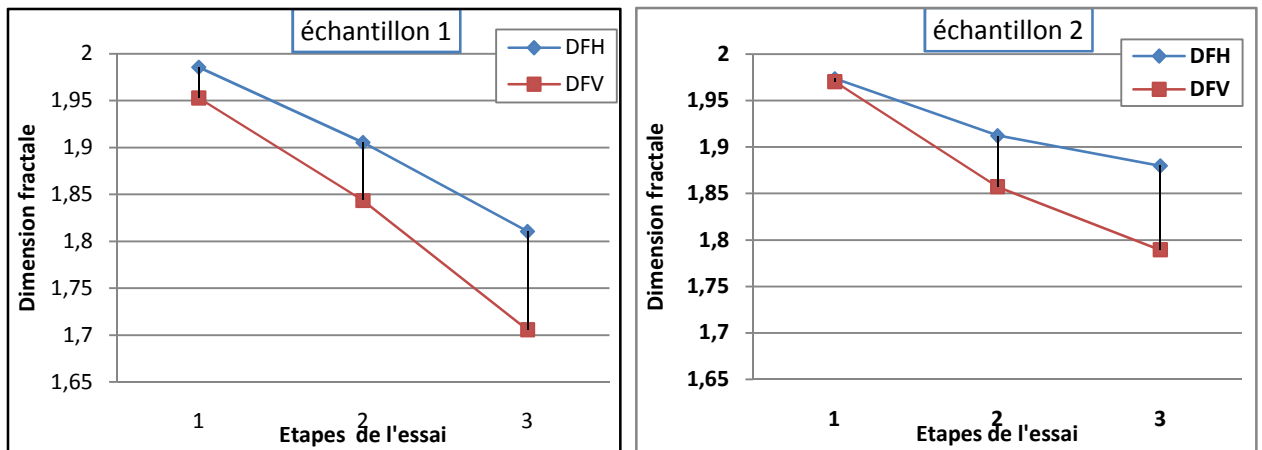


Figure V.18. Variation de la dimension fractale des échantillons 1 et 2.

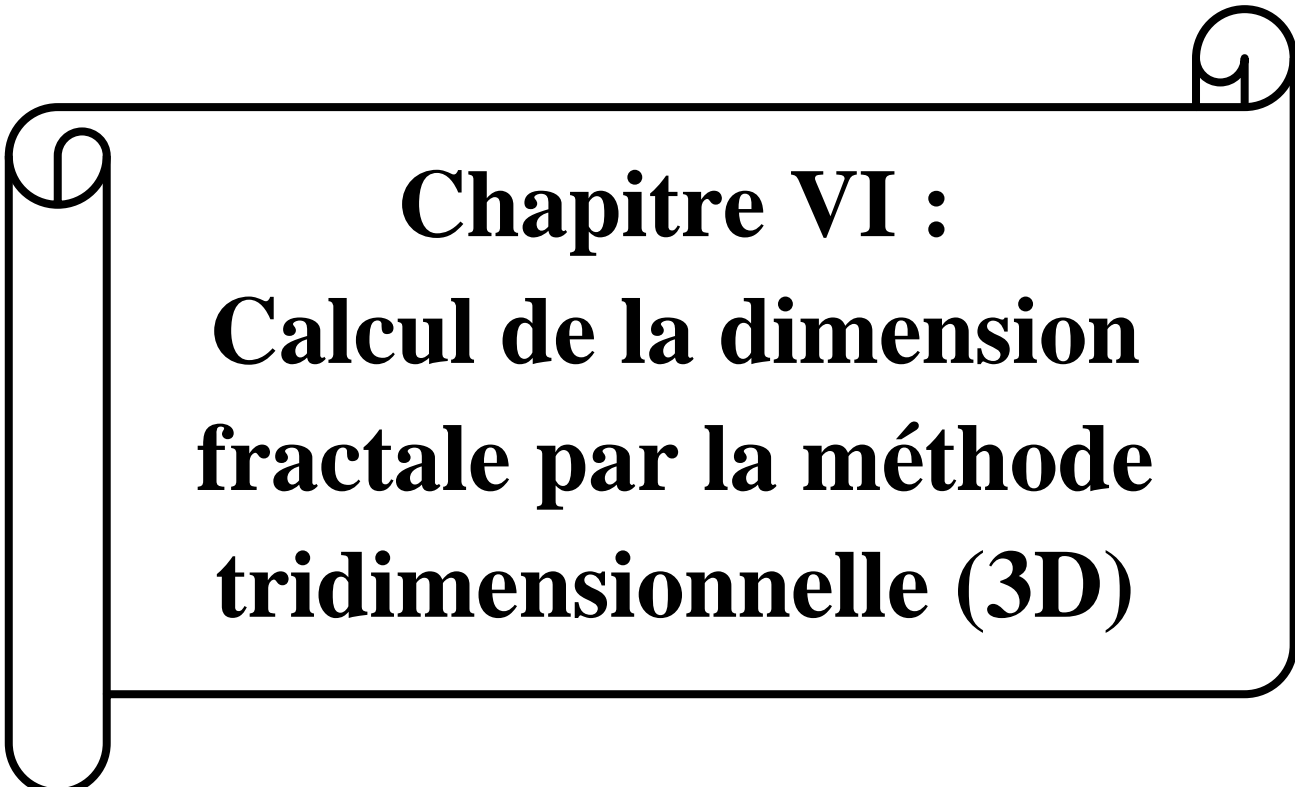
V-3-4) Interprétation des résultats

Les figures (V.2...V.18) ci-dessus ; présentent des pentes différentes, qui varient selon le mode et l'étape de l'essai, en effet la variation de la dimension fractale dépend de la nature du sol et d'un échantillon à un autre. On remarque bien l'influence des cycles immersions-séchages sur les résultats du calcul de la dimension fractale, et les résultats montrent la diminution des dimensions fractales en passant d'un cycle à un autre. À la fin de chaque essai, la rugosité augmente par rapport à son état initial ; les fissures et le changement d'état de la texture sont une cause de cette augmentation et de la diminution de la DF_R calculée. Donc on peut dire que c'est la propagation des fissures dans les échantillons qui ont un rôle principal dans la variation de la diminution de DF_R . Sans oublier le potentiel de gonflement qui augmente à cause de la présence des minéraux qui ont une sensibilité à l'eau.

V-4) Conclusion

Les résultats du chapitre précédent et celle obtenues dans ce chapitre avec la méthode de Box Counting confirment l'influence des effets climatiques sur la dimension fractale. La dimension fractale diminue d'un cycle à un autre et elle suit les changements de forme et la déformation des échantillons. En effet, la dimension fractale est affectée par la structure et les changements de texture et de forme des échantillons.

Dans le chapitre suivant on va refaire toutes ces étapes de calcul de la dimension fractale sur les mêmes échantillons avant et après chaque essai en utilisant la méthode tridimensionnelle de Comptage Différentiel de Boîtes avec le logiciel MATLAB.



Chapitre VI :
Calcul de la dimension
fractale par la méthode
tridimensionnelle (3D)

VI-1) Introduction

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 déjà utilisée dans le chapitre précédent.

L'étude d'une image par l'analyse fractale consiste à mesurer la répétition de structure à une certaine échelle. Cette analyse peut donc être mise en œuvre sur le contour du grain (la méthode de Box Counting) ou bien encore sur les niveaux de gris de l'image par la méthode de Comptage Différentiel de Boîtes tridimensionnelles (DBC), qui est inventée pour améliorer la méthode de Comptage de Boîtes bidimensionnelles (BC). L'information essentielle ainsi obtenue est la dimension fractale de l'échantillon considéré.

Le calcul de la dimension fractale, dans ce chapitre, a été effectué par la méthode tridimensionnelle appliquée, avant et après chaque essai, sur les mêmes images des échantillons sélectionnés pour la méthode de calcul déjà utilisée, à l'aide du programme MATLAB R2015a.

VI-2) Présentation des résultats

VI-2-1) Essai de Gel-Dégel

1-Marne de Boghni

Tableau VI.1. Résultats de la dimension fractale horizontale et verticale de l'échantillon témoin.

Sol de Boghni témoin	DFH	DFV
Avant l'essai	2,0485	1,9736
10 ^{ème} cycle (à 48h)	2,0132	1,9617

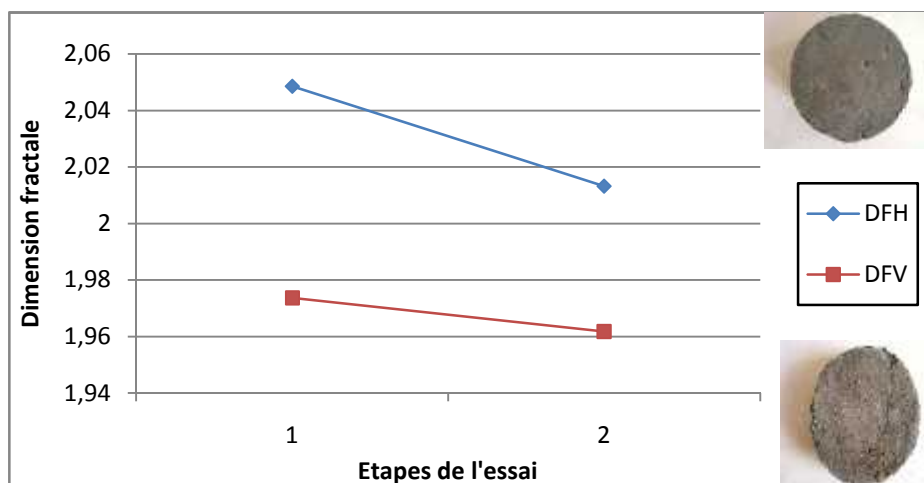


Figure VI.1. Variation de DF en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon témoin.

Tableau VI.2. Résultats de DF horizontale et verticale de l'échantillon 1.

Etapas de l'essai		Surface H	Surface V
1	Avant	2,0485	1,9736
2	Après l'étuve	2,0455	1,9665
3	10 ^{ème} cycle (à 48h)	2,0147	1,9563

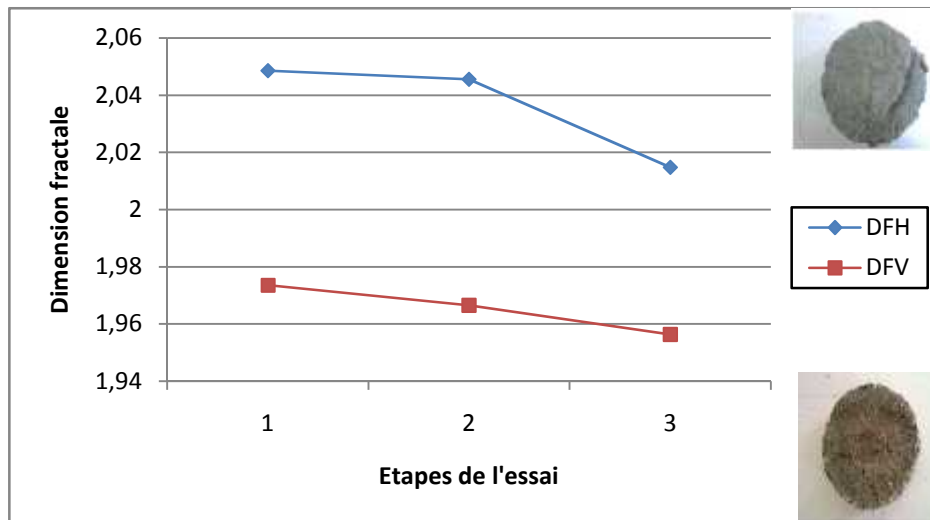


Figure VI.2. Variation de DF en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon 1.

Tableau VI.3. Résultats de la dimension fractale horizontale et verticale de l'échantillon 2.

Etapas de l'essai		Surface H	Surface V
1	Avant	2,0485	1,9736
2	Après l'étuve	2,0156	1,9936
3	10 ^{ème} cycle (à 48h)	2,0248	1,9834

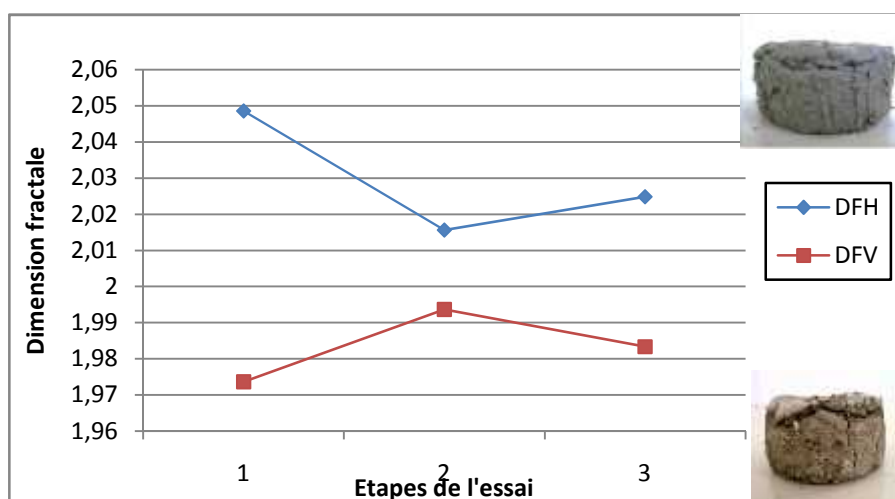


Figure VI.3. Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon 2.

2-Marne de Draa El Mizan

Tableau VI.4. Résultats de la dimension fractale horizontale et verticale de l'échantillon témoin.

Sol DEM témoin	DFH	DFV
Avant l'essai	2,0323	1,9923
10 ^{ème} cycle (à 48h)	1,9803	2,0331

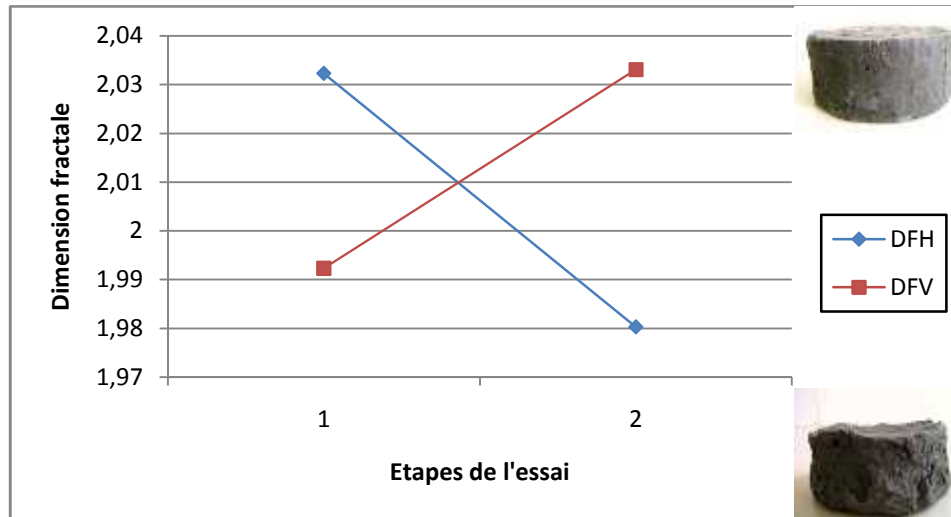


Figure VI.4. Variation de DF en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon témoin.

Tableau VI.5. Résultats de la dimension fractale horizontale et verticale de l'échantillon 1

Etapas de l'essai	Surface H	Surface V
1 Avant	2,0323	1,9923
2 Après l'étuve	2,0090	2,0196
3 10 ^{ème} cycle (à 48h)	2,0027	2,0175

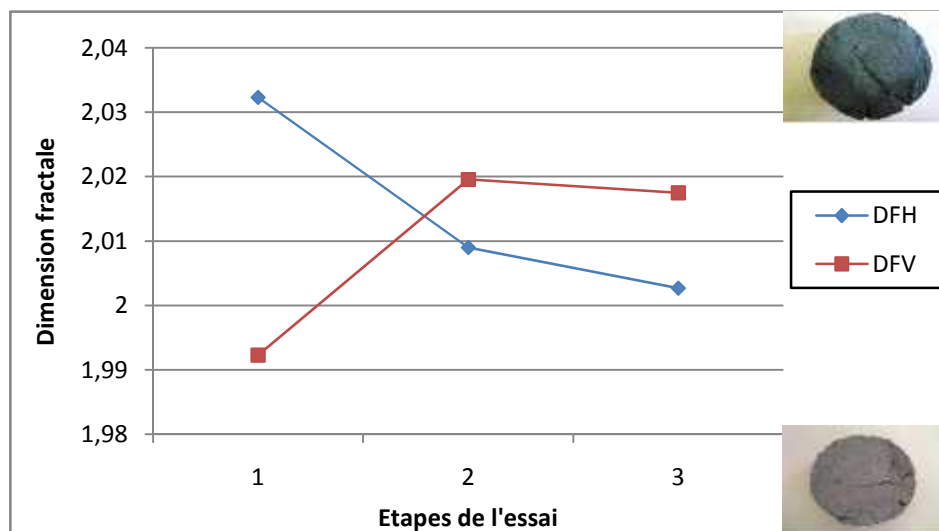


Figure VI.5. Variation de la DF en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon 1.

Tableau VI.6. Résultats de la dimension fractale horizontale et verticale de l'échantillon 2.

Etapes de l'essai	Surface H	Surface V
1 Avant	2,0323	1,9923
2 Après l'étuve	1,9686	1,9386
3 10 ^{ème} cycle (à 48h)	2,0226	1,9694

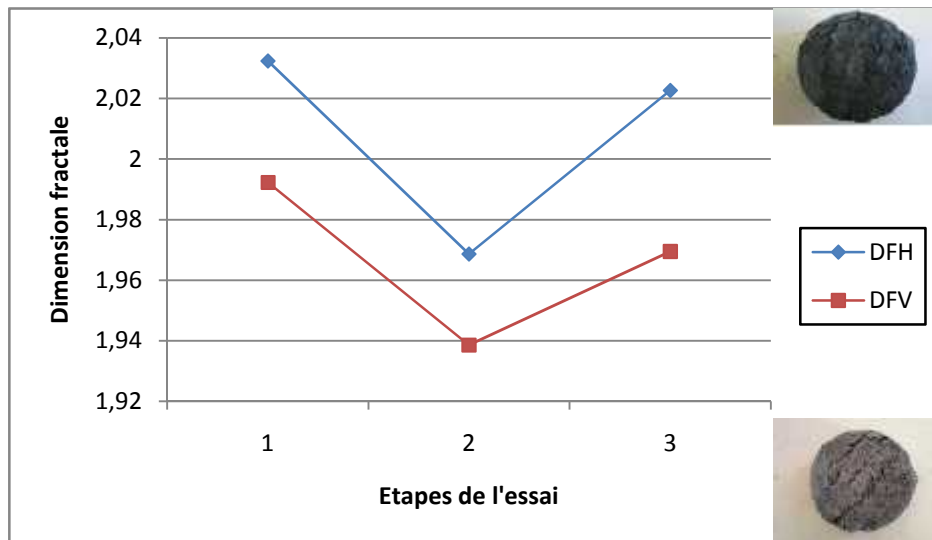


Figure VI.6. Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon 2.

3-Marne Les Chabane

Tableau VI.7. Résultats de la dimension fractale horizontale et verticale de l'échantillon témoin.

Sol Les Chabane témoin	DFH	DFV
Avant l'essai	1,9609	1,9892
10 ^{ème} cycle (à 48h)	2,0457	1,9977

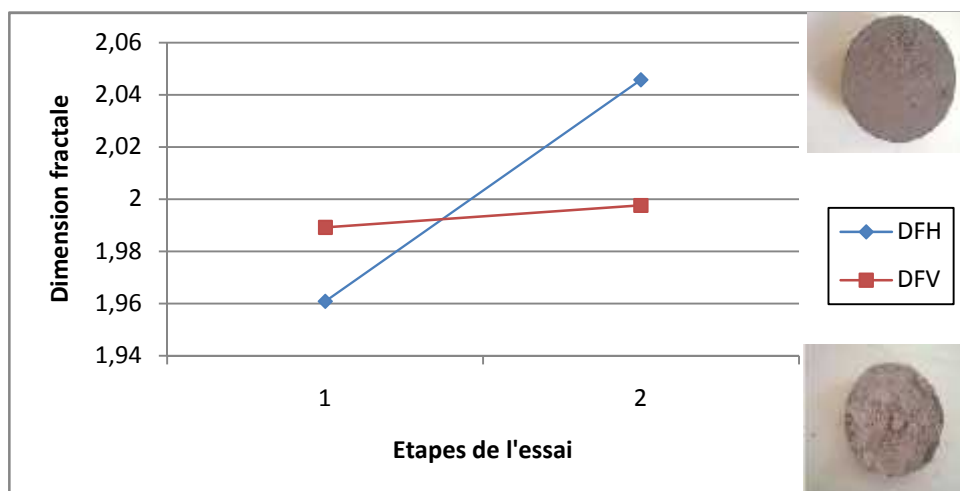


Figure VI.7. Variation de DF en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon témoin.

Tableau VI.8. Résultats de la dimension fractale horizontale et verticale de l'échantillon 1.

Etapes de l'essai		Surface H	Surface V
1	Avant	1,9609	1,9892
2	Après l'étuve	1,9967	1,9715
3	10 ^{ème} cycle (à 48h)	2,0140	2,0011

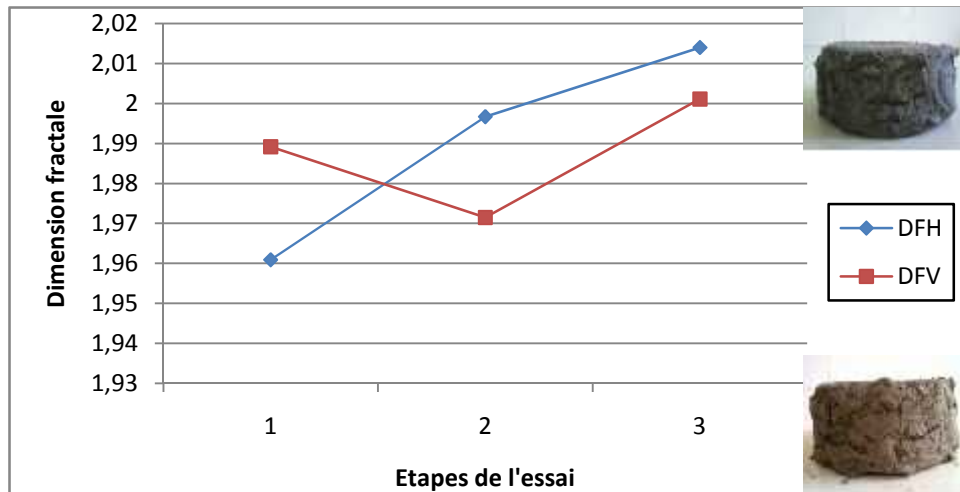


Figure VI.8. Variation de DF en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon 1.

Tableau VI.9. Résultats de la dimension fractale horizontale et verticale de l'échantillon 2.

Etapes de l'essai		Surface H	Surface V
1	Avant	1,9609	1,9892
2	Après l'étuve	2,0074	1,9789
3	10 ^{ème} cycle (à 48h)	2,0255	1,9969

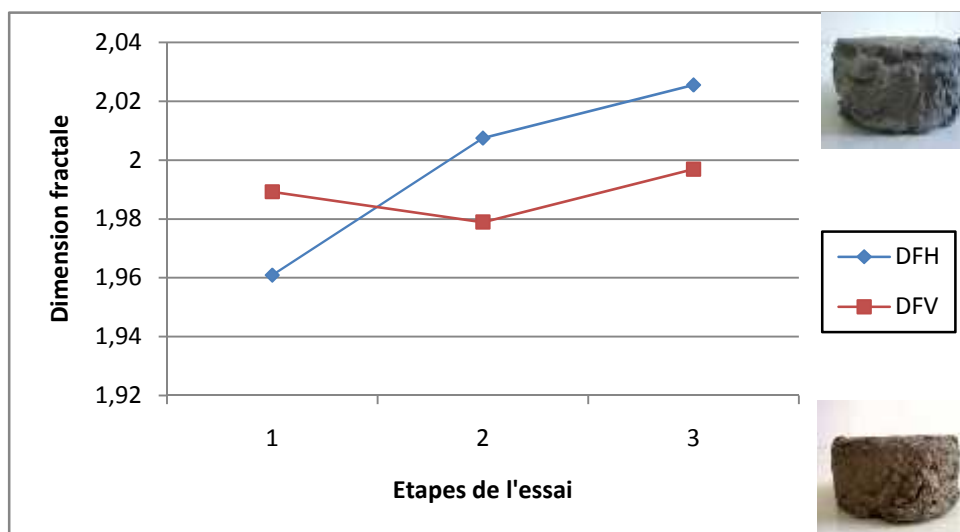


Figure VI.9. Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon 2.

4-Marne de l'OPGI

Tableau VI.10. Résultats de la dimension fractale horizontale et verticale de l'échantillon 1.

Etapes de l'essai		Surface H	Surface V
1	Avant	1,9975	2,0071
2	Après l'étuve	2,0044	2,0134
3	10 ^{ème} cycle (à 48h)	2,0287	2,0126

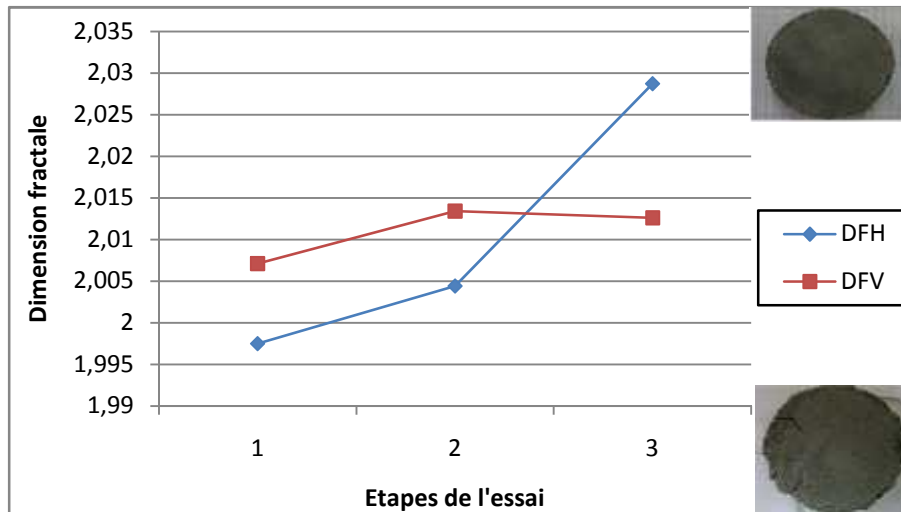


Figure VI.10. Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon 1.

Tableau VI.11. Résultats de la dimension fractale horizontale et verticale de l'échantillon 2.

Etapes de l'essai		Surface H	Surface V
1	Avant	1,9952	2,0245
2	Après l'étuve	2,0084	2,0184
3	10 ^{ème} cycle (à 48h)	2,0199	2,0105

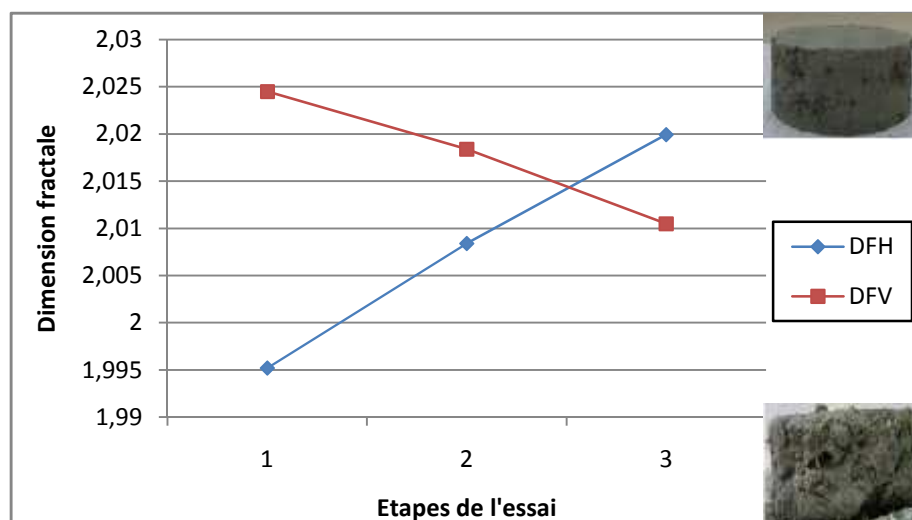


Figure VI.11. Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon 2.

5-Marne de CHU

Tableau VI.12. Résultats de la dimension fractale horizontale et verticale de l'échantillon 1.

Etapes de l'essai		Surface H	Surface V
1	Avant	2,0045	2,0015
2	Après l'étuve	2,0136	1,9857
3	10 ^{ème} cycle (à 48h)	2,0442	2,0165

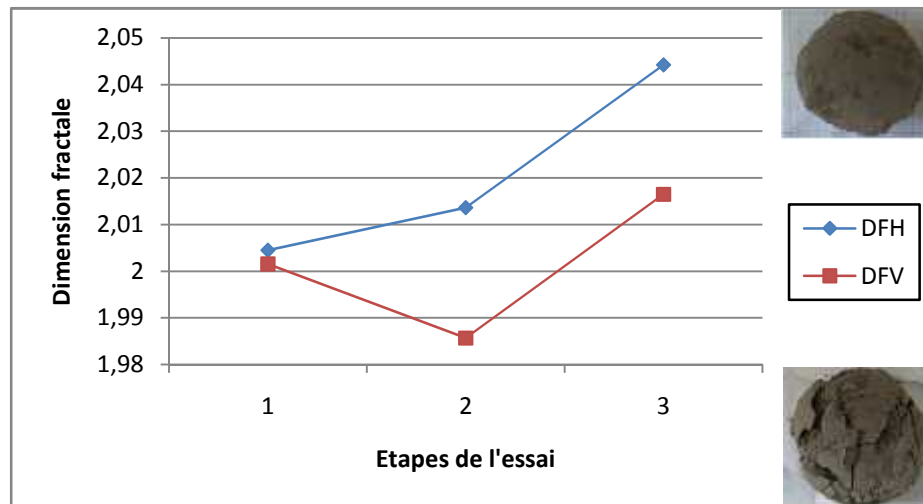


Figure VI.12. Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon 1.

Tableau VI.13. Résultats de la dimension fractale horizontale et verticale de l'échantillon 2.

Etapes de l'essai		Surface H	Surface V
1	Avant	1,9963	2,0421
2	Après l'étuve	2,0124	2,0125
3	10 ^{ème} cycle (à 48h)	2,0252	2,0141

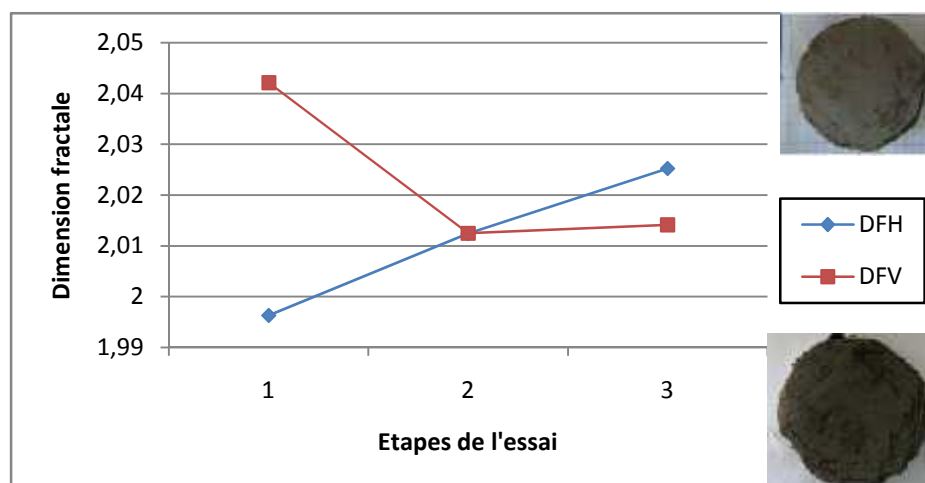


Figure VI.13. Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon 2.

VI-2-2) Essai de dégradabilité

1- Marne de Boghni

Tableau VI.14. Résultats de la dimension fractale horizontale de la marne Boghni.

Marne	DFH Avant essai	DFH après 1 cycle	DFH après 2 cycles	DFH après 3 cycles	DFH après 4 cycles
Boghni	2,0472	2,0094	2,0196	2,0254	2,0602

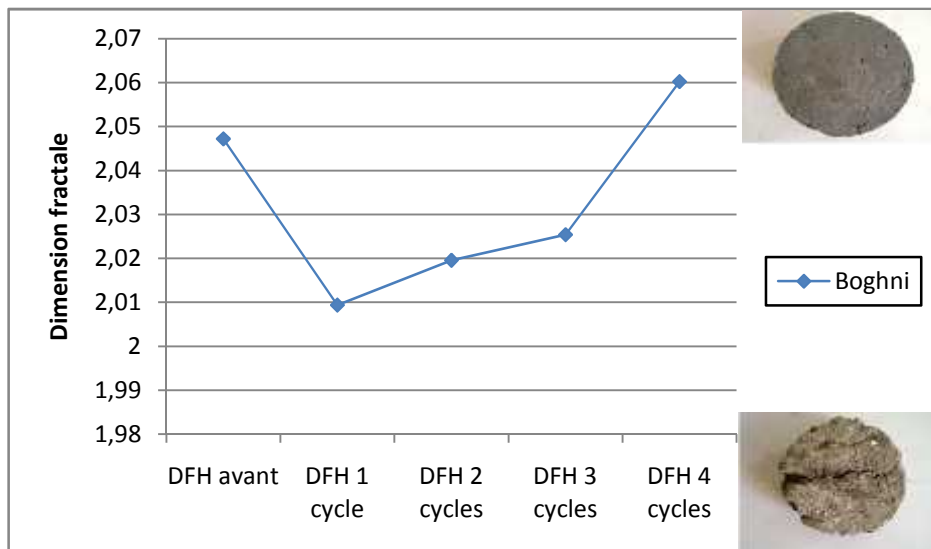


Figure VI.14. Variation de la dimension fractale horizontale de la marne de Boghni.

Tableau VI.15. Résultats de la dimension fractale verticale de la marne Boghni.

Marne	DFV Avant essai	DFV après 1 cycle	DFV après 2 cycles	DFV après 3 cycles	DFV après 4 cycles
Boghni	1.9191	2.0036	2,0113	2,0154	2,0150

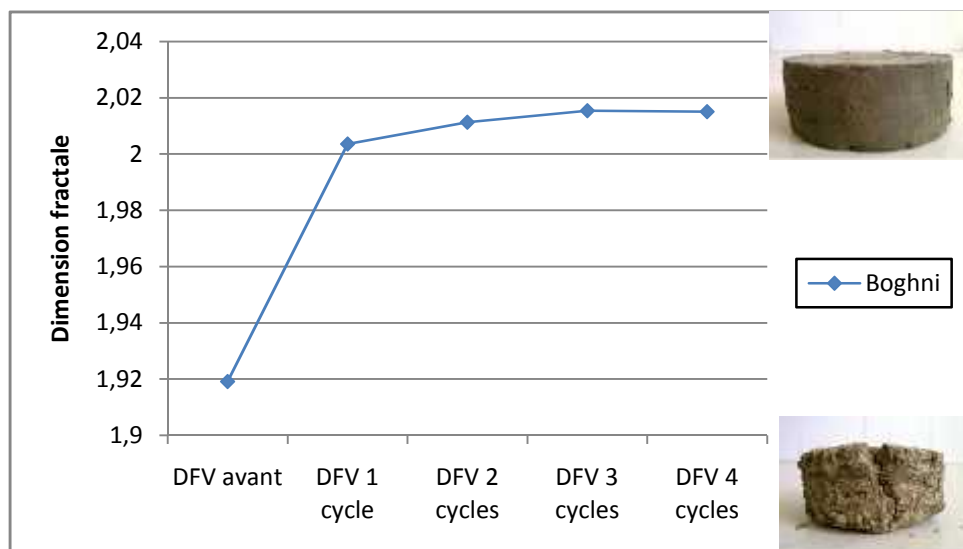


Figure VI.15. Variation de la dimension fractale verticale de la marne de Boghni.

2- Marne Draa El Mizane

Tableau VI.16. Résultats de la dimension fractale horizontale de la marne DEM.

Marne	DFH Avant essai	DFH après 1 cycle	DFH après 2 cycles	DFH après 3 cycles	DFH après 4 cycles
DEM	2,0254	2,0156	2,0235	2,0330	2,0536

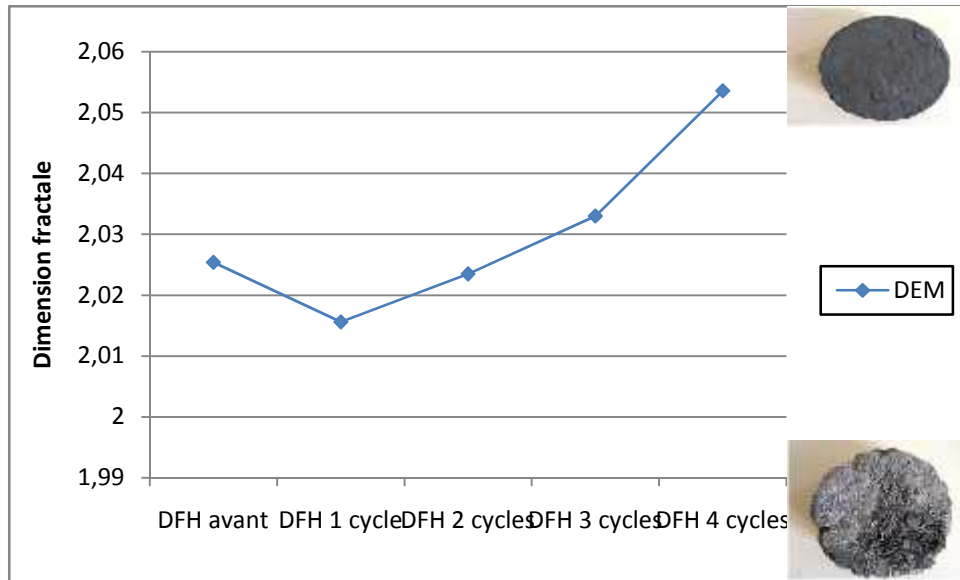


Figure VI.16. Variation de la dimension fractale horizontale de la marne de DEM.

Tableau VI.17. Résultats de la dimension fractale verticale de la marne DEM.

Marne	DFV Avant essai	DFV après 1 cycle	DFV après 2 cycles	DFV après 3 cycles	DFV après 4 cycles
DEM	1,9584	2,0262	1,9834	1,9612	1,9910

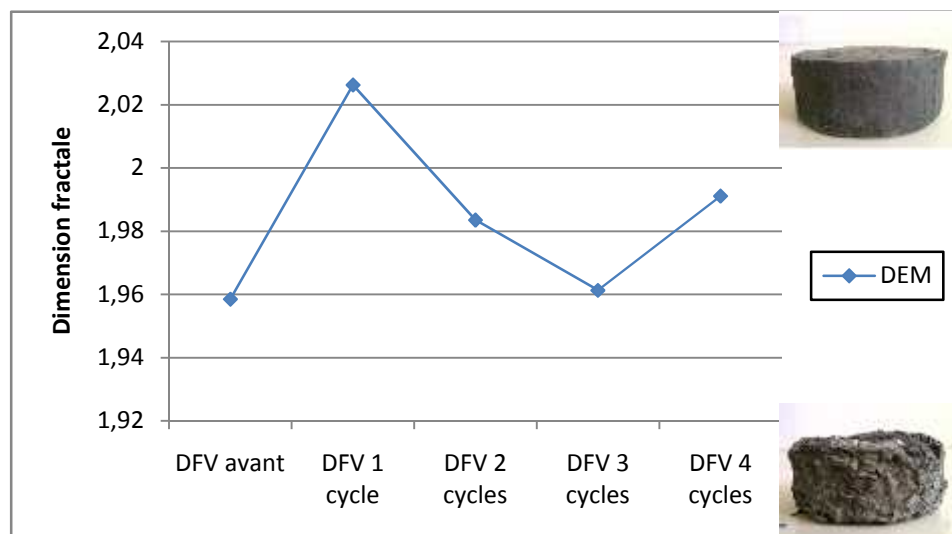


Figure VI.17. Variation de la dimension fractale verticale de la marne de DEM.

3- Marne Les Chabane

Tableau VI.18. Résultats de la dimension fractale horizontale de la marne Les Chabane.

Marne	DFH Avant essai	DFH après 1 cycle	DFH après 2 cycles	DFH après 3 cycles	DFH après 4 cycles
Les Chabane	1,9568	2,0094	2,0252	2,0336	2,0162

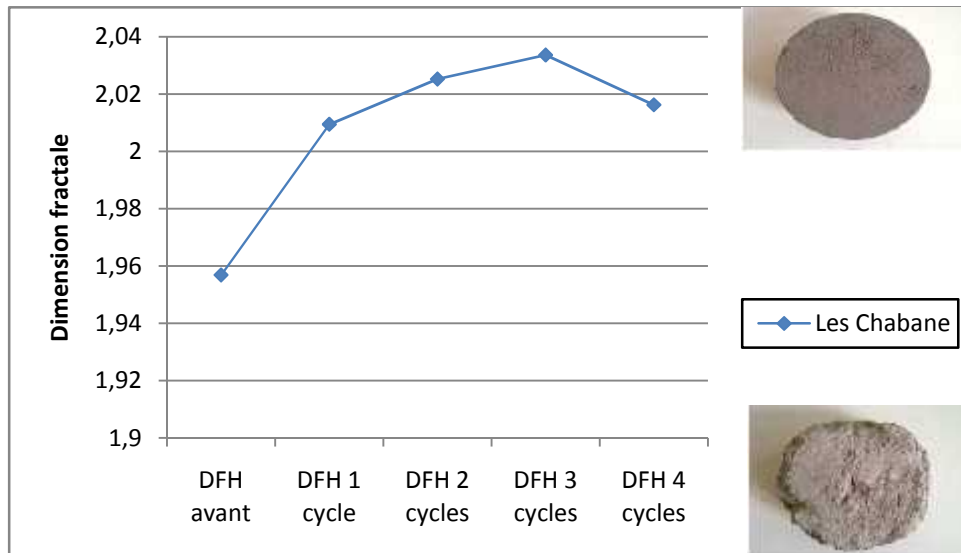


Figure VI.18. Variation de la dimension fractale horizontale de la marne Les Chabane.

Tableau VI.19. Résultats de la dimension fractale verticale de la marne Les Chabane.

Marne	DFV Avant essai	DFV après 1 cycle	DFV après 2 cycles	DFV après 3 cycles	DFV après 4 cycles
Les Chabane	1,9878	1,9916	2,0025	1,9842	2,0109

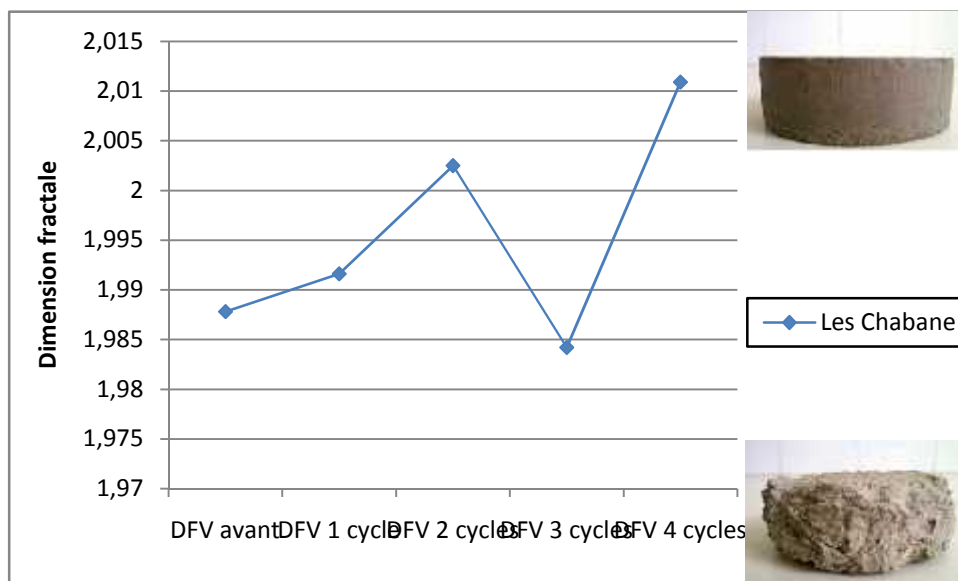


Figure VI.19. Variation de la dimension fractale verticale de la marne Les Chabane.

4- Marne L'OPGI

Tableau VI.20. Résultats de la dimension fractale horizontale de la marne l'OPGI

Marne	DFH Avant essai	DFH après 1 cycle	DFH après 2 cycles	DFH après 3 cycles	DFH après 4 cycles
Echantillon 1	1,9958	2,0389	2,0243	2,0278	2,0295
Echantillon 2	2,0112	2,0180	2,0167	2,0416	2,0399

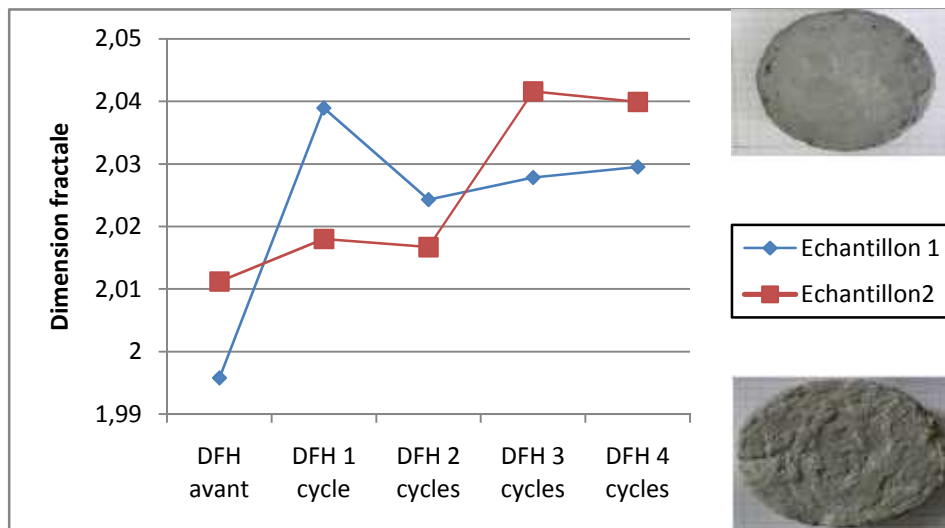


Figure VI.20. Variation de la dimension fractale horizontale de la marne l'OPGI.

Tableau VI.21. Résultats de la dimension fractale verticale de la marne l'OPGI

Marne	DFV Avant essai	DFV après 1 cycle	DFV après 2 cycles	DFV après 3 cycles	DFV après 4 cycles
Echantillon 1	2,0011	2,0097	2,0213	2,0093	2,0012
Echantillon 2	2,0158	2,0289	2,0091	2,0200	2,0045

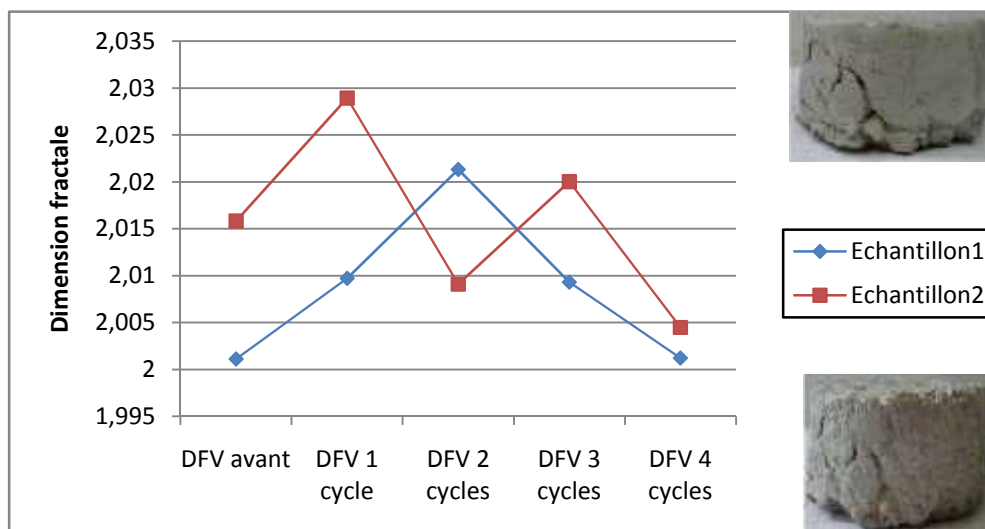


Figure VI.21. Variation de la dimension fractale verticale de la marne l'OPGI.

5- Marne de CHU Nedir Mohamed

Tableau VI.22. Résultats de la dimension fractale horizontale de la marne CHU

Marne	DFH Avant essai	DFH après 1 cycle	DFH après 2 cycles	DFH après 3 cycles	DFH après 4 cycles
Echantillon 1	1,9923	2,0160	2,0309	2,0163	2,0346
Echantillon 2	2,0022	2,0207	2,0243	2,0347	2,0288

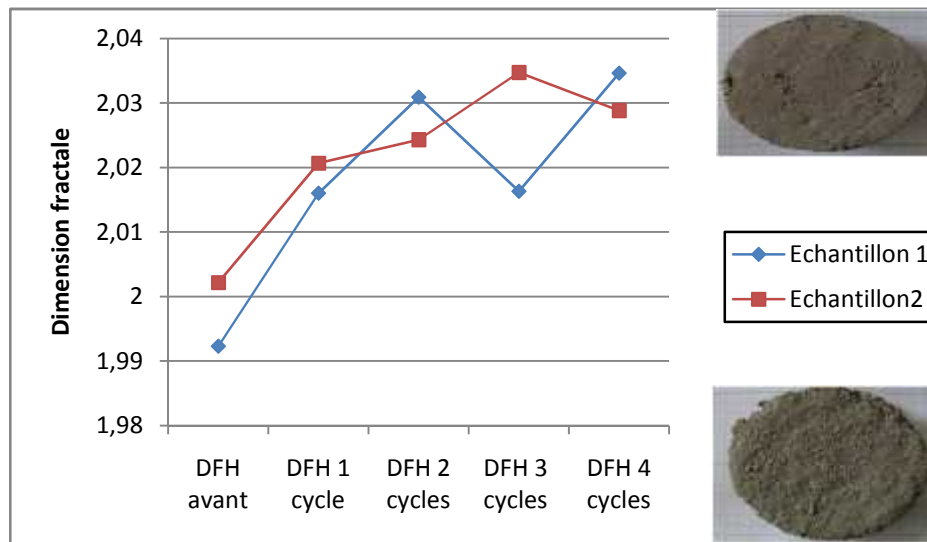


Figure VI.22. Variation de la dimension fractale horizontale de la marne CHU.

Tableau VI.23. Résultats de la dimension fractale verticale de la marne CHU

Marne	DFV Avant essai	DFV après 1 cycle	DFV après 2 cycles	DFV après 3 cycles	DFV après 4 cycles
Echantillon 1	2,0027	2,0081	2,0125	2,0110	2,0128
Echantillon 2	2,0039	2,0095	2,0181	2,0088	2,0020

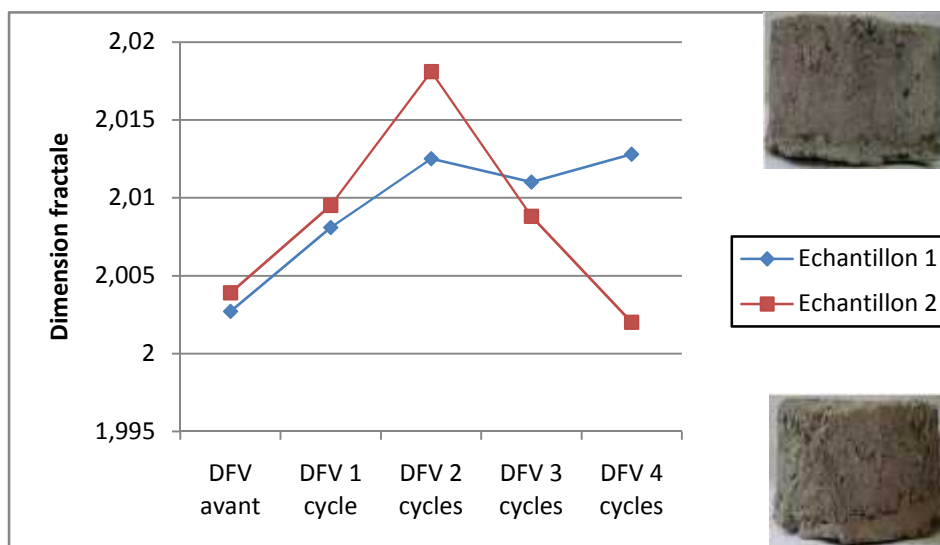


Figure VI.23. Variation de la dimension fractale verticale de la marne CHU.

VI-2-3) Essai aux canicules

1- Marne Boghni

Tableau VI.24. Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 1.

Etapes de l'essai		Surface H	Surface V
1	Avant	2,0491	1,9172
2	Après l'étuve	2,0768	2,0106
3	10 ^{ème} cycle (à 48h)	2,0104	1,9828

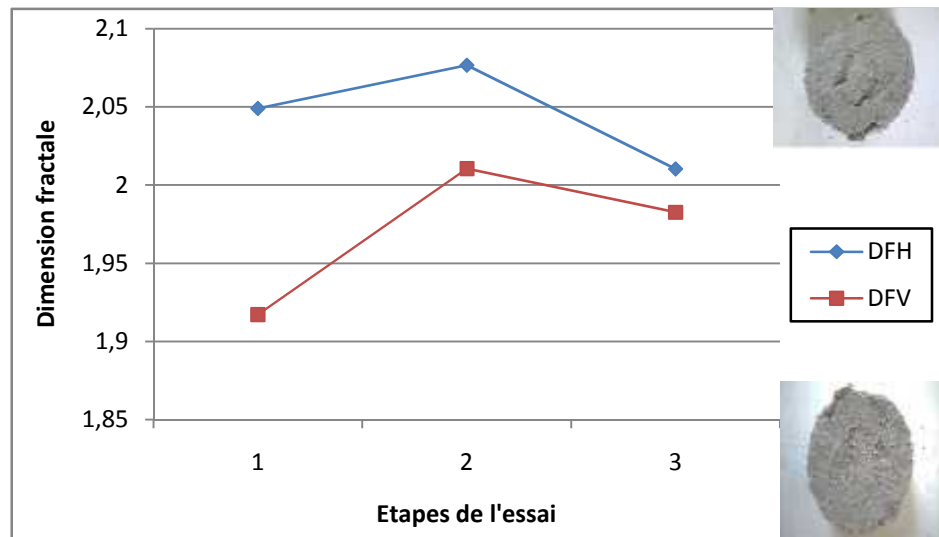


Figure VI.24. Variation de la dimension fractale de l'échantillon 1.

Tableau VI.25. Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 2.

Etapes de l'essai		Surface H	Surface V
1	Avant	2,0491	1,9172
2	Après l'étuve	2,0619	2,0584
3	10 ^{ème} cycle (à 48h)	2,0407	2,0508

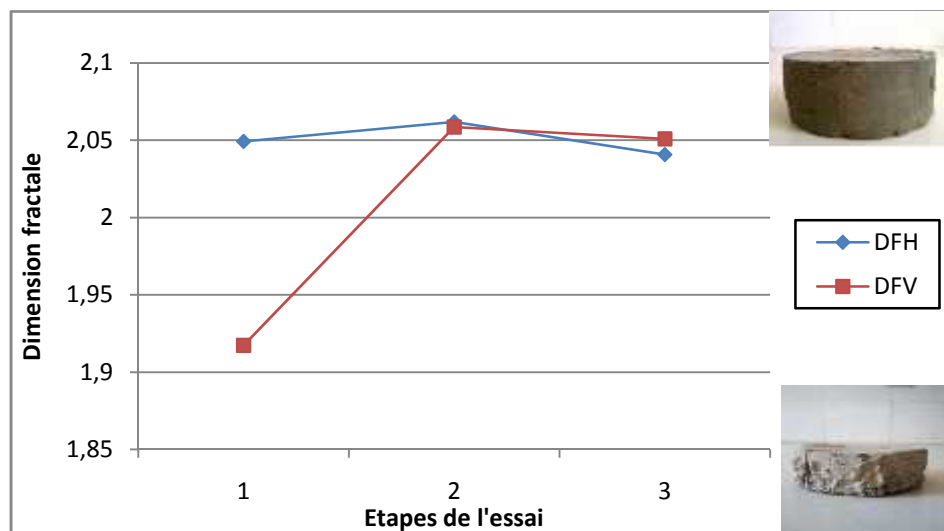


Figure VI.25. Variation de la dimension fractale de l'échantillon 2.

2- Marne DEM

Tableau VI.26. Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 1.

Etapes de l'essai	Surface H	Surface V
1 Avant	2,0257	1,9607
2 Après l'étuve	2,0475	1,9708
3 10 ^{ème} cycle (à 48h)	2,0432	1,9691

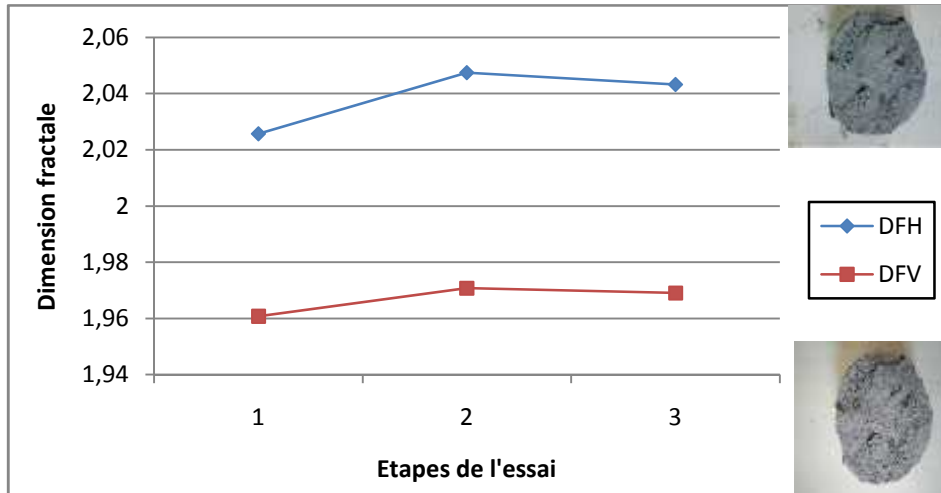


Figure VI.26. Variation de la dimension fractale de l'échantillon 1.

3- Marne Les Chabane

Tableau VI.27. Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 1.

Etapes de l'essai	Surface H	Surface V
1 Avant	1,9555	2,0045
2 Après l'étuve	2,0499	2,0437
3 10 ^{ème} cycle (à 48h)	2,0235	2,0219

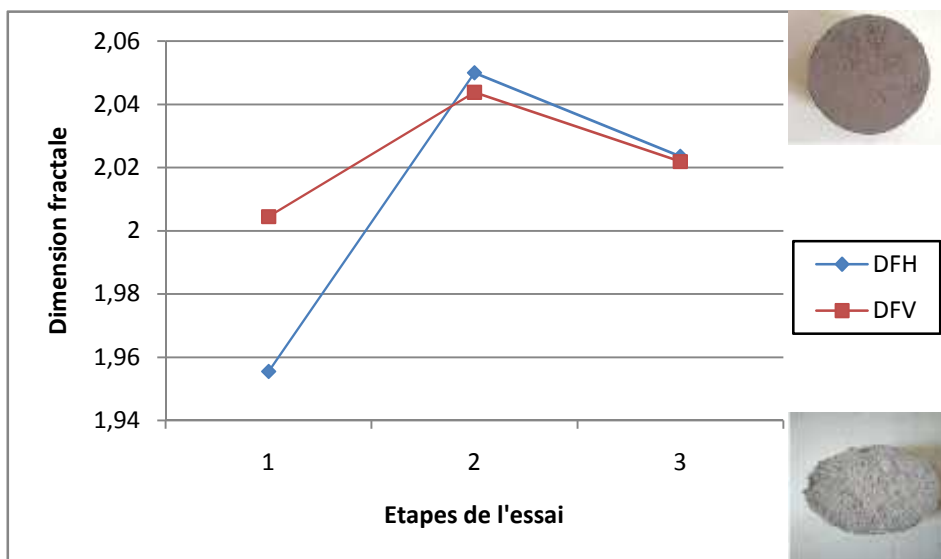


Figure VI.27. Variation de la dimension fractale de l'échantillon 1.

Tableau VI.28. Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 2.

Etapes de l'essai	Surface H	Surface V
1 Avant	1,9555	2,0045
2 Après l'étuve	2,0516	2,0129
3 10 ^{ème} cycle (à 48h)	2,0127	2,0025

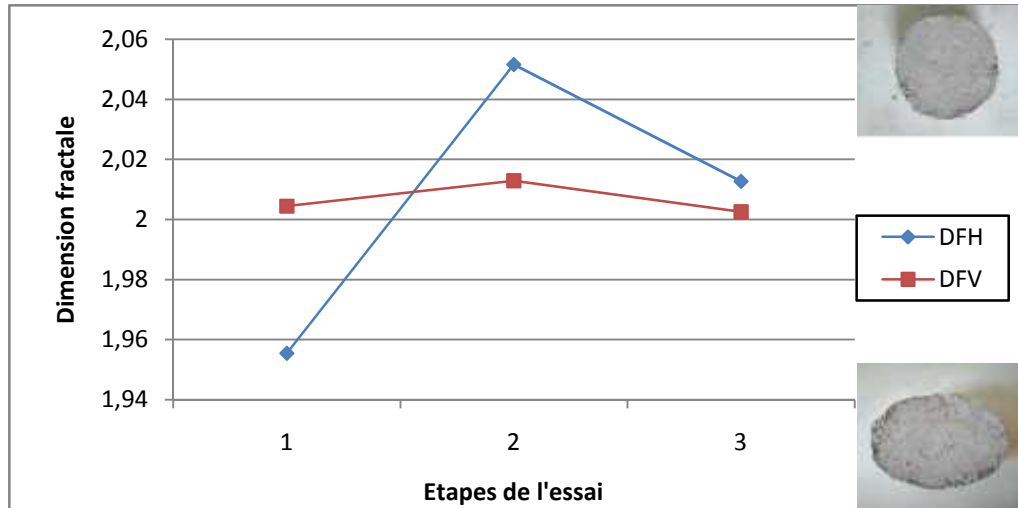


Figure VI.28. Variation de la dimension fractale de l'échantillon 2.

VI.3) Interprétation des résultats

Toutes les figures présentées ci-dessus ne varient pas linéairement elles présentent des pentes différentes qui varient selon le mode et l'étape de l'essai, en effet la variation de la dimension fractale dépend d'un échantillon à un autre et de la nature du sol. On voit bien l'influence des essais sur tous les échantillons et sur les valeurs de leurs dimensions fractales.

Les cycles des essais appliqués sur les échantillons donnent une différence remarquable des niveaux de la couleur grise des images analysées des grains après les essais, se traduisant par des augmentations ou des diminutions des dimensions fractales calculées qui sont présentés dans les tableaux (VI.1...VI.28).

On voit bien que la DFH, dans l'essai Gel-dégel, des fois diminue comme le cas de la marne de Boghni et DEM (Figures VI.1 ; VI.2 ; VI.4 et VI.5), ou diminue puis augmente comme l'échantillon 2 de Boghni et l'échantillon 2 de DEM dans les figures (VI.3 et VI.6), pour les marnes Les Chabane et L'OPGI et la marne de CHU, DFH augmente durant tout l'essai (Figures VI.7 ; VI.8 ; VI.9 ; VI.10 ; VI.11 ; VI.12 et VI.13).

Ainsi pour la dimension fractale verticale DFV ne varie pas de la même façon, on remarque qu'elle parfois augmente à la fin diminue légèrement ou elle diminue durant tout l'essai, comme dans le cas de la marne de Boghni (Figures VI.1 ; VI.2 et VI.3) ainsi la marne de DEM (Figure VI.5), et la marne de l'OPGI (Figures VI.10 et VI.11).

Dans certains échantillons DFV diminue puis augmente après 48h de l'essai comme dans l'échantillon témoin et l'échantillon 2 de DEM Figures (VI.4 et VI.6) et la marne Les Chabane et CHU (Figures VI.8 ; VI.9; VI.12 et VI.13).

Pour l'essai de dégradabilité on remarque que à la fin de chaque essai DFH et DFV augmente presque pour tous les échantillons les figures (VI.14 ; VI.15 ; VI.16 ; VI.17 ; VI.19 ; VI.20 ; VI.22 et VI.23) sauf dans certains échantillons on remarque une diminution très légère (Figures VI.18 et VI.21) et l'échantillon 2 de L'OPGI et de CHU (Figures VI.20 ; VI.22 et VI.23).

Pour les canicules les résultats réagissent de la même façon comme on voit bien qu'elles augmentent puis diminuent pour les marnes Boghni, DEM et Les Chabane dans les figures (VI.24 ; VI.25 ; VI.26 ; VI.27 et VI.28).

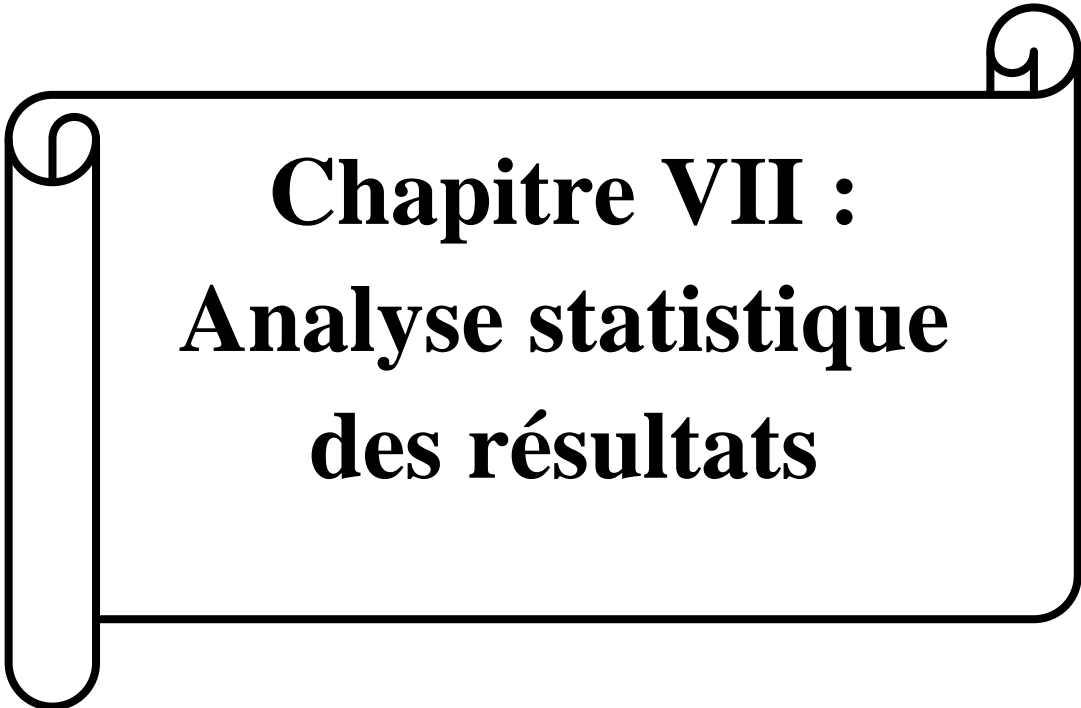
L'augmentation de la dimension fractale des échantillons est justifiée par l'ouverture de leur fissure ou la présence d'une fissure large (la couleur noire, qui indique la fissure, est le niveau maximal de la couleur grise identifiée par le programme implémenté pour la méthode du calcul DBC), qui est due aux déformations de la rugosité et la fragmentation des échantillons surtout sur les côtés (DFV). Et vice versa sa diminution est remarquée quand les fissures commencent à se refermer.

VI.4) Conclusion

La méthode de Differential Box Counting (DBC) est une bonne méthode pour le calcul de la dimension fractale de rugosité. Cette dimension est l'une des caractéristiques principales de la géométrie fractale des sols. Elle permet de mettre en évidence le niveau de fragmentation et d'irrégularité des échantillons, ce qui aide à analyser le phénomène de l'influence des changements climatiques sur les sols et à comprendre leur comportement.

Les résultats obtenus dans ce chapitre avec la méthode DBC confirment les résultats obtenus par la méthode Box Counting (BC) où les deux méthodes sont affectées par la structure et les changements de texture et de forme des échantillons mais la méthode de DBC dépend aussi de la variation du niveau du gris qui indique la présence des fissures et leur degré d'ouverture.

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



Chapitre VII :
Analyse statistique
des résultats

VII-1) Introduction

L'analyse statistique est une méthode d'analyse des résultats d'une enquête à fondement statistique visant à donner le moyen de décider objectivement si les résultats obtenus sont révélateurs d'une réalité ou sont attribuables aux fluctuations de l'échantillonnage.

Les objectifs de l'analyse statistique sont donc d'évaluer un paramètre, de déterminer si une différence entre deux variables et d'évaluer la relation entre eux, comme dans notre cas dans ce chapitre on va présenter la relation entre les résultats du calcul obtenus des méthodes 2D et 3D.

Le choix de la méthode d'analyse statistique est en fonction de type des données, du nombre d'échantillons, et du nombre et de la nature des variables, dans notre étude on s'intéresse aux tests de régression linéaire et de l'ACP (Analyse en Composante Principale).

VII-2) Régression linéaire

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 la quelle on cherche une réponse (DOMINIQUE, 2006; RAKOTOMALALA, 2011 ; JULIEN.J, 2014). Dans le cas des sols étudiés, la régression est représentée par un nuage de point exprimant le taux de corrélation des différents paramètres géotechniques choisis. Chaque nuage de point est ajusté à une droite d'équation : $Y=aX+b$.

La droite est également jointe du coefficient de corrélation.

Echantillon				V2D	V3D	M
Boghi	Echantillon 1 avant l'essai	1	DFH	1.9775	2.0485	156.25
		2	DFV	1.8831	1.9736	156.25
	Echantillon 1 après l'étuve	3	DFH	1.8466	2.0455	122.704
		4	DFV	1.8111	1.9665	122.704
	Echantillon 1 à la fin de l'essai	5	DFH	1.7871	2.0147	163.039
		6	DFV	1.7942	1.9563	163.039
	Echantillon 2 avant l'essai	7	DFH	1.9076	2.0485	155.26
		8	DFV	1.8984	1.9736	155.26
	Echantillon 2 après l'étuve	9	DFH	1.8666	2.0156	120.407
		10	DFV	1.7981	1.9936	120.407
	Echantillon 2 à la fin de l'essai	11	DFH	1.7971	2.0248	160.1
		12	DFV	1.7112	1.9834	160.1
DEM	Echantillon 1 avant l'essai	13	DFH	1.8715	2.0323	174.121
		14	DFV	1.8547	1.9923	174.121
	Echantillon 1 après l'étuve	15	DFH	1.8259	2.009	150.859
		16	DFV	1.8097	2.0196	150.859
	Echantillon 1 à la fin de l'essai	17	DFH	1.7943	2.0027	180.421
		18	DFV	1.7846	2.0175	180.421
Echantillon 2 avant l'essai	19	DFH	1.9382	2.0323	179.613	

Chapitre VII : Analyse statistique des résultats

		20	DFV	1.9297	1.9923	179.613	
		21	DFH	1.8975	1.9686	158.147	
	Echantillon 2 après l'étuve	22	DFV	1.8698	1.9386	158.147	
	Echantillon 2 à la fin de l'essai	23	DFH	1.8149	2.0226	183.107	
24		DFV	1.7925	1.9694	183.107		
Les Chabane	Echantillon 1 avant l'essai	25	DFH	1.9991	1.9609	163.438	
		26	DFV	1.98	1.9892	163.438	
	Echantillon 1 après l'étuve	27	DFH	1.9833	1.9967	144.169	
		28	DFV	1.9511	1.9715	144.169	
	Echantillon 1 à la fin de l'essai	29	DFH	1.8914	2.014	170.727	
		30	DFV	1.8473	2.0011	170.727	
	Echantillon 2 avant l'essai	31	DFH	1.9583	1.9609	169.529	
		32	DFV	1.9495	1.9892	169.529	
	Echantillon 2 après l'étuve	33	DFH	1.8864	2.0074	148.462	
		34	DFV	1.8799	1.9789	148.462	
	Echantillon 2 à la fin de l'essai	35	DFH	1.8649	2.0255	174.521	
		36	DFV	1.8533	1.9969	174.521	
L'OPGI	Echantillon 1 avant essai	37	DFH	1.9376	1.9975	186.002	
		38	DFV	1.8582	2.0071	186.002	
	Echantillon 1 après essai	39	DFH	1.9331	2.0287	193.49	
		40	DFV	1.6429	2.0126	193.49	
	Echantillon 2 avant essai	41	DFH	1.9227	1.9952	179.213	
		42	DFV	1.7809	2.0245	179.213	
	Echantillon 2 après essai	43	DFH	1.9216	2.0199	185.004	
		44	DFV	1.7624	2.0105	185.004	
CHU	Echantillon 1 avant essai	45	DFH	1.9414	2.0045	207.368	
		46	DFV	1.8246	2.0015	207.368	
	Echantillon 1 après essai	47	DFH	1.8338	2.0442	199.98	
		48	DFV	1.6784	2.0165	199.98	
	Echantillon 2 avant essai	49	DFH	1.9235	1.9963	171.126	
		50	DFV	1.8686	2.0421	171.126	
	Echantillon 2 après essai	51	DFH	1.9171	2.0252	174.002	
		52	DFV	1.6620	2.0141	174.002	
Boghni	Avant essai	53	DFH	1.972	2.0472	156.35	
		54	DFV	1.972	1.9191	156.35	
	Après 1 cycle	55	DFH	1.8654	2.0094	127.895	
		56	DFV	1.8654	2.0036	127.895	
	Après 2 cycles	57	DFH	1.8552	2.0196	127.097	
		58	DFV	1.8552	2.0113	127.097	
	Après 3 cycles	59	DFH	1.7681	2.0254	126.697	
		60	DFV	1.7681	2.0154	126.697	
	Après 4 cycles	61	DFH	1.62	2.0602	125.799	
		62	DFV	1.6201	2.015	125.799	
	DEM	Avant essai	63	DFH	1.9812	2.0254	168.131
			64	DFV	1.9685	1.9584	168.131
Après 1 cycle		65	DFH	1.9532	2.0156	148.363	
		66	DFV	1.9601	2.0262	148.363	
Après 2 cycles		67	DFH	1.8793	2.0235	147.863	
		68	DFV	1.8986	1.9834	147.863	
Après 3 cycles		69	DFH	1.7891	2.033	147.764	
		70	DFV	1.8111	1.9612	147.764	
Après 4 cycles		71	DFH	1.6987	2.0536	146.665	
		72	DFV	1.6894	1.991	146.665	
Les Chabane		Avant essai	73	DFH	1.9981	1.9568	174.022
			74	DFV	1.9883	1.9878	174.022
	Après 1 cycle	75	DFH	1.9495	2.0094	153.155	

Chapitre VII : Analyse statistique des résultats

	Après 2 cycles	76	DFV	1.8937	1.9916	153.155
		77	DFH	1.9001	2.0252	153.055
	Après 3 cycles	78	DFV	1.7984	2.0025	153.055
		79	DFH	1.8351	2.0336	152.656
	Après 4 cycles	80	DFV	1.7164	1.9842	152.656
		81	DFH	1.7134	2.0162	149.960
L'OPGI Echantillon 1	Avant essai	82	DFV	1.698	2.0109	149.960
		83	DFH	1.9733	1.9958	192.492
	Après 1 cycle	84	DFV	1.9163	2.0011	192.492
		85	DFH	1.8642	2.0389	183.706
	Après 2 cycles	86	DFV	1.8962	2.0097	183.706
		87	DFH	1.8542	2.0243	183.606
	Après 3 cycles	88	DFV	1.8581	2.0213	183.606
		89	DFH	1.7692	2.0278	183.546
	Après 4 cycles	90	DFV	1.7312	2.0093	183.546
		91	DFH	1.6018	2.0295	183.146
Echantillon 2 L'OPGI	Avant essai	92	DFV	1.6856	2.0012	183.146
		93	DFH	1.9674	2.0112	196.785
	Après 1 cycle	94	DFV	1.9060	2.0158	196.785
		95	DFH	1.7560	2.018	191.094
	Après 2 cycles	96	DFV	1.7518	2.0289	191.094
		97	DFH	1.7460	2.0167	190.940
	Après 3 cycles	98	DFV	1.7360	2.0091	190.940
		99	DFH	1.7181	2.0416	190.894
	Après 4 cycles	100	DFV	1.7281	2.02	190.894
		101	DFH	1.6321	2.0399	190.795
Echantillon 1 CHU	Avant essai	102	DFV	1.6937	2.0045	190.795
		103	DFH	1.9557	1.9923	199.98
	Après 1 cycle	104	DFV	1.9413	2.0027	199.98
		105	DFH	1.9133	2.0160	167.632
	Après 2 cycles	106	DFV	1.8542	2.0081	167.632
		107	DFH	1.9049	2.0309	167.537
	Après 3 cycles	108	DFV	1.7871	2.0125	167.537
		109	DFH	1.8488	2.0163	168.53
	Après 4 cycles	110	DFV	1.7751	2.011	168.53
		111	DFH	1.7594	2.0346	167.502
Echantillon 2 CHU	Avant essai	112	DFV	1.7674	2.0128	167.502
		113	DFH	1.9940	2.0022	211.661
	Après 1 cycle	114	DFV	1.9442	2.0039	211.661
		115	DFH	1.9443	2.0207	171.326
	Après 2 cycles	116	DFV	1.9444	2.0095	171.326
		117	DFH	1.9445	2.0243	171.229
	Après 3 cycles	118	DFV	1.9446	2.0181	171.229
		119	DFH	1.9447	2.0347	171.165
	Après 4 cycles	120	DFV	1.9448	2.0088	171.165
		121	DFH	1.9449	2.0288	171.026
Boghni	Echantillon 1 avant essai	122	DFV	1.9450	2.002	171.026
		123	DFH	1.9451	2.0491	153.854
	Echantillon 1 après l'étuve	124	DFV	1.9452	1.9172	153.854
		125	DFH	1.9453	2.0768	146.270
	Echantillon 1 à 10 cycles	126	DFV	1.9454	2.0106	146.270
		127	DFH	1.9455	2.0104	133.187
	Echantillon 2 avant essai	128	DFV	1.9456	1.9828	133.187
		129	DFH	1.9457	2.0491	167.033
Echantillon 2 après l'étuve	130	DFV	1.9458	1.9172	167.033	
	131	DFH	1.9459	2.0619	149.452	

	Echantillon 2 à 10 cycles	132	DFV	1.9460	2.0584	149.452
		133	DFH	1.9461	2.0407	140.974
		134	DFV	1.9462	2.0508	140.974
DEM	Echantillon 1 avant essai	135	DFH	1.9463	2.0257	180.811
		136	DFV	1.9464	1.9607	180.811
	Echantillon 1 après l'étuve	137	DFH	1.9465	2.0475	170.140
		138	DFV	1.9466	1.9708	170.140
	Echantillon à 10 cycles	139	DFH	1.9467	2.0432	162.041
		140	DFV	1.9468	1.9691	162.041
Les Chabane	Echantillon 1 avant essai	141	DFH	1.9469	1.9555	175.919
		142	DFV	1.9470	2.0045	175.919
	Echantillon 1 après l'étuve	143	DFH	1.9471	2.0499	165.100
		144	DFV	1.9472	2.0437	165.100
	Echantillon 1 à 10 cycles	145	DFH	1.9473	2.0235	155.052
		146	DFV	1.9474	2.0219	155.052
	Echantillon 2 avant essai	147	DFH	1.9475	1.9555	173.423
		148	DFV	1.9476	2.0045	173.423
	Echantillon 2 après l'étuve	149	DFH	1.9477	2.0516	164.212
		150	DFV	1.9478	2.0129	164.212
	Echantillon 2 à 10 cycles	151	DFH	1.9479	2.0127	154.353
		152	DFV	1.9480	2.0025	154.353

Tableau VII.1. Représentation de tous les résultats à utiliser dans l'analyse statistique.

Où :

V2D : les résultats de calcul de la dimension fractale pour chaque essai par la méthode 2D.

V3D : les résultats de calcul de la dimension fractale par la méthode 3D.

Et **M** présente les valeurs de la masse des échantillons durant les essais.

En traitant les résultats du tableau VII.1 sur R ; pour comparer les résultats de la méthode 2D et ceux de 3D on a trouvé les résultats suivantes (Figure VII.1).

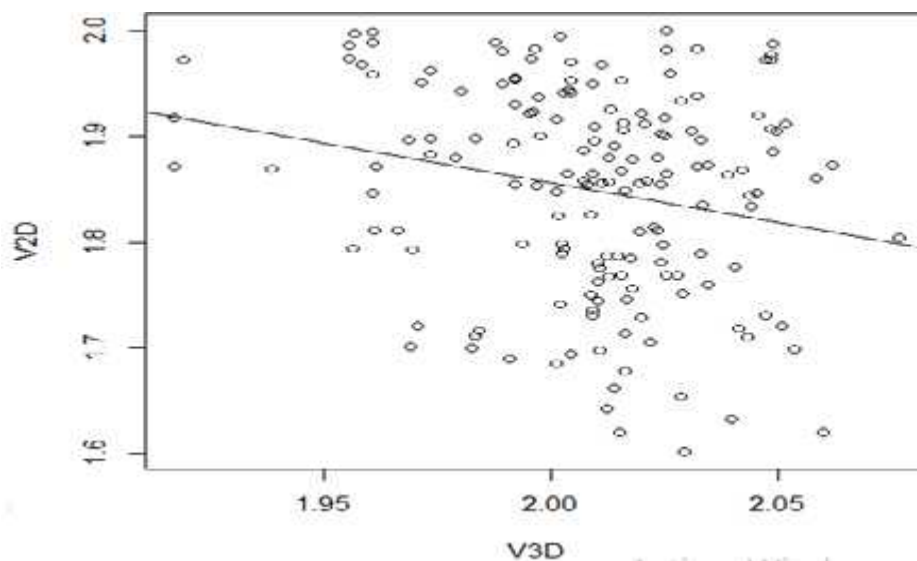


Figure VII.1. Résultats de la régression linéaire.

) **Interprétation des résultats**

A partir des résultats de R :

L'équation de la droite de régression est $Y = aX + b$

$a = -0.7466$ (est la pente de la droite)

Et $b = 3.3495$

Le coefficient de corrélation $R^2 = 0.04209$ est très loin de 1. Ce qui confirme les résultats de la p -value = 0.00484 > 0.05, donc l'hypothèse nulle est rejetée et on accepte l'hypothèse alternative qui dit qu'il n'y a pas de relation entre les deux variables corrélées ; la dimension fractale bidimensionnelle et celle qu'est tridimensionnelles.

Les deux étoiles signifient que la relation entre les deux variables est très très faible presque négligeable, ce qui implique qu'il n'y a pas de relation entre les résultats de la méthode 2D et ceux de la méthode 3D.

VII-3) Analyse en Composante Principale

Une fois un ensemble de solutions identifié par l'algorithme génétique, une analyse statistique basée sur une analyse en composantes principales (ACP) est employée pour décrire cet échantillon. Cette méthode d'analyse factorielle permet de définir les directions principales d'un ensemble de points. Son but est de transformer des variables initiales en de nouvelles variables, appelées facteurs. Les facteurs sont des combinaisons linéaires des variables initiales. En pratique, à partir d'un ensemble de solutions identifiées, la matrice des corrélations est calculée. De cette matrice, les valeurs propres et les vecteurs propres sont déduits. Les vecteurs propres donnent les directions principales du nuage. Ils servent à identifier des corrélations entre paramètres. Les valeurs propres donnent l'inertie de chaque axe. Elles servent à interpréter la sensibilité des paramètres recherchés. De cette analyse, un ellipsoïde est défini pour borner les solutions identifiées. Les axes de l'ellipsoïde correspondent aux vecteurs propres. La taille des axes correspond aux valeurs maximales des facteurs. Cet ellipsoïde représente les solutions du problème. (LEVASSEUR.S, 2007). Mathématiquement l'ACP est une technique de projection orthogonale linéaire qui projette les observations multidimensionnelles représentées dans un sous-espace de dimension p (p est le nombre de variables observées) dans un sous-espace de dimension inférieure q ($q < p$) en respectant le mieux les distances entre les individus formant un nuage de points multidimensionnel, ce qui revient à maximiser la variance des projections.

) **Interprétation des résultats**

La figure VII.2 et la figure VII.3 représentent les résultats du test de l'ACP obtenues pour les valeurs de calcul de la dimension fractale par les méthodes 2D et 3D et les valeurs de la masse M des échantillons où on remarque d'après la figure VII.2 que la masse est corrélée positivement avec 2D par ailleurs elle est corrélée négativement avec 3D, qui est corrélée de la même façon avec 2D.

Le second graphe (Figure VII.3) 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.

Comme on voit bien dans le graphe la plupart des individus sont proches sauf Boghni après l'essai dégradabilité après 2 cycles (individus 57 et 58) et après 4 cycles (individu 62) et boghni après l'étuve dans l'essai de Gel-Dégel (individu 4).

Et l'échantillon1 CHU après 2 cycles de dégradabilité (individu 108) et après l'essai de Gel-Dégel (individu 47).

VII-4) Conclusion

Dans ce chapitre on a étudié la corrélation entre les résultats du calcul de dimension fractale en 2D et en 3D avec la régression linéaire à l'aide de logiciel R où on a constaté qu'il n'y a pas de relation entre eux.

La méthode statistique donne toujours l'outil indispensable pour prévoir les relations existant entre les différentes variables quantitatives où on a appliqué les tests de la régression linéaire et de l'ACP.

L'ACP est une méthode qui a pour but de rendre plus compréhensible la relation entre un ensemble des variables quantitatives contenues dans un tableau ainsi c'est l'une des méthodes qui révèle simplement ce qui existe dans vos données.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude nous a permis de comprendre mieux l'influence des changements climatiques sur les sols étudiés, et on a fait une comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques du calcul de la dimension fractale par le logiciel MATLAB en utilisant deux méthodes 2D et 3D, et on a fait une analyse statistique pour comparer les résultats entre eux par le logiciel R.

Les principaux résultats obtenus permettent de tirer les conclusions suivantes :

-Le climat a un rôle important sur le changement de la texture, du volume et même des paramètres physiques chimiques des sols.

-Le changement climatique est l'origine de plusieurs phénomènes géotechniques tels que le retrait-gonflement, gel-dégel et les fissurations qui influent directement sur les sols fins et engendrent des dégâts comme les glissements des terrains, les tassements, effondrements, etc.

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

-La méthode Déferential Box Counting est une méthode inventée pour améliorer la méthode de Box Counting. Elle est une bonne méthode pour le calcul de la dimension fractale de rugosité et des fissures et elle se base sur la variation de gris.

-L'analyse de la dimension fractale d'une image semble très véritablement un outil puissant pour comparer les caractéristiques des sols liées à leur fragmentation et leur rugosité. Les algorithmes donnent donc une estimation satisfaisante de la dimension fractale des sols.

-L'analyse statistique des données est une méthode qui nous a facilité la comparaison entre les résultats obtenus par deux variables ou plus.

Le changement climatique est une grande menace dans le domaine de génie civil où il faut prendre de précautions avant chaque projet de construction soit on utilise des techniques d'amélioration des sols ou avec des méthodes estimatives avec une étude plus poussée des paramètres moteurs du gonflement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- J **ACHIR. M (2011)** « Caractérisation du phénomène d'écrasement par l'étude de la dimension fractale des grains » Mémoire de magister en génie civil option Géotechnique et Environnement, LGEA, Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- J **BEN (2008)** « Les indices climatiques et leur significations écologiques en Algérie orientale. Centre Université Constantine.
- J **BESKOW.G (1935)** « Soil freezing and frost heaving » Sver. Geol. Undersökning, 1935.
- J **BELCASTRO. P (2009)** « Mandelbulb: Mandelbrot en 3D » Publié dans la rubrique AILLEURS.
- J **BOUDET. A (2008)** « Objets fractals, une initiation au concept et à ses applications » Site web Techno science, l'actualité technologique et scientifique.
- J **BOUDLALO.O (2013)** « Etude expérimentale du comportement mécanique des fines dans la stabilité des talus et des fondations », Thèse de Doctorat de L'UMMTO.
- J **BOUZEBOUDJA. A (2016)** « L'influence de la dimension fractale en 3D sur les caractéristiques mécaniques des matériaux granulaires. » Thèse de Doctorat en génie civil option Géotechnique et Environnement, LGEA, Université Mouloud Mammeri de Tizi- Ouzou.
- J **BUFFALO. M (1989)** « L'érosion des terres noires dans la région de Buech (Hautes-Alpes, France) » ; Thèse de Doctorat en géologie, Aix-Marseille III.
- J **CAILLEUX. A et THELLIERE.E (1947)** « La détermination de la couche de sol gelé » C.R.A.S, 224.
- J **CHENG. Q (1999)** « The gliding box method for multifractal modeling » Computer. Geoscience, vol. 25, pp. 1073-1079.
- J **COLLINS. K et MCGOWN. A (1974)** « The form and function of microfabric features in a variety of natural soils » Géotechnique 24, n°2 : pp 223-254.
- J **DAMIEN. C (2005)** « Le développement durable par l'exemple : le cas du changement climatique » Agence de l'Environnement et de la maîtrise de l'énergie(ADEME), Lyon.
- J **DELAHAYE. D et Le ROUX.A (1975)** « Désordres sur des remblais en marne » Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées. - 75 -Réf. 1975, pp 113-124.
- J **DOMINIQUE L (2006)** « Régression multiple : principes et exemples d'application », UMR 5 603 CNRS, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 33p

- J **DU. G et YEO. T.S (2002)** « A novel Multifractal Estimation Method and Its Application to Remote Image Segmentation » IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, vol. 40, no.4, pp. 980-982.
- J **DUMAS. P ; RIBOLI-SASCO.L ; SPYRATOS.V et KURITA.F (2005)** « Fonctionnement du système climatique, perturbations humains, dérèglements dangereux » pp 17.
- J **DUNOYER de SEGONZAC. G (1969)** « Les minéraux argileux dans la diagénèse, passage au métamorphisme » Mémoire du Service de la carte géologique d'Alsace et de Lorraine, n° 29.
- J **FALCONER. K, CHICHESTER, WILEY. J et SONS (1990)** « Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications » 2e éd, poche (ISBN 978-0 470-84862-3) (LCCN 2004271361).
- J **FARAH. A (2014)** « Changement climatique ou variabilité climatique dans l'Est algérien » Mémoire de Magister, Université Constantine, 109 p.
- J **GIEC. (2007)**. Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse, p. 30.
- J **GIEC (2008)** « Glossaire du document technique VI, le changement climatique et l'eau ».
- J **GREUILLET. C, GALSOMIES. L (2013)** « L'îlot de chaleur urbain et le lien avec la qualité de l'air urbain heat island and linkages with air quality, pollution atmosphérique.163
- J **GRACES Groupe de Réflexion Académies et Conseil Economique et Social (2006)** « Le changement climatique » conseil économique et social, Académie des sciences, Académie des technologies, Académie des sciences morales et politiques.
- J **GUILLIEN.Y (1949)** « Gel et dégel du sol : les mécanismes morphologiques » In : L'information géographique, volume 13,n°3.Numéro spécial de Morphologie. pp. 104-116.
- J **HENSON. R (2008)** « The Rough guide to climate change » 2ndEdition Rough guides, 384p.
- J **HUANG. G.H et ZHAN. W.H (2002)** « Fractal property of soil particle size distribution and its application », Acte Pedologica Sinica, 39, pp. 490-497.
- J **HYSLIP. J et VALLEJO. L (1997)** « Fractal analysis of the roughness and size distribution of granular material » Engineering Geology, vol 48, 3-4, 1 pp. 231-244.

- J **JIN. X.C, HONG. S.H et JAYASOORIAH (1995)** « A practical method for estimating fractal dimension » Pattern Recognition Letters, vol. 16, pp. 457-464.
- J **JOSIANE. L (2006)** « La géométrie fractale » Mémoire comme exigence partielle de la maîtrise en Mathématiques et Informatique Appliquées Université du QUEBEC A TROIS-RIVIERES.
- J **JULIEN J (2014)** « Modélisation Statistique », Polytech'lille Département G.I.S., 57p
- J **KELANEMER. A et HAMADOU. M (2016)** « Stabilisation du gonflement à la chaux et au ciment appliquée aux couches de formes des chaussées routières » Mémoire de master en génie civil option Géotechnique, Université M'Hamed Bougara de Boumerdes.
- J **KICHI. H (2013)** « Caractérisation mécanique et minéralogique des marnes de la grande kabylie (Application aux marnes du centre) » Thèse de master.
- J **LAMBE.T. W(1953)** « The structure of inorganic soil » Pro. Amer. Soc. Civil Eng., V. 79 Separate no.315, 49 pp.
- J **LANTAGNE. K, ALLIGAND. Q, BERUBE. P-L, HAMON. M et HUDON. S (2002)** « Les fractales » Un travail de vulgarisation scientifique réalisé par des étudiants du Cégep de Rimouski et de l'Institut Universitaire de Technologie de Cachan, Université Paris-Sud.
- J **LEE. W.L et HSIEH. K.S (2010)** « A robust algorithm for the fractal dimension of images and its applications to the classification of natural images and ultrasonic liver images » Signal Processing, vol. 90, pp. 1894-1904.
- J **LEHAMEL. M (2011)** « Segmentation d'images texturées à partir des attributs fractals » Mémoire de magister, Faculté de Génie Electrique et Informatique, Département Automatique Option Traitement d'image et reconnaissance de formes, Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- J **LENSSEN. N, SCHMIDT. G, HANSEN. J, MENNE. M, PERSIN. A, RUEDY. R and ZYSS. D (2019)** « Global surface température data :Gistemp :NASA Goddard Institue for space studies(GISS) Surface temperature analysis.
- J **LEVASSEUR. S (2007)** « Analyse Inverse en Géotechnique: développement d'une méthode à base d'algorithmes génétiques » Université Joseph-Fourier- Grenoble.
- J **LI. J, DU. Q et SUN. C (2009)** « An improved box-counting method for image fractal dimension estimation » Pattern Recognition, vol. 42, pp. 2460-2469.
- J **MANDELBROT. B.B (1975)** « Les objets fractals, forme, hasard et dimension » 190 pp. Editions Flammarion, Paris.
- J **MANDELBROT. B (1982)** « The Fractal Geometry of Nature » New York : Freeman.

- J **MANDELBROT. B (1983)** « The fractal geometry of nature » Edition W.II. Freeman, San Francisco, 461 pp.
- J **MITCHELL. J (1976)** « Fundamentals of soil behavior » Wiley, New York.
- J **OUAKIF. T (2017)** « Etude de la fissuration des marnes sous condition climatiques par la notion de dimension fractale. Mémoire de Master académique en génie civil option Géotechnique, LGEA, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- J **OURRAD. K (2018)** « L'étude des effets climatiques sur les sols fins et détermination de la dimension fractale » Mémoire de master en génie civil option Géotechnique, LGEA, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- J **OUTAYEB. S (2016)** « Evaluation de la dégradation chimique des grains de schiste à l'aide de la notion de la dimension fractale. » Mémoire de Master académique en génie civil option Géotechnique et Environnement, LGEA, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- J **PEJON. O J et Le ROUX. A et GUIGNARD. D (1997)** « Comportement à l'eau des roches argilo-marneuses, suivi du gonflement, importance de la minéralogie et des textures » Bulletin de l'association internationale de géologie de l'ingénieur, Paris N°55, pp105-119.
- J **PLESHANOV. V.S, NAPRYUSHKIN. A.A et KIBITKIN. V.V (2010)** « Use of the Theory of Fractals in Image Analysis Tasks » vol. 46, no. 1, pp. 86-97.
- J **RAKOTOMALALA R (2011)** « Pratique de la Régression Linéaire Multiple Diagnostic et sélection de variables », Version 2.0, Université Lumière Lyon 2, 174p.
- J **RAMADE. F (1984)** « Elément d'écologie fondamentale » Edition. Mc. GRAW-HILL, Paris.397 p.
- J **RHISSA. AG. B (2008)** « Etude de changement climatique au Nord-est Algérien ». Mémoire de Master en Hydraulique. Université Badji Mokhtar, Annaba.
- J **ROBITAILLE. V et TREMBLAY. D (1997)** « Mécanique des sols théorie et pratique » Modulo éditeur.
- J **RUSSEL. D, HANSON. J et OTT. E (1980)** « Dimension of strange attractors » Physical review Letters 45, 1175-1178.
- J **SCHMIDT. V (1965)** « Faciès, diagenesis and related reservoir properties in the Giga beds (upper Jurassic) Northwestern Germany in Dolomitization and Limestone diagenesis, Soc. Econ. Pal. Miner, Spec. Publ., 13, pp 124-168.
- J **SEZER. A, ALTUN. S et ERDOGAN. D (2008)** « Correlation between CBR Strength and fractal Dimensions of Sands » 12 eme Conference internationale de (IACMAG), 1-6 October, Goa Indian.

- J **TROLL.C (1928)** « Longue étude pour les pipkrakes du Japon » cf : Quartely journal of the royal meteorological society, 54 n°225.
- J **TYLER. SW and WHEATCRAFT. SW (1992)** « Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations » Soil Sei. Soc. Am. J. 56: 362-369.
- J **WILLSON. RC ; MORDVINOV et ALEXANDER. V (2003)** « Secular total solar irradiance trend during solar cycles 21-23, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, Vol.30, No.5, 1199.
- J **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.
- J **YAHMI. L (2018)** « Etude de la variation de la dimension fractale des marnes sous conditions caniculaires » Mémoire de master en génie civil option Géotechnique, LGEA, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Sites d'internet utilisés

- J https://fr.wikipedia.org/wiki/Humidit%C3%A9_relative
- J www.infoclimat.fr.