

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Laboratoire Geo materiaux, Environnement et Amenagement (LGEA)

**MEMOIRE DE MASTER ACADIMIQUE**

*Spécialité : Génie Civil*

*Option : Géotechnique*

*Thème*

***Etude de la variation de la dimension fractale des  
marnes sous conditions caniculaires***

Réalisé par : *M<sup>elle</sup> YAHMI Lila*

Devant le jury composé de:

Mr MELBOUCI BACHIR,	Professeur	à l'UMMTO	Président
Mme BOUZEBODJA Aldjia ,	Maitre de Conférence-B	à l'UMMTO	Promotrice
Mme MOUBAREK Houria,	Maitre Assistante –A	à l'UMMTO	Examinatrice

**Promotion LMD 2017/2018**

## **REMERCIEMENTS**

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

*Mes vifs remerciements vont à ma promotrice, M<sup>me</sup> BOUZEBOUDJA Aldjia, Maître de Conférence-B à l'UMMTO, pour sa prise en charge pédagogique, ses conseils judicieux, ses orientations et sa patience.*

*Je tiens à exprimer toute ma gratitude au Professeur MELBOUCI Bachir, Professeur à l'UMMTO et directeur de laboratoire LGEA, pour les moyens qu'il a mis à ma disposition afin de pouvoir réaliser ce travail.*

*Mes sincères remerciements vont aussi vers le membre du jury, M<sup>me</sup> Moubarek Houria, Maître Assistante-A à l'UMMTO, qui me fait l'honneur d'examiner ce modeste travail.*

*Enfin, mes sincères remerciements et ma profonde gratitude sont exprimés pour toutes les personnes qui m'ont aidé à réaliser ce travail ; les doctorants de géotechnique qui m'ont aidé beaucoup dans la réalisation des essais, à tous les responsables et les employés des deux laboratoires LNHC et LMBTP de Tizi-Ouzou qui m'ont donné les échantillons intacts et même des idées sur les essais.*

# **Dédicaces**

*Je dédie ce lapidaire travail :*

*A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et elle m'a soutenu durant toute ma vie, mon mari et mes enfants M<sup>ed</sup> akli et Idris afin de me voire atteindre mes buts et mes frères Lyes et Aziz.*

*A mes chères sœurs, qui m'ont toujours encouragée pour continuer jusqu'à la fin.*

*A ma belle-mère et ma belle-sœur Fadhila,*

*A Toute la famille et à mes proches.*

*A mes copines sans exception et à tous les étudiants de ma promotion.*

# Sommaire

## Remerciements

## Dédicaces

## Liste des figures

## Liste des tableaux

## Liste des symboles et notations

## Références bibliographique

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## Chapitre I : Généralités sur la notion fractale et la dimension fractale

Introduction .....	3
I-2) Définition .....	3
I-3) Histoire des fractales .....	3
I-3-1) Les premières images fractales .....	4
I-4) Caractéristique d'un objet fractal .....	5
I-5) Les fractales dans la nature .....	5
I-5-1) Les fractales en biologie végétale .....	6
I-5-1-1) Les ramifications des branches.....	6
I-5-1-2) L'inflorescence.....	6
I-5-1-3) Les nervures des feuilles.....	7
I-5-2) Les fractales en morphologie animale .....	7
I-5-2-1) Les coquilles .....	7
I-5-2-2) Les éponges de mer .....	8
I-5-3) Les fractales en anatomie.....	8
I-5-3-1) Les vaisseaux sanguins - exemple des poumons .....	8
I-5-3-2) L'intestin grêle .....	9
I-5-4) Les fractales se retrouvent également en géologie.....	9
I-5-4-1) Les côtes des pays.....	9
I-5-4-2) Les montagnes .....	10
I-5-4-3) Les Flocons de neige .....	10
I-5-4-4) Les rivières, fleuves et cours d'eau .....	11
I-10) Objets fractal .....	11

I-10-1) Le flocon de Koch.....	11
I-10-2) Le triangle de Sierpinsky .....	12
I-10-3) Le tapis de Sierpinsky .....	13
I-10-4) Eponge de Menger .....	13
I-10-5) L`ensemble de Cantor .....	14
I-10-6) L`ensemble de Mandelbrot .....	14
I-10-7) L`ensemble de Julia .....	14
I-11) Les différents types de fractales .....	16
I-11-1) Fractale déterministes .....	16
I-11-2) Fractale non déterministes .....	16
I-6) Notion de dimension .....	16
I-6-1) Dimension fractale .....	17
I-6-2) Dimension euclidienne ou topologique .....	17
I-6-3) Définition mathématique de la dimension fractale .....	18
I-6-4) Vérification avec la dimension classique .....	19
I-7) Dimension de Hausdorff-besicovitch ou dimension de recouvrement .....	19
I-8) Dimension de Bouligand-Minkowski .....	19
I-8-1) La saucisse de Minkowski .....	20
Conclusion.....	20

## **Chapitre II : Méthodes de calcul de la dimension fractale**

Introduction .....	21
II-1) Méthodes de calcul couramment utilisées .....	21
II-1-1) Surface-Périmètre (Area-Perimeter .....	21
II-1-2) Méthode du diviseur (Line Divider .....	23
II-1-3) Méthode des lignes parallèles.....	24
II-1-4) Méthode de compactage des boîtes (Box Counting .....	26
II-1-4-1) Calcul de la dimension fractale du contour du grain seulement.....	26
II-1-4-2) Calcul de la dimension fractale de la surface du grain.....	27
II-1-5) Méthode des masses .....	28
Conclusion.....	29

## **Chapitre III : Les effets des changements climatiques sur les sols**

Introduction .....	30
III-1) Notion de climat .....	30

III-2) L'Algérie est-elle touchée par le réchauffement climatique.....	30
III-3) Aperçu climatique global de l'année 2017 .....	32
III-3-1) Quelques déclarations sur l'état du climat mondial en 2017.....	32
III-3-2) Etat du climat Algérien en 2017 .....	32
III-4) Climat de Tizi Ouzou .....	32
III-5) Généralités sur les Sols.....	33
III-6) Définition de la marne .....	34
III-7) Caractéristiques des marnes.....	34
III-8) Identification visuelle .....	35
a. Les marnes saines .....	35
b. Les marnes altérées .....	35
III-9) L'altération des marnes .....	36
L'altération physique et mécanique .....	37
b- L'altération chimique.....	37
III-10) Influence du réchauffement climatique sur les sols.....	40
III-10-1) Les dégradations qui peuvent engendrer par les sols marneux .....	40
A-Retrait-gonflement .....	40
B-Gel – dégel .....	42
C- Les fissures.....	42
Conclusion.....	43

## **Chapitre IV : Essais d'identifications**

IV-1) Localisation géographique des marnes de la région de Tizi-Ouzou.....	44
IV-2) Caractéristiques physiques et chimiques .....	46
IV-2-1) Caractéristiques physiques .....	46
IV-2-1-1) La teneur en eau.....	47
IV-2-1-2) Masse volumique des sols .....	48
1-Masse volumique des grains solides des sols selon La norme (NF P 94 – 054) Méthode au pycnomètre .....	48
2-Masse volumique humide des sols (NF P 94 - 053) – Méthode de l'immersion dans l'eau.....	49
3-Masse volumique du sol sec (NF P 94 – 064) .....	50
IV-2-1-3) Indice des vides et degré de saturation .....	50
IV-2-1-4) L'analyse granulométrique par sédimentation [NF P94- 056] .....	52
IV-2-1-5) Les limites d'ATTERBERG [NF P 94-051] .....	56
IV-2-1-6) L'activité AC .....	63

IV-2-1-7) Mesure du potentiel de gonflement .....	64
IV-2-1-8) Mesure du potentiel de retrait .....	65
IV-2-1-9) Valeur au bleu de méthylène (VBS) (NF P 94 – 068) – Essai à la tâche .....	66
IV-2-2) les caractéristiques chimiques : laboratoire LNHC (BOUIRA .....	68
IV2-2-1) Teneur en carbonate de calcium CaCO <sub>3</sub> (NF P 94 – 048) – Méthode du calcimètre....	68
IV-2-2-2) Teneur en matières organiques-(NF P 94-047) - Méthode par calcination .....	69
IV2-2-3) Sulfates solubles dans l'acide -selon la norme NF EN 1744-1(P 18-660-1) .....	70
IV-3-2-4) Chlorures solubles dans l'eau-NF EN 1744-1(P 18-660-1) .....	72
Conclusion.....	73

## **Chapitre V : Eude des effets climatique au laboratoire**

INTRODUCTION.....	74
V-2) Compactage du sol prélevé au site Les Chabane .....	74
V-1) Préparation des échantillons .....	74
V-2-1) Les principes de base du compactage.....	75
V-2-2) Essai Proctor.....	75
V-2-3) Échantillonnage .....	77
V-2) Les essais réalisés .....	77
V-2-1) Essai Gel-Dégel .....	77
V-2-1-1)Principe d'essai .....	77
V-2-1-2) Appareillage .....	78
V-2-1-3) Déroulement d'essai .....	78
V-2-1-4) Images des échantillons .....	79
V-2-1-5) Les résultats obtenus .....	93
V-2-1-6) Interprétation des résultats .....	96
V-2-2) Essai de Dégradabilitéte .....	97
V-2-2-1) But de l'essai .....	97
V-2-2-2) Appareillage .....	97
V-2-2-3) Le déroulement de l'essai .....	97
V-2-2-4) Les images retenues des échantillons .....	98
V-2-2-5) Les résultats obtenus.. ..	103
V-2-3) Essai aux canicules.....	105
V-2-3-1) Principe d'essai .....	105
V-2-3-2) Appareillage .....	105
V-2-3-3) Déroulement d'essai .....	105

V-2-3-4) Les images retenues des échantillons .....	106
V-2-3-5) Les résultats obtenus .....	112
Conclusion .....	115

## **Chapitre VI : Calcule de la dimension fractale par la methode Box Counting**

Introduction .....	116
VI-1) Application de la méthode de Box Counting .....	116
VI-2) Résultats et interprétations .....	117
VI-2-1) Eessai de Dégradabilité .....	117
VI-2-2) Essai de gel-dégel.....	122
VI-2-3) Essai aux canicules.....	130
VI-2-2) Interprétation des résultats .....	135
Conclusion .....	136
Conclusion générale .....	137

## **LISTE DES SYMBOLES ET NOTATIONS**

<b><i>Notation</i></b>	<b><i>Définition</i></b>
<b>W</b>	Teneur en eau (%).
<b>w<sub>w</sub></b>	Masse de l'eau (g).
<b>w<sub>s</sub></b>	Masse de l'échantillon à l'état sec (g).
<b>m<sub>1</sub></b>	Masse du pycnomètre vide (g).
<b>m<sub>2</sub></b>	Masse du pycnomètre plein d'eau(g).
<b>m<sub>3</sub></b>	Masse du pycnomètre avec le matériau(g).
<b>m<sub>4</sub></b>	Masse du pycnomètre avec le matériau et l'eau(g).
<b>m<sub>s</sub></b>	Masse sèche (g).
<b>m<sub>h</sub></b>	Masse humide(g).
<b>ρ<sub>w</sub></b>	Masse volumique de l'eau égale à 1(g/cm <sup>3</sup> ).
<b>ρ<sub>s</sub></b>	La masse volumique des particules solides (g/cm <sup>3</sup> ).
<b>ρ<sub>d</sub></b>	Masse volumique du sol sec (g/cm <sup>3</sup> ).
<b>ρ<sub>h</sub></b>	Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> ).
<b>e</b>	Indice des vides.
<b>S<sub>r</sub></b>	Degrés de saturation (%).
<b>γ<sub>s</sub></b>	Poids spécifique des grains solides (N/m <sup>3</sup> ).
<b>γ<sub>w</sub></b>	Poids spécifique (N/m <sup>3</sup> ).
<b>V<sub>s</sub></b>	Volume des grains solides(cm <sup>3</sup> )
<b>V<sub>v</sub></b>	Volume des vides(cm <sup>3</sup> )
<b>V<sub>w</sub></b>	Volume de l'eau (cm <sup>3</sup> ).
<b>D</b>	Diamètre des grains (mm).
<b>W<sub>L</sub></b>	Limite de liquidité (%).
<b>W<sub>p</sub></b>	Limite de plasticité(%).
<b>I<sub>p</sub></b>	Indice de plasticité (%).
<b>I<sub>c</sub></b>	Indice de consistance (%).
<b>VBS</b>	La valeur de bleu de sol.
<b>M<sub>s</sub></b>	Masse sèche de la prise d'essai (g).
<b>M<sub>b</sub></b>	La masse de bleu permettant la saturation paradsorption(g).
<b>F2</b>	Proportion d'argile F2% < 2μm.

<b>Ac</b>	Activité de Skempton.
<b>DF<sub>R</sub></b>	Dimension fractale de rugosité.
<b>DF</b>	Dimension fractale.
<b>DFH</b>	Dimension fractale horizontale
<b>DFV</b>	Dimension fractale verticale
<b>C</b>	Une valeur constante qui décrit la similitude de la forme fractale.
<b>P</b>	Périmètre du grain(mm).
<b>A</b>	Surface du grain (mm).
<b>P(l)</b>	Périmèrepolygone(mm).
<b>D<sub>tot</sub></b>	Dimension totale de fractale.
<b>λ</b>	Espacement constant sur un ensemble de lignes parallèles.
<b>M(R&lt;r)</b>	Masse cumulative des particules avec la taille R plus petite qu'un comparatif Donnée de classer (g).
<b>M<sub>t</sub></b>	Masse totale des particules (g).
<b>r</b>	Taille de l'ouverture des passoirs (mm).
<b>r<sub>L</sub></b>	Dimension des particules maximale définie par la plus grande ouverture de la Taille des passoirs (mm).
<b>X</b>	Dimension des boîtes.
<b>N(X&gt;x)</b>	Nombre des boîtes.
<b>K</b>	Constante.
<b>M</b>	La pente de la droite la mieux adaptée à l'équation.
<b>DEM</b>	Draa el mizan
<b>ONM</b>	Organisation nationale de météorologie
<b>av.J.-C.</b>	Avant Jésus -cris

# LISTE DES FIGURES

## **Chapitre I :**

<b>Figure I-1 :</b> (a) Apollonius de Perge et (b) Albrecht Dürer .....	4
<b>Figure I-2 :</b> (a) Les premières étapes de la construction d'une baderne d'Apollonius, (b) Les trois cercles initiaux ayant permis de créer la baderne (c) Une baderne d'Apollonius.....	4
<b>Figure I-3:</b> Illustration des cinq premières étapes de la construction du pentagone de Dürer ..	5
<b>Figure I-4 :</b> Les branches d'un arbre.....	6
<b>Figure I-5 :</b> l'inflorescence .....	6
<b>Figure I-6 :</b> Les nervures des feuilles .....	7
<b>Figure I-7 :</b> Coquillage et le triangle de Sierpinsky.....	7
<b>Figure I-8 :</b> Eponge de mer .....	8
<b>Figure I-9 :</b> Les poumons .....	8
<b>Figure I-10 :</b> L'intestin grêle .....	9
<b>Figure I-11 :</b> Les côtes des pays.....	9
<b>Figure I-12 :</b> Les montagnes .....	10
<b>Figure I-13 :</b> Flocon de neige .....	10
<b>Figure I-14 :</b> les fleuves .....	11
<b>Figure I-15 :</b> Fragmentation du segment [AB] à l'itération zéro .....	11
<b>Figure I-16 :</b> Première itération, les segments ont pour longueur $L/3$ .....	12
<b>Figure I-17 :</b> Seconde itération, les segments ont pour longueur $L/3^2 = L/9$ .....	12
<b>Figure I-18 :</b> Flocon de Von Koch à la troisième itération.....	12
<b>Figure I-19 :</b> Le triangle de Sierpinsky .....	13
<b>Figure I-20 :</b> Tapis de Sierpinsky.....	13
<b>Figure I-21 :</b> L' Eponge de Menger .....	14
<b>Figure I-22 :</b> L'ensemble de Cantor .....	14
<b>Figure I-23 :</b> Ensemble de Mandelbrot .....	15
<b>Figure I-24 :</b> L'ensemble de Julia.....	15
<b>Figure I-25 :</b> Fractales déterministes d'un milieu granulaire .....	16
<b>Figure I-26 :</b> Fractales non déterministes d'un milieu granulaire.....	17
<b>Figure I-27 :</b> Pavages des lignes, surfaces ou volumes .....	17
<b>Figure I-28 :</b> Illustration du rapport entre dimensions fractale et euclidienne .....	18

<b>Figure I-29:</b> Mesure par comptage des boîtes dans un espace euclidien .....	18
<b>Figure I-30 :</b> Les 3 dimensions entières.....	18
<b>Figure I-31 :</b> Saucisse de Minkowski ou épaissement d'une courbe .....	20

## **Chapitre II :**

<b>Figure II-1 :</b> Calcul du périmètre et de la surface d'un grain ( $\phi = 6.3$ mm) à l'aide de logiciel Auto-CAD 2009.....	21
<b>Figure II-2 :</b> Application de la méthode de Area –Perimeter d'un gros grain de sable d'origine d'une pierre calcaire.....	23
<b>Figure II-3 :</b> (a) Image d'un grain de sable. (b), (c) et (d) contiennent les polygones tracés sur le grain avec des tailles de mesure respectivement de 2mm, 1mm et 0.25 mm .....	24
<b>Figure II-4 :</b> Calcul de la dimension fractale totale en (a), texturale (D1) et structurale (D2) en (b) .....	24
<b>Figure II-5 :</b> Présentation des exemples sur l'application de la méthode des lignes parallèles sur un grain de 5mm .....	25
<b>Figure II-6 :</b> Détermination de la dimension fractale par la méthode des lignes parallèles.....	25
<b>Figure II-7 :</b> Différentes étapes de maillage de l'image du grain et illustration de la méthode..	27
<b>Figure II-8 :</b> Calcul de la dimension fractale de la rugosité du grain.....	27
<b>Figure II-9 :</b> Différentes étapes de maillage de l'image du grain avec prise en compte de la surface intérieure du grain.....	28
<b>Figure II-10 :</b> Détermination de la dimension fractale DFr par la méthode des masses .....	29

## **Chapitre III :**

<b>Figure III-1 :</b> Comparaison entre les variations de températures en Afrique et la tendance de réchauffement mondial .....	30
<b>Figure III-2 :</b> pays à risques de changement climatiques, (l'université des Nations unies).....	31
<b>Figure III.4 :</b> Marne grisâtre - M'douha.....	35
<b>Figure III-5 :</b> Marne d'une couleur jeune La Lieude Hérault.....	36
<b>FigureIII-6 :</b> La marne gréseuse de M'douha .....	36
<b>Figure III-7 :</b> Calcaire marneux –Carlencas.....	36
<b>Figure III-8 :</b> La marne bleue .....	36
<b>Figure III-9 :</b> Une marne carbonifère .....	36
<b>Figure III-10 :</b> Altération de la surface et le profil de marne .....	37
<b>Figure III- 11 :</b> gonflement et la désagrégation de la marne .....	39
<b>Figure III- 12 :</b> Les plaquettes de carbonates Avant la présence de pyrite.....	39

<b>Figure III- 13</b> : Avant le gonflement Présence de pyrite (Points plus clairs).....	40
<b>Figure III-14</b> : Fissure sur les murs et Fissures diagonales.....	41
<b>Figure III-15</b> : Cisaillement au niveau de nœuds.....	41
<b>Figure III-16</b> : Risque à prendre en compte lors de la construction .....	41
<b>Figure III-17</b> : Dégradation des routes .....	42
<b>Figure III-18</b> : Dessiccation de la marne.....	43
<b>Figure III-19</b> : Humectation .....	43

## **Chapitre IV :**

<b>Figure IV-1</b> : Site de prélèvement de la marne 1 Boghni.....	45
<b>Figure IV-2</b> : Site de prélèvement de la marne 2 DEM .....	45
<b>Figure IV-3</b> : site de prélèvement de la marne 3 Dely Ibrahim.....	46
<b>Figure IV-4</b> : Site de prélèvement de la marne 4 les Chabane.....	46
<b>Figure IV-5</b> : Teneurs en eau naturelles des différents échantillons .....	47
<b>Figure IV-6</b> : Matériels utilisés .....	48
<b>Figure IV-7</b> : Masses volumiques des grains solides des marnes étudiées.....	49
<b>Figure IV-8</b> : Matériel d'essai de l'immersion dans l'eau.....	49
<b>Figure IV-9</b> : Masses volumiques sèches des marnes étudiées.....	50
<b>Figure IV-10</b> : Degrés de saturation $S_r$ des marnes étudiées.....	52
<b>Figure IV-11</b> : Matériel d'essai d'analyse granulométrique par sédimentométrie .....	53
<b>Figure IV-12</b> : Analyse granulométrique par sédimentation sol de Boghni.....	54
<b>Figure IV-13</b> : Analyse granulométrique par sédimentation sédimentométrie pour le sol de DEM.....	54
<b>Figure IV-14</b> : Analyse granulométrique par sédimentation site Dely Ibrahim.....	55
<b>Figure IV-15</b> : Analyse granulométrique par sédimentation site Les Chabane .....	56
<b>Figure IV-16</b> : Limites d'Atterberg.....	57
<b>Figure IV-17</b> : Coupelle de Casagrande .....	58
<b>Figure IV-18</b> : Détermination de la limite de liquidité .....	58
<b>Figure IV-19</b> : La fermeture de la rainure.....	58
<b>Figure IV-20</b> : La limite de plasticité.....	59
<b>Figure IV-21</b> : Courbe de limite de liquidité de la marne Boghni .....	60
<b>Figure IV-22</b> : Courbe de limite de liquidité de la marne DEM.....	60
<b>Figure IV-23</b> : Courbe de limite de liquidité de la marne Dely Ibrahim.....	61
<b>Figure IV-24</b> : Courbe de limite de liquidité de la marne de Les Chabane .....	61

<b>Figure IV-25</b> : Limites de liquidité moyennes des marnes étudiées .....	62
<b>Figure IV-26</b> : Potentiel de retrait d'après (Building Research Establishment, 1980) .....	66
<b>Figure IV-27</b> : Essai au bleu de méthylène (résultats de l'essai à la tâche) .....	67
<b>Figure IV-28</b> : Appareille de détermination de CaCO <sub>3</sub> .....	68
<b>Figure IV-29</b> : Principaux étapes de la méthode de calcimètre .....	68
<b>Figure IV-30</b> : Détermination de la teneur pondérale en matières organiques .....	71
<b>Figure IV-32</b> : Détermination des chlorures solubles dans l'eau .....	72

## **Chapitre v :**

<b>Figure V-1</b> : Objectifs du compactage .....	75
<b>Figure V-2</b> : Matériel de confection des éprouvettes d'essai Proctor normal .....	76
<b>Figure V-3</b> : Etape de démoulage du moule Proctor .....	76
<b>Figure V-4</b> : Courbe expérimentale d'essai Proctor pour le site Les Chabane .....	77
<b>Figure V-5</b> : Préparation des échantillons .....	77
<b>Figure V-6</b> : Enceinte climatique .....	78
<b>Figure V-7</b> : Marne de Boghni à l'état naturel .....	79
<b>Figure V-8</b> : Echantillon 1 après l'étuve .....	79.
<b>Figure V-9</b> : Echantillon 2 après l'étuve .....	80
<b>Figure V-10</b> : Echantillon témoin après 5 cycles de Gel-Dégel .....	80
<b>Figure V-11</b> : Echantillon 1-2 après 5 cycles de Gel-Dégel .....	80
<b>Figure V-12</b> : Echantillon témoin après 10 cycles de Gel-Dégel .....	80
<b>Figure V-13</b> : Echantillon 1 après 10 cycles de Gel-Dégel .....	81
<b>Figure V-14</b> : Echantillon 2 après 10 cycles de Gel-Dégel .....	81
<b>Figure V-15</b> : Echantillon témoin à 48h après l'essai .....	81
<b>Figure V-16</b> : Echantillon 1 à 48h après l'essai .....	81
<b>Figure V-17</b> : Echantillon 2 à 48h après l'essai .....	82
<b>Figure V-18</b> : Marne DEM à l'état naturel .....	82
<b>Figure V-19</b> : Echantillon 1 après l'étuve .....	82
<b>Figure V-20</b> : Echantillon 2 après l'étuve .....	82
<b>Figure V-21</b> : Echantillon témoin après 5 cycles de Gel-Dégel .....	83
<b>Figure V-22</b> : Echantillon 1-2 après 5 cycles de Gel-Dégel .....	83
<b>Figure V-23</b> : Echantillon témoin après 10 cycles de Gel-Dégel .....	83

<b>Figure V-24:</b> Echantillon 1 après 10 cycles de Gel-Dégel.....	84
<b>Figure V-25 :</b> Echantillon 2 après 10 cycles de Gel-Dégel.....	84
<b>Figure V-26 :</b> Echantillon témoin à 48h après l'essai.....	84
<b>Figure V-27 :</b> Echantillon 1 à 48h après l'essai.....	85
<b>Figure V-28 :</b> Echantillon 2 à 48h après l'essai.....	85
<b>Figure V-29 :</b> Marne Dely Ibrahim à l'état naturel.....	85
<b>Figure V-30 :</b> Echantillon 1 après l'étuve.....	86
<b>Figure V-31 :</b> Echantillon 2 après l'étuve.....	86
<b>Figure V-32 :</b> Echantillon témoin après 5 cycles de Gel-Dégel.....	86
<b>Figure V-33 :</b> Echantillon 1-2 après 5 cycles de Gel-Dégel.....	87
<b>Figure V-34 :</b> Echantillon témoin après 10 cycles de Gel-Dégel.....	87
<b>Figure V-35 :</b> Echantillon 1 après 10 cycles de Gel-Dégel.....	87
<b>Figure V-36 :</b> Echantillon 2 après 10 cycles de Gel-Dégel.....	88
<b>Figure V-37 :</b> Echantillon témoin à 48h après l'essai.....	88
<b>Figure V-38 :</b> Echantillon 1 à 48h après l'essai.....	88
<b>Figure V-39 :</b> Echantillon 2 à 48h après l'essai.....	89
<b>Figure V-40 :</b> Marne Les Chabane à l'état naturel.....	89
<b>Figure V-41 :</b> Echantillon 1 après l'étuve.....	89
<b>Figure V-42 :</b> Echantillon 2 après l'étuve.....	90
<b>Figure V-43 :</b> Echantillon témoin après 5 cycles de Gel-Dégel.....	90
<b>Figure V-44 :</b> Echantillon 1-2 après 5 cycles de Gel-Dégel.....	90
<b>Figure V-45 :</b> Echantillon témoin après 10 cycles de Gel-Dégel.....	91
<b>Figure V-46 :</b> Echantillon 1 après 10 cycles de Gel-Dégel.....	91
<b>Figure V-47 :</b> Echantillon 2 après 10 cycles de Gel-Dégel.....	91
<b>Figure V-48 :</b> Echantillon témoin à 48h après l'essai.....	92
<b>Figure V-49 :</b> Echantillon 1 à 48h après l'essai.....	92
<b>Figure V-50 :</b> Echantillon 2 à 48h après l'essai.....	92
<b>Figure V-51 :</b> Variation de la masse de la marne de Boghni au cours d'essai Gel-Dégel.....	93
<b>Figure V-52 :</b> Variation de la masse de la marne de DEM au cours d'essai Gel-Dégel.....	94
<b>Figure V-53 :</b> Variation de la masse de la marne de Dely Ibrahim au cours d'essai Gel-Dégel ...	94
<b>Figure V-54 :</b> Variation des masses de la marne Les Chabane au cours d'essai Gel-Dégel.....	95
<b>Figure V-55 :</b> Variation de la masse des échantillons témoins au cours d'essai Gel-Dégel.....	96
<b>Figure V-56 :</b> Saturation des échantillons à l'aide d'une seringue.....	98
<b>Figure V-57 :</b> Marne de Boghni à l'état naturel.....	98

<b>Figure V-58</b> : Marne de Boghni après le 1er cycle .....	98
<b>Figure V-59</b> : Marne de Boghni après le 2eme cycle .....	98
<b>Figure V-60</b> : Marne de Boghni après le 3eme cycle .....	99
<b>Figure V-61</b> : Marne de Boghni après le 4eme cycle .....	99
<b>Figure V-62</b> : Marne de DEM à l'état naturel.....	99
<b>Figure V-63</b> : Marne de DEM après le 1er cycle.....	99
<b>Figure V-64</b> : Marne de DEM après le 2emecycle.....	100
<b>Figure V-65</b> : Marne de DEM après le 3eme cycle.....	100
<b>Figure V-66</b> : Marne de DEM après le 4eme cycle.....	100
<b>Figure V-67</b> : Marne de Dely Ibrahim à l'état naturel.....	100
<b>Figure V-68</b> : Marne de Dely Ibrahim après le 1er cycle.....	101
<b>Figure V-69</b> : Marne de Dely Ibrahim après le 2eme cycle .....	101
<b>Figure V-70</b> : Marne de Dely Ibrahim après le 3eme cycle .....	101
<b>Figure V-71</b> : Marne de Dely Ibrahim après le 4eme cycle .....	101
<b>Figure V-72</b> : Marne Les Chabane à l'état naturel .....	102
<b>Figure V-73</b> : Marne Les Chabanes après le 1 er cycle.....	102
<b>Figure V-74</b> : Marne Les Chabanes après le 2eme cycle.....	102
<b>Figure V-75</b> : Marne Les Chabane après le 3eme cycle .....	102
<b>Figure V-76</b> : Marne Les Chabane après le 4eme cycle .....	103
<b>Figure V-77</b> : Variation des masses des échantillons de Boghni au cours de l'essai de Dégradabilité .....	104
<b>Figure V-78</b> : Variation des masses des échantillons de Draa El Mizan au cours d'essai de Dégradabilité .....	104
<b>Figure V-79</b> : Variation des masses des échantillons de Dely Ibrahim au cours d'essai deDégradabilité.....	104
<b>Figure V-80</b> : Variation des masses des échantillons Les Chabane au cours d'essai de Dégradabilité .....	105
<b>Figure V-81</b> : Site Boghni à l'état naturel .....	106
<b>Figure V-82</b> : Echantillon 1 après l'étuve .....	106
<b>Figure V-83</b> : Echantillon 2 après l'étuve .....	107
<b>Figure V-84</b> : Echantillon 1 à la fin de l'essai.....	107
<b>Figure V-85</b> : Echantillon 2 à la fin de l'essai.....	107
<b>Figure V-86</b> : site DEM à l'état naturel.....	108
<b>Figure V-87</b> : Echantillon 1 après l'étuve .....	108
<b>Figure V-88</b> : Echantillon 1 à la fin de l'essai.....	108

<b>Figure V-89</b> : site Dely Ibrahim à l'état naturel.....	109
<b>Figure V-90</b> : Echantillon 1 après l'étuve .....	109
<b>Figure V-91</b> : Echantillon 2 après l'étuve .....	109
<b>Figure V-92</b> : Echantillon 1 à la fin de l'essai.....	110
<b>Figure V-93</b> : Echantillon 2 à la fin de l'essai.....	110
<b>Figure V-94</b> : Site Les Chabane à l'état naturel.....	110
<b>Figure V-95</b> : Echantillon 1 après l'étuve .....	111
<b>Figure V-96</b> : Echantillon 2 après l'étuve .....	111
<b>Figure V-97</b> : Echantillon 1 à la fin de l'essai.....	111
<b>Figure V-98</b> : Echantillon 2 à la fin de l'essai.....	112
<b>Figure V-99</b> : Variation de la masse des échantillons de Boghni au cours d'essai aux canicules ..113	
<b>Figure V-100</b> : Variation de la masse des échantillons de DEM au cours d'essai aux canicules..	113
<b>Figure V-101</b> : Variation de la masse des échantillons de Dely Ibrahim au cours d'essai aux canicules .....	114
<b>Figure V-102</b> : Variation de la masse des échantillons de Les Chabane au cours d'essai aux canicules .....	114.

## **Chapitre VI :**

<b>Figure VI-1</b> : Exemple du calcul DFR par le logiciel MATLAB R2009b .....	117
<b>Figure VI-2</b> : Variation de la dimension fractale horizontale de la marne de Boghni.....	118
<b>Figure VI-3</b> : Variation de la dimension fractale verticale de la marne de Boghni .....	118
<b>Figure VI-4</b> : Variation de la dimension fractale horizontale de la marne DEM .....	119
<b>Figure VI-5</b> : Variation de la dimension fractale verticale de la marne DEM.....	119
<b>Figure VI-6</b> : Variation de la dimension fractale horizontale de la marne Dely Ibrahim .....	120
<b>Figure VI-7</b> : Variation de la dimension fractale verticale de la marne Dely Ibrahim.....	120
<b>Figure VI-8</b> : Variation de la dimension fractale horizontale de la marne Les Chabane .....	121
<b>Figure VI-9</b> : Variation de la dimension fractale verticale de la marne Les Chabane .....	121
<b>Figure VI-10</b> : Variation de la dimension fractale en fonction des Etapes de l'essai pour l'échantillon témoin .....	122
<b>Figure VI-11</b> : Variation de la dimension fractale en fonction des Etapes de l'essai pour l'échantillon 1 .....	123
<b>Figure VI-12</b> : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon 2.....	123
<b>Figure VI-13</b> : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon témoin .....	124

<b>Figure VI-14</b> : Variation de la dimension fractale en fonction des Etapes de l'essai pour l'échantillon 1.....	125
<b>Figure VI-15</b> : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon 2.....	126
<b>Figure VI-16</b> : Variation de la dimension fractale de l'échantillon témoin.....	126
<b>Figure VI-17</b> : Variation de la dimension fractale de l'échantillon 1 .....	127
<b>Figure VI-18</b> : Variation de la dimension fractale de l'échantillon 2 .....	128
<b>Figure VI-19</b> : Variation de la dimension fractale de l'échantillon témoin.....	128
<b>Figure VI-20</b> : Variation de la dimension fractale de l'échantillon 1 .....	129
<b>Figure VI-21</b> : Variation de la dimension fractale de l'échantillon 2 .....	130
<b>Figure VI-22</b> : Variation de la dimension fractale de l'échantillon 1 .....	131
<b>Figure VI-23</b> : Variation de la dimension fractale de l'échantillon 2 .....	131
<b>Figure VI-24</b> : Variation de la dimension fractale de l'échantillon 1 .....	132
<b>Figure VI-25</b> : Variation de la dimension fractale de l'échantillon 1 .....	133
<b>Figure VI-26</b> : Variation de la dimension fractale de l'échantillon 2 .....	133
<b>Figure VI-27</b> : Variation de la dimension fractale de l'échantillon 1 .....	134
<b>Figure VI-28</b> : Variation de la dimension fractale de l'échantillon 2. ....	135

## Liste des tableaux

### *Chapitre III :*

<b>Tableau III-1 :</b> Températures de Tizi-Ouzou (ONM de Boukhalfa), 1990-2017 enregistrées à l'ombre .....	36
--	----

### *Chapitre IV :*

<b>Tableau IV-1:</b> Détermination de la teneur en eau naturelle.....	47
<b>Tableau IV -2:</b> Masse volumique des grains solides .....	48
<b>Tableau IV-3 :</b> Masse volumique humide .....	49
<b>Tableau IV-4 :</b> Classification des masses volumiques sec .....	50
<b>Tableau IV-5 :</b> Masse volumique du sol sec.....	50
<b>Tableau IV-6 :</b> Indice des vides pour les deux sites .....	51
<b>Tableau IV-7 :</b> L'état de saturation du matériau d'après TERZAGHI.....	51
<b>Tableau IV-8 :</b> Degré de saturation pour les 7 sites.....	51
<b>Tableau IV-9 :</b> Résultats des analyses granulométriques par sédimentométrie pour le site de Boghni .....	53
<b>Tableau IV-10 :</b> Résultats des analyses granulométriques par sédimentométrie pour le sol de DEM .....	54
<b>Tableau IV-11 :</b> Résultats des analyses granulométriques par sédimentométrie pour le site delyibrahim.....	55
<b>Tableau IV-12 :</b> Résultats des analyses granulométriques par sédimentométrie pour le site Les Chabane.....	55
<b>Tableau IV-13 :</b> Limite de plasticité moyenne des marnes étudiées .....	59
<b>Tableau IV-14:</b> Limite de liquidité des échantillons de marnes .....	59
<b>Tableau IV-15 :</b> Classification selon l'indice de plasticité .....	62
<b>Tableau IV-16 :</b> Indice de plasticité des marnes étudiées.....	62
<b>Tableau IV-17 :</b> L'indice de consistance .....	62

<b>Tableau IV-18</b> : Résultats de l'indice de consistance .....	63
<b>Tableau IV-19</b> : Classes de l'activité Ac .....	63
<b>Tableau IV-20</b> : Activité (AC) de SKEMPTEN pour les deux sols .....	63
<b>Tableau IV-21</b> : Evaluation du potentiel de gonflement à partir de l'indice de plasticité .....	64
<b>Tableau IV.22</b> : Résultats du potentiel de gonflement à partir de l'indice de plasticité .....	64
<b>Tableau IV.23</b> : Degré d'expansion en fonction de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité .....	64
<b>Tableau IV.24</b> : Résultats de degré d'expansion en fonction de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité .....	65
<b>Tableau IV-25</b> : Evaluation du potentiel de retrait à partir de l'indice de plasticité .....	65
<b>Tableau IV-26</b> : Désignation du sol en fonction de son VBS.....	67
<b>Tableau IV-27</b> : Résultats des valeurs au bleu de méthylène .....	67
<b>Tableau IV-28</b> : La description des sols en fonction de leur teneur en CaCO <sub>3</sub> .....	68
<b>TableauIV-29</b> : Résultats de la teneur en carbonate de calcium.....	69
<b>TableauIV-30</b> : Description des sols en fonction de leur teneur en matières organiques.....	69
<b>TableauIV-31</b> : Résultats des matières organiques.....	70
<b>TableauIV-32</b> : Définition des classes d'agressivité des sols en fonction de la teneur en .....	71
<b>Tableau IV-33</b> : Les résultats d'agressivité des sols en fonction (%) de So <sub>4</sub> .....	71
<b>Tableau IV-34</b> : Les résultats des chlorures .....	72
<b>Tableau IV-35</b> : Résultats finales pour les caractéristiques physiques et chimiques .....	72

## ***Chapitre V :***

<b>Tableau V-1</b> : Résultats de l'essai Proctor site les Chabannes .....	76
<b>Tableau V-3</b> : Les masses des échantillons du site DEM durent l'essai de Gel-Dégel .....	93
<b>Tableau V-2</b> : Les masses des échantillons du site de Boghni durent l'essai de Gel-Dégel.....	93
<b>Tableau V-4</b> : Les masses des échantillons du site Dely Ibrahim durent l'essai de Gel-Dégel..	94
<b>Tableau V-5</b> : Les masses des échantillons du site Les Chabane durent l'essai de Gel-Dégel ..	95

<b>Tableau V-6</b> : Variation de la masse des échantillons témoins pendant l'essai d'enceinte climatique .....	95
<b>Tableau V-7</b> : Variation de la masse de la marne au cours de l'essai .....	103
<b>Tableau V-8</b> : Variation de la masse des échantillons de Boghni au cours de l'essai aux canicules .....	112
<b>Tableau V-9</b> : Variation de la masse des échantillons de DEM au cours de l'essai aux canicules .....	113
<b>Tableau V-10</b> : Variation de la masse des échantillons de Dely Ibrahim au cours de l'essai aux canicules .....	114
<b>Tableau V-11</b> : Variation de la masse des échantillons de les Chabanes au cours de l'essai aux canicules .....	114

## ***Chapitre VI :***

<b>Tableau VI-1</b> : Résultats de la dimension fractale horizontale de la marne Boghni .....	117
<b>Tableau VI-2</b> : Résultats de la dimension fractale verticale de la marne de Boghni.....	118
<b>Tableau VI-3</b> : Résultats de la dimension fractale horizontale de la marne DEM .....	119
<b>Tableau VI-4</b> : Résultats de la dimension fractale verticale de la marne DEM .....	119
<b>Tableau VI-5</b> : Résultats de la dimension fractale horizontale de la marne Dely Ibrahim.....	120
<b>Tableau VI-6</b> : Résultats de la dimension fractale verticale de la marne Dely Ibrahim.....	120
<b>Tableau VI-7</b> : Résultats de la dimension fractale horizontale de la marne Les Chabane .....	121
<b>Tableau VI-8</b> : Résultats de la dimension fractale verticale de la marne Les Chabane.....	121
<b>Tableau VI-9</b> : Résultats de la dimension fractale verticale et horizontale de l'échantillon témoin.....	122
<b>Tableau VI-10</b> : Résultats de la dimension fractale verticale et horizontale de l'échantillon 1 .	122
<b>Tableau VI-11</b> : Résultats de la dimension fractale verticale et horizontale de l'échantillon 2 .	123
<b>Tableau VI-12</b> : Résultats de la dimension fractale verticale et horizontale de l'échantillon témoin.....	124
<b>Tableau VI-13</b> : Résultats de la dimension fractale verticale et horizontale de l'échantillon 1 .....	124
<b>Tableau VI-14</b> : Résultats de la dimension fractale verticale et horizontale de l'échantillon 2.....	125
<b>Tableau VI-15</b> : Résultats de la dimension fractale verticale et horizontale de l'échantillon témoin.....	126

<b>Tableau VI-16</b> : Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 1 .....	127
<b>Tableau VI-17</b> : Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 2 .....	127
<b>Tableau VI-18</b> : Résultats de la dimension fractale verticale et horizontale de l'échantillon témoin.....	128
<b>Tableau VI-19</b> : Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 1 .....	129
<b>Tableau VI-20</b> : Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 2 .....	129
<b>Tableau VI-21</b> : Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 2 .....	130
<b>Tableau VI-22</b> : Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 2 .....	131
<b>Tableau VI-23</b> : Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 1 .....	132
<b>Tableau VI-24</b> : Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 1 .....	132
<b>Tableau VI-25</b> : Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 2 .....	133
<b>Tableau VI-26</b> : Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 1 .....	134
<b>Tableau VI-27</b> : Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 2 .....	134

# INTRODUCTION GENERALE

La durée de vie des ouvrages de génie civil dépend essentiellement du comportement des matériaux utilisés comme couche d'assise ou matériaux de construction, vis-à-vis des sollicitations extérieures engendrées par l'ouvrage lui-même ou les phénomènes naturels tels que le séisme et les intempéries.

L'altération des sols est un processus majeur qui est introduit par la nature. Les roches peuvent être altérées par l'eau, cette dernière est la cause majeure de l'altération que ce soit en pluviométrie ou en gel-dégel, etc. Peuvent être altérées par les sels, provenant en grande partie des pluies acides, qui sont considéré comme un important mécanisme de dégradation.

Le climat a un effet direct sur le comportement des sols. Qui est un facteur important dans la plupart des problèmes géotechniques tels que le gonflement, le gel, la percolation, le tassement et le glissement, qu'il soit froid, tempéré, chaud, humide, etc.

Dans ce travail de recherche, on a essayé de suivre la relation climat-sol et comprendre mieux les influences climatiques sur le sol marneux étudiés, cependant ce matériau dit évolutif (dont les propriétés physiques et mécaniques évoluent dans le temps), nécessite une étude approfondie du point de vue mécanique et minéralogique avant de procéder à son utilisation dans le domaine du génie civil. Ce qui permettra d'évaluer avec plus de précision les différents désordres qui peuvent apparaître à court ou à long terme.

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

Certains phénomènes naturels demeurent inexplicables. La géométrie euclidienne ne convient pas pour représenter tous les objets naturels. Car ces derniers ne s'avèrent jamais parfait. Ce qui a fait pousser Mandelbrot à introduire une nouvelle géométrie, « la géométrie fractale » pour décrire des figures géométriques d'une structure complexe et irrégulière. Donc la dimension fractale est calculable pour le changement de volume et la variation de la texture des sols en particulier les sols fins. Pour cela la dimension fractale des échantillons a été calculée avant et après chaque essai, avec un programme implémenté par le logiciel MATLAB, à la fin une comparaison judicieuse des résultats expérimentaux avec les résultats analytiques est faite pour chaque essai.

Ce mémoire s'articule principalement en deux parties : une recherche bibliographique et une étude expérimentale. La première partie est bibliographique, elle est composée de trois chapitres :

**Le chapitre I :** est consacré à la définition des fractales et la dimension fractale est leur utilisation.

**Le chapitre II :** présente les méthodes de calcul de la dimension fractal et son application pour les échantillons du sol et leurs grains.

**Le chapitre III :** présente des généralités sur les effets des changements climatiques sur les sols étudiés, particulièrement les marnes.

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

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

**Le chapitre V :** présente les essais climatiques (essai Gel-dégel et Dégradabilité et canicules) réalisés sur les échantillons intacts des sols prélevés des sites différents avec les résultats obtenus et leurs interprétations.

**Le chapitre VI :** porte sur la détermination de la dimension fractale avec le logiciel MATLEB, avant et après chaque essai. Ce qui nous a permis de faire une comparaison entre les résultats obtenues après les essais et ceux obtenues après le calcul de la dimension fractale des échantillons.

## **Chapitre I :**

### **Généralités sur la notion fractale et la dimension fractale**

## Introduction

La géométrie fractale est le complément qui manquait à la géométrie euclidienne et à la symétrie: comme l'a fait remarquer Mandelbrot que les nuages ne sont pas des sphères, les montagnes des cônes, ni les îles des cercles et leur description nécessite une géométrisation adaptée.

La fin des années 70 a vu se développer la notion de géométrie fractale dans de nombreux domaines de la physique. Le concept de géométrie fractale, introduit par B.B. Mandelbrot, fournit, en effet, un cadre solide pour l'analyse des phénomènes naturels dans divers secteurs des sciences. Roger Pynn (1977) écrit dans la revue Nature que « si cette opinion continue à s'étendre, nous n'aurons pas longtemps à attendre avant que l'étude des fractales devienne une partie obligatoire du cursus universitaire ».

### I-2) Définition

La notion de fractale regroupe dans un cadre géométrique unique de nombreux travaux mathématiques antérieurs. Les objets concernés ont été inventés dès la fin du XIXe siècle par des mathématiciens comme Cantor, Peano, etc. Le terme « fractal » a été introduit par B.B. Mandelbrot (fractal, c'est-à-dire qui a été fractionné à l'infini, du latin « fractus » dérivé du verbe « frangere », briser). Une définition à la fois précise et générale d'un objet fractal est difficile ; Mandelbrot le définit comme un ensemble qui présente des irrégularités à toutes les échelles. C'est fondamentalement son caractère de concept géométrique qui en fait sa portée.

La description du monde réel est soumise aux lois de la géométrie. Mais la géométrie traditionnelle qui ne dispose que de figures simples comme les droites, les cercles, et les sphères devient parfois insuffisante. Comment pourrait-on, sans perdre trop de temps dans les calculs et d'espace mémoire pour décrire des objets complexes, irréguliers et animés de fluctuations aléatoires comme les grains constituant un milieu granulaire. Avec la géométrie fractale dont la clé est la dimension non entière, caractère essentiel des objets irréguliers, leur description et leur compréhension, de ces objets, deviennent plus aisées.

### I-3) Histoire des fractales

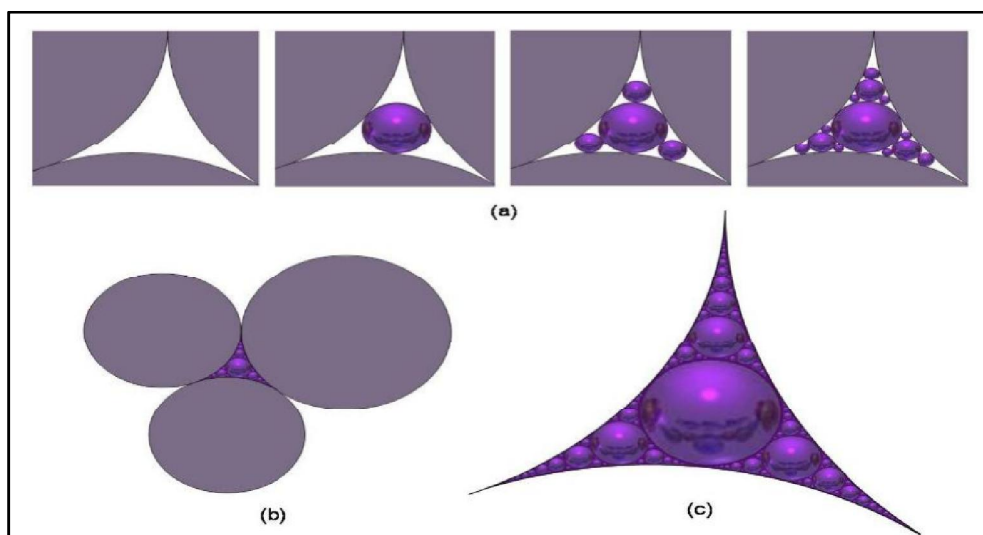
Depuis récemment, le concept des fractales gagne en popularité. Or, bien que ce mot n'ait été inventé par Benoit Mandelbrot que dans les années 70, les éléments soutenant cette nouvelle branche des mathématiques se sont mis en place depuis bien plus longtemps.

## I-3-1) Les premières images fractales



**Figure I-1** (a) Apollonius de Perge(environ 262-190 av. J.-C.) et(b)Albrecht Dürer(1471-1528).(OUTAYEB.S, 2016).

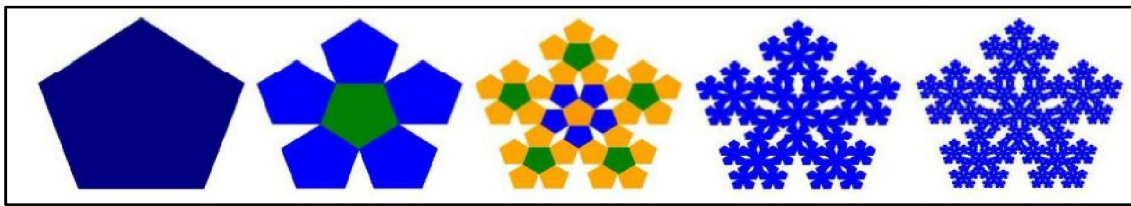
La plus ancienne référence retrouvée dans la documentation nous vient d'Apollonius de Perge et remonte à trois siècles avant J.-C(Figure I-2). Dans son livre Tangencies, ce disciple d'Euclide démontra comment tracer un cercle tangent à trois autres objets qui sont soit des points, des lignes ou des cercles. Ainsi, il utilisa ce résultat pour construire une figure qui sera reprise plus tard par Mandelbrot en tant qu'image fractale. Sa construction consiste à prendre un triangle curviligne (dont les côtés sont des arcs de cercles). On peut alors trouver un cercle inscrit à l'intérieur. Cette étape crée trois nouveaux triangles curvilignes dans chacun desquels on peut inscrire un autre cercle. En continuant ce procédé jusqu'à l'infini, on trouve une image appelée la baderne d'Apollonius voir(Figure I-2).



**Figure I-2** : (a) Les premières étapes de la construction d'une baderne d'Apollonius,(b) Les trois cercles initiaux ayant permis de créer la baderne (c) Une baderne d'Apollonius.

Ensuite, ce n'est qu'en 1520 qu'apparaît une autre image fractale : le pentagone de Dürer.(Figure I-3) Sa construction est expliquée dans le manuel de géométrie instructions

pour la mesure, à la règle et au compas, des lignes, plans et corps solides écrit par l'artiste allemand Albrecht Dürer. Inspiré par Léonard de Vinci, ce peintre croyait que les arts devaient être basés sur les sciences en particulier sur les mathématiques qui, selon lui, étaient la branche des sciences la plus exacte, la plus logique et la plus efficace d'un point de vue graphique. Son image fractale consiste en un pentagone régulier dans lequel on place six petits pentagones congrus; cinq d'entre eux doivent recouvrir les angles du pentagone initial de façon à ce que les cotés adjacents correspondent et le dernier pentagone doit se situer au centre du grand pentagone mais en ayant subi une rotation de  $180^\circ$  par rapport à celui-ci. En reprenant ce processus pour chacun des nouveaux pentagones et ainsi de suite, on trouve une image ressemblant à une dentelle. Cette figure sera étudiée plus tard par Sierpinsky.



**Figure I-3:** Illustration des cinq premières étapes de la construction du pentagone de Dürer. (Les couleurs ne servent qu'à faciliter la compréhension du processus.)

#### I-4) Caractéristique 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.

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

#### I-5) Les fractales dans la nature

Pour parler des fractales, on fait souvent référence à la géométrie de la nature. De fait, elles se retrouvent partout dans notre environnement. Ainsi, elles existent depuis toujours.

### I-5-1) Les fractales en biologie végétale

#### Les arbres, des végétaux à nature fractale ?

Quand on analyse un arbre sous différentes échelles, on constate qu'il y a un schéma qui se répète sous ces échelles différentes.

Commençons l'analyse :

#### I-5-1-1) Les ramifications des branches

En regardant avec plus d'attention les branches d'un arbre, on peut discerner un schéma qui semble se répéter, même principe que l'autosimilarité pour les fractales.



Figure I-4 : Les branches d'un arbre.

#### I-5-1-2) L'inflorescence

L'inflorescence est la disposition des fleurs sur la tige d'une plante à fleur. Le motif de disposition s'apparente à nouveau à celui d'une fractale

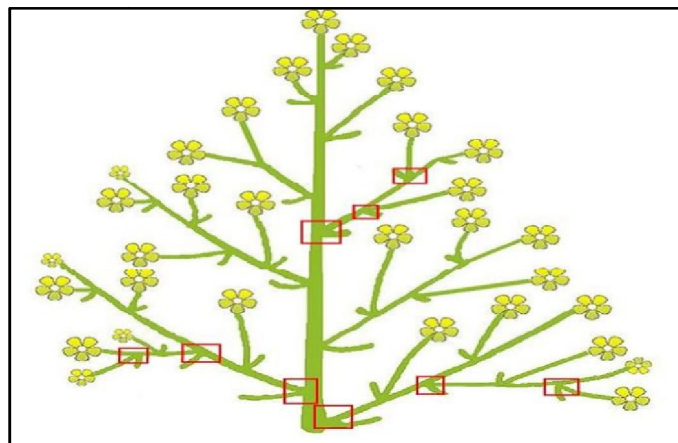


Figure I-5 : l'inflorescence.

### I-5-1-3) Les nervures des feuilles

On peut bien observer une structure fractale sur les nervures qui composent vaisseaux conducteurs de sève !

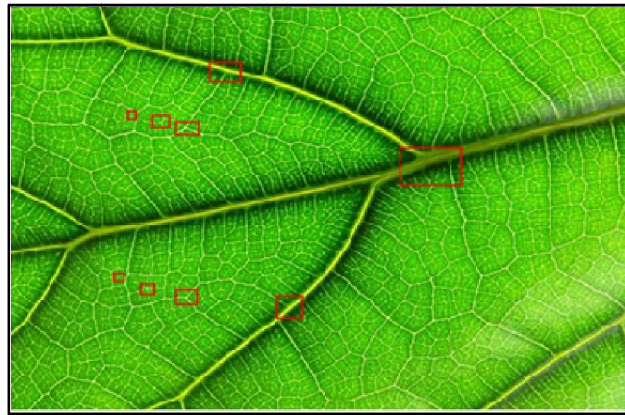


Figure 1-6 : Les nervures des feuilles.

### I-5-2) Les fractales en morphologie animale

#### I-5-2-1) Les coquilles

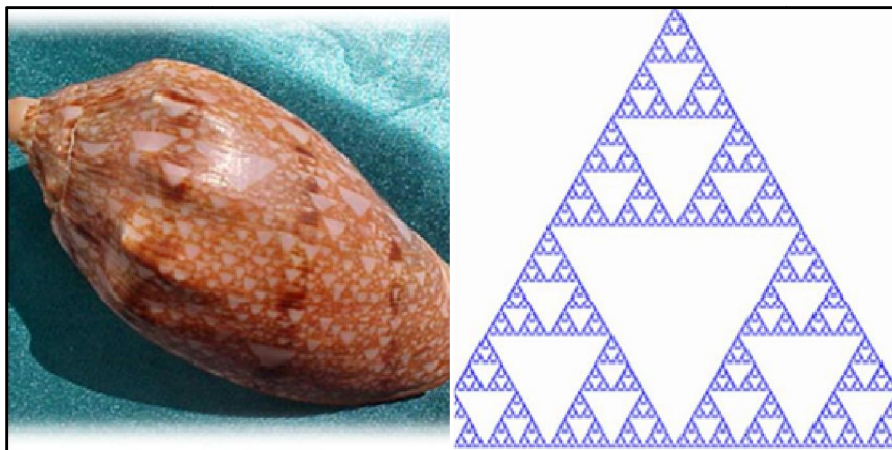


Figure I-7: Coquillage et le triangle de Sierpinsky.(LEHAMEL.M, 2011).

Ne trouvez-vous pas que les motifs sur le coquillage ressemblent aux triangles de Sierpinsky?(Figure I-7) Ce phénomène serait dû à deux types de molécules interviennent lors de la formation de ce coquillage. Ces motifs servent tout simplement de camouflage pour le coquillage.

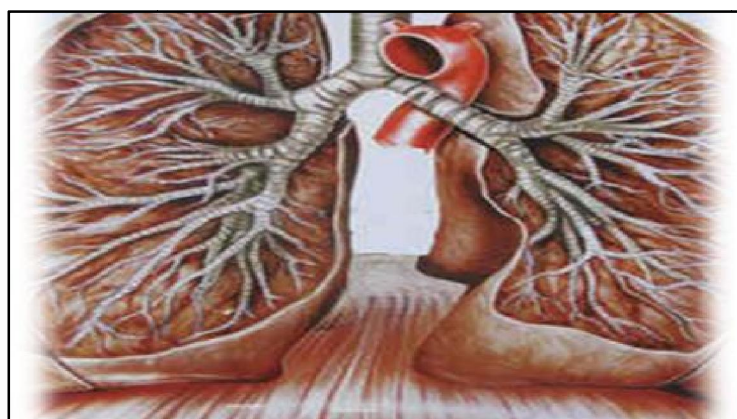
**I-5-2-2) Les éponges de mer****Figure I-8 :** Eponge de mer.

L'éponge de mer présente en effet des particularités étonnantes qui suggèrent la notion de fractale : une infime partie prélevée sur l'éponge et grossie plusieurs fois est semblable à l'éponge tout entière.

**I-5-3) Les fractales en anatomie****I-5-3-1) Les vaisseaux sanguins - exemple des poumons**

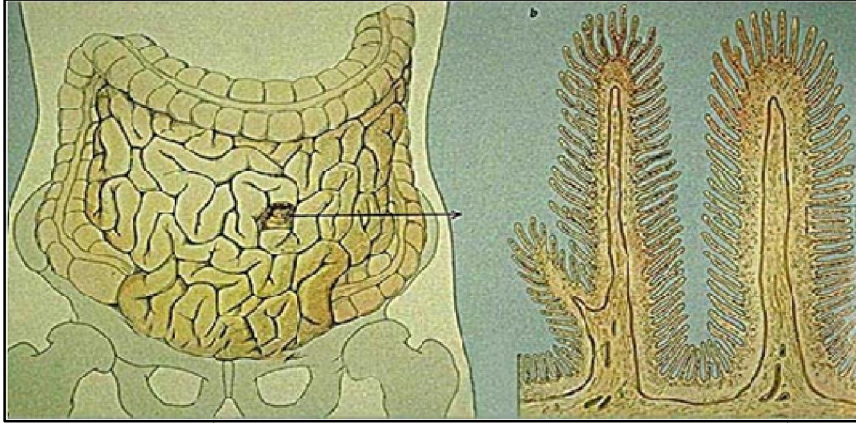
Les poumons sont basés sur le même schéma(Figure I-9). Cette structure arborescente peut à première vue nous faire penser à un objet fractal, observons un peu mieux. A chaque étape, le nombre de « branches » des poumons est doublé. Après 16 itérations, on a 216 ou environ 65000 bronchioles, soit le nombre d'un poumon humain normal. De plus, à chaque itération, la taille des ramifications diminue, on passe d'une branche principale de 18mm de diamètre à de petites ramifications de 0,5mm de diamètre.

On peut donc dire que le poumon est un objet fractal par itérations.

**Figure I-9 :** Les poumons.

**I-5-3-2) L'intestin grêle**

Lorsque l'on observe la structure de l'intestin grêle à des grossissements différents, l'autosimilarité est évidente, on retrouve les villosités à toutes les échelles d'observations, jusqu'aux cellules de l'intestin. Dimension fractale de ce système est d'environ 2,7.



**Figure I-10 :** L'intestin grêle.

**I-5-4) Les fractales se retrouvent également en géologie**

Les fractales constituent le paysage (côtes, montagnes, rivières, vague...)

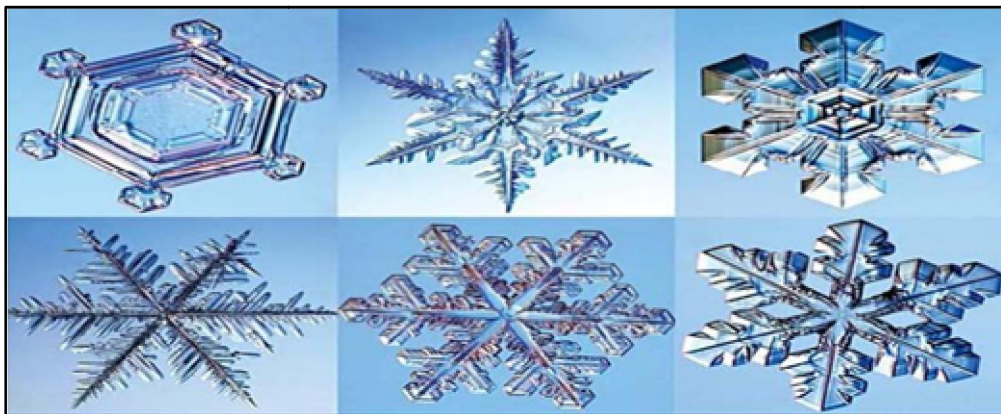
**I-5-4-1) Les côtes des pays**

**Figure I-11:** Les côtes des pays.

**I-5-4-2) Les montagnes****Figure I-12** : Les montagnes.**I-5-4-3) Les Flocons de neige**

Le flocon de neige a également une formation fractale.

Les molécules d'eau, en se solidifiant du fait de la température, s'agence en formant une figure de symétrie d'ordre 6, du fait que les atomes de la molécules d'eau forment des angles de 30 et de 60 degrés. Le flocon, croissant ainsi, devrait former une figure hexagonale parfaite. Mais non, encore une fois, un paramètre aléatoire intervient, et les cristaux «s'accrochent » entre eux par un principe d'agrégation, et crée les formes de flocons que nous connaissons. Ces flocons sont formés de branchages, eux-mêmes formés d'autres, et ainsi de suite. Le flocon de neige se forme fractale.

**Figure I-13** : Flocon de neige.

#### I-5-4-4) Les rivières, fleuves et cours d'eau



Figure I-14 : les fleuves.

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

#### I-10) Objets fractal

##### I-10-1) 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) (6). 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).

L'algorithme de Von Koch est régi selon le principe de récursivité. Un segment horizontal [AB] de longueur L (c'est l'itération zéro est divisé en trois segments de même longueur).

Le segment central représente la base d'un triangle équilatérale, une fois le triangle formé, cette base sera supprimée. Le segment [AB] a donc subi quatre transformations, chacune transformant [AB] en quatre segments de longueur identique  $L/3$ . Ces dernières permettent l'obtention d'une «courbe » composée de quatre segments allant de A à B : C'est la première itération L'angle formé par les deux nouveaux segments [CD] et [DE] est égale à  $\pi/3$ .

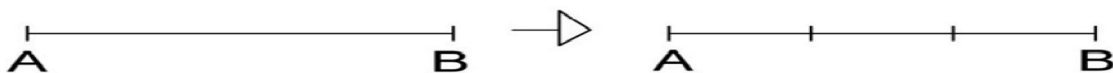
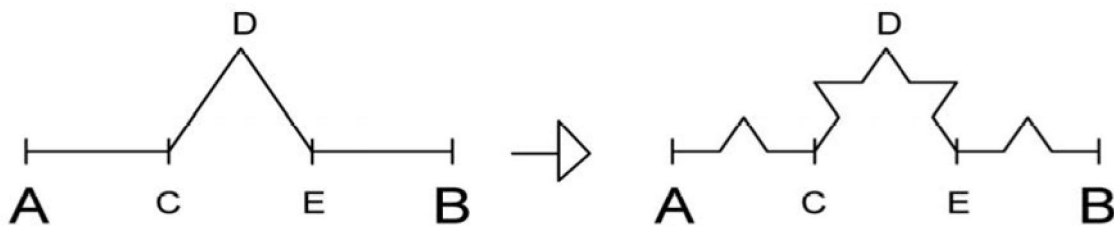


Figure I-15 : Fragmentation du segment [AB] à l'itération zéro.



**Figure I-16 :** Première itération, les segments ont pour longueur  $L/3$ .

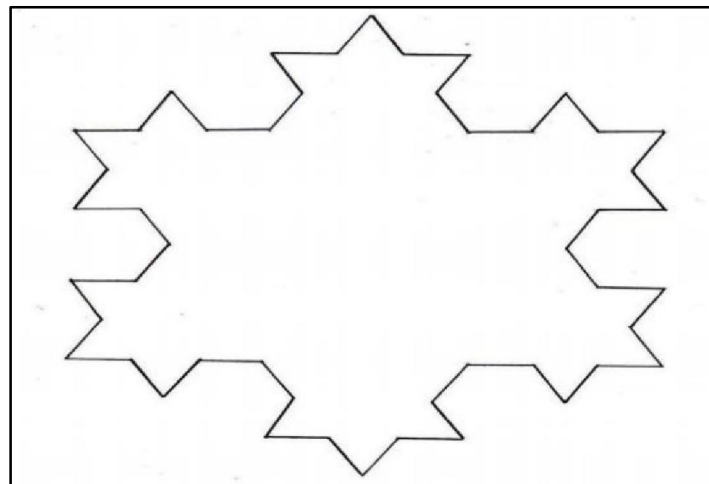
Selon le principe de récursivité, il faut appliquer les mêmes transformations aux quatre segments, de longueur  $L/3$ , obtenus à la première itération : c'est la seconde itération, tous les segments de cette nouvelle figure mesurent  $L/3^2$  soit  $L/9$ , puis à la troisième itération, tous les segments auront pour longueur  $L/3^3$  soit  $L/27$ . Dans le cas général de cette récurrence, à la  $n$ ième itération, tous les segments auront une même longueur  $L/3^n$ .



**Figure I-17 :** Seconde itération, les segments ont pour longueur  $L/3^2 = L/9$ .

Le flocon de Koch est la somme de 3 segments  $[AB]$  par rotation d'un angle égale à  $-\pi/3$  d'après le cercle trigonométrique.

Lorsque l'on reproduit indéfiniment les quatre transformations, la « courbe » de Von Koch correspond, à la limite des « courbes » obtenues. Cependant, le flocon délimite une surface finie.



**Figure I-18 :** Flocon de Von Koch à la troisième itération.(LEHAMEL.M, 2011).

### I-10-2) Le triangle de Sierpinsky

La construction est très simple à comprendre : on part d'un triangle équilatéral que l'on divise en 4 triangles 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, a pour dimension fractale  $\log 3 / \log 2$ .

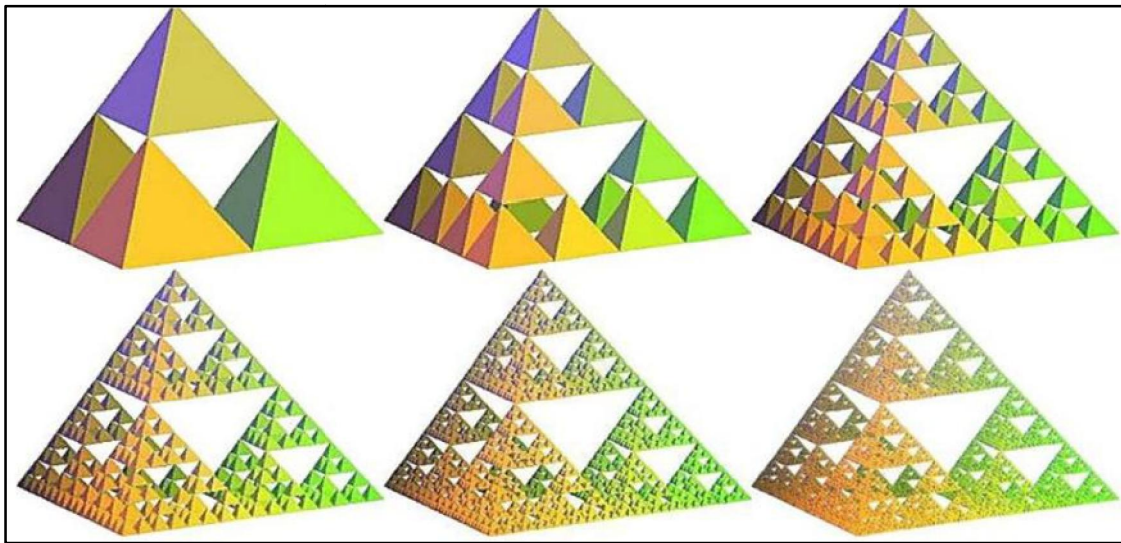


Figure I-19 : Le triangle de Sierpinsky. (LEHAMEL.M, 2011).

### I-10-3) 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.

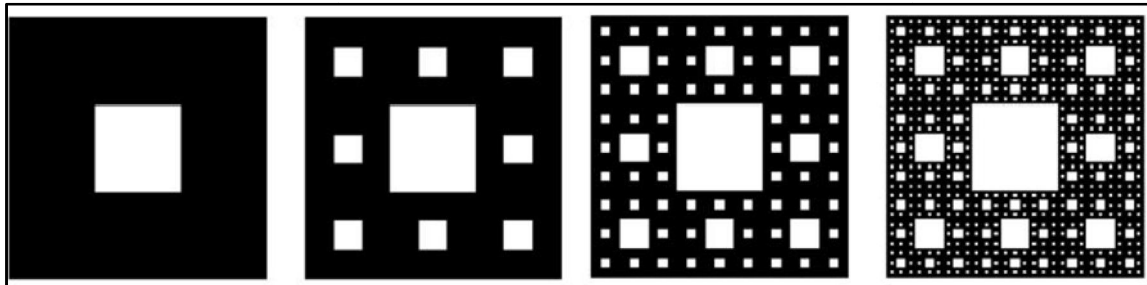


Figure I-20 : Tapis de Sierpinsky.(BOUDET. A, 2008).

### I-10-4) Eponge de Menger

L'éponge de Menger (Figure I-21), 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.

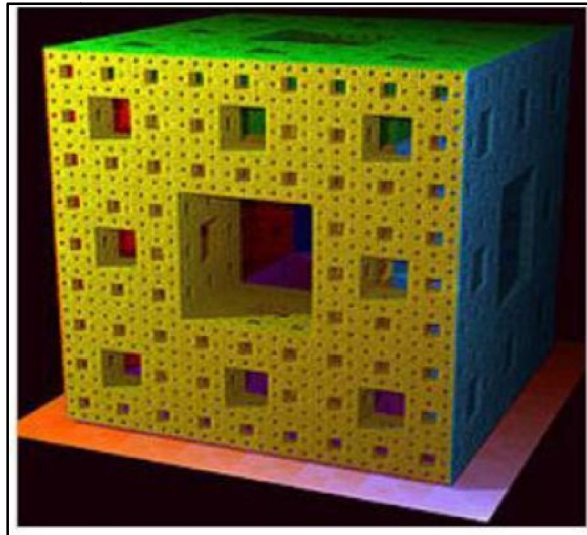


Figure I-21 : L' Eponge de Menger. (YEZLI.S, 2011).

### I-10-5) L'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.

On le construit de manière itérative à partir du segment initial en enlevant le tiers central ; puis on réitère l'opération sur les deux segments restants, et ainsi de suite .on peut voir les six premières itérations du procédé sur le schéma suivant :



Figure I-22 : L'ensemble de Cantor.(OUTAYEB.S, 2016).

### I-10-6) L'ensemble de Mandelbrot

L'ensemble de Mandelbrot est à l'origine d'une très belle collection d'images connue sous le nom d'ensemble de Julia .qui a été défini à partir de l'équation de récurrence :

$Z_{n+1} = Z_n^2 + C$  en prenant  $Z_0 = 0$  et en faisant varier la valeur de  $C$ .

Le centre en noir (œuf de Mandelbrot) représente l'espace où la suite converge. Les couleurs indiquent les courbes de niveau .c'est à dire la vitesse de convergence de la fonction.

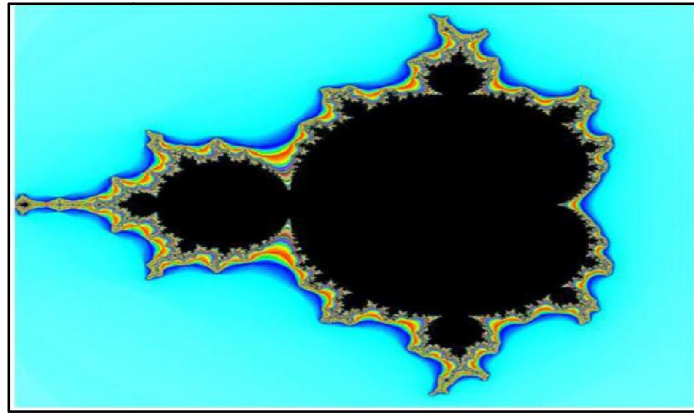


Figure I-23 : Ensemble de Mandelbrot.(JOSIANE. L, 2006).

### I-10-7) L'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 :

$$\begin{cases} z_{n+1} = z_n^2 + c \\ z_0 = m \end{cases} \quad \text{Soit bornée(I-1)}$$

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

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} |z_n| = +\infty \quad \text{(I-2)}$$

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.

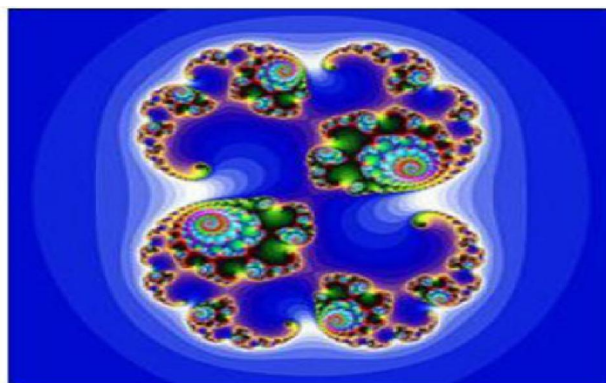


Figure I-24 : L'ensemble de Julia.(BOUDET. A, 2008).

## I-11) Les différents types de fractales

### I-11-1) Fractale déterministes

On parle des fractales déterministes lorsque les grains résultant d'une agrégation ou de la fragmentation d'un milieu granulaire ayant presque la même forme (c'est un cas rare) ou le mode de répllication ne fait pas intervenir de composante aléatoire.



Figure I-25 : Fractales déterministes d'un milieu granulaire.(Belmihoub.H, 2013).

### I-11-2) Fractale non déterministes

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

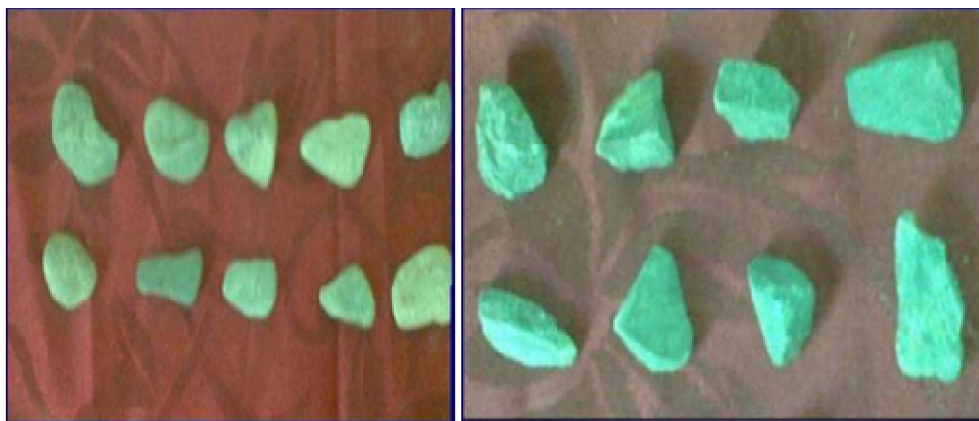


Figure I-26 : Fractales non déterministes d'un milieu granulaire.

## I-6) Notion de 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.

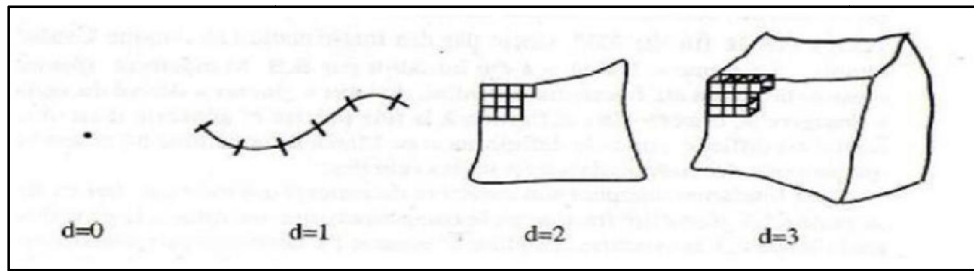


Figure 1-27 : Pavages des lignes, surfaces ou volumes.

### I-6-1) 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.

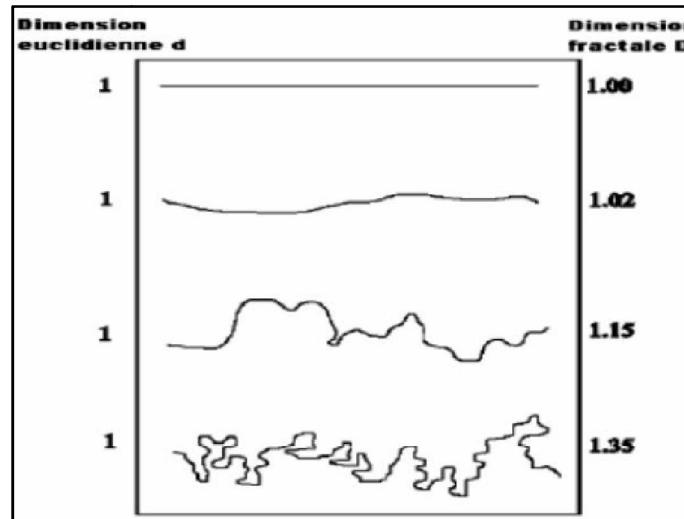


Figure I-28 : Illustration du rapport entre dimensions fractale et euclidienne. (Achir. M, 2011)

### I-6-2) Dimension euclidienne ou topologique

En géométrie euclidienne (Figure I-29), on travaille avec des dimensions entières 0, 1, 2, 3, ... Exemple : La dimension d'un point est zéro (0), une ligne droite a pour support un espace de dimension un (1), un plan est un espace de dimension deux (2), un volume est inscrit dans un espace de dimension trois (3). On remarque qu'il existe un lien direct entre la dimension de l'objet étudié et son unité de mesure. Un objet de dimension deux se mesure en  $m^2$  et un objet de dimension trois en  $m^3$  et ce n'est pas forcément le cas pour une courbe fractale. Ces différents espaces obéissent à une loi, dite de mesure par comptage de boîtes (box counting), qui est de la forme :

$$p(\varepsilon) = \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon}\right)^D \tag{I-3}$$

$p(\varepsilon)$  : nombre d'éléments de longueur  $\varepsilon$ , nécessaires pour diviser le segment de longueur  $\varepsilon_0$ .

$\varepsilon_0$  : longueur total de l'élément.

$\varepsilon$  : longueur de l'élément divisé.

$D$  : dimension du support de l'espace dans lequel est inscrit l'élément de taille  $\varepsilon_0$ .

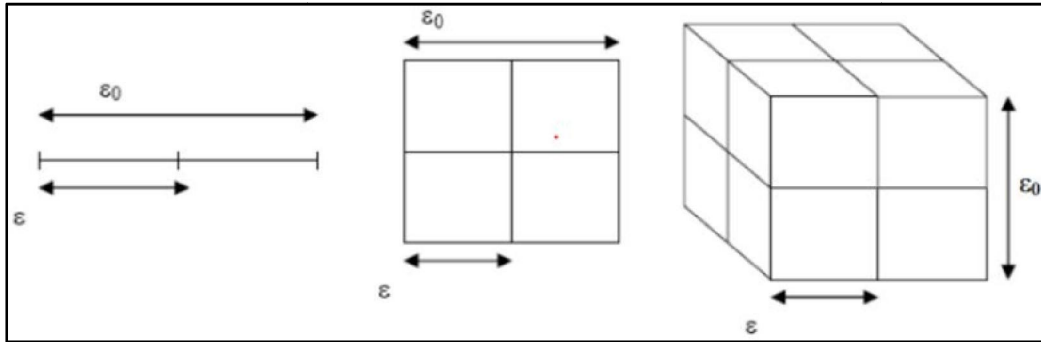


Figure I-29: Mesure par comptage des boîtes dans un espace euclidien.

Si  $D = 1$ , le support de  $\varepsilon_0$  est une droite,  $p(\varepsilon)$  est le nombre de segments, de longueur  $\varepsilon$ , nécessaires pour diviser le segment de longueur  $\varepsilon_0$ .

Si  $D = 2$ , l'élément (un carré) de côté  $\varepsilon_0$  a pour support un plan.  $p(\varepsilon)$  est le nombre de carrés, de côté  $\varepsilon$ , nécessaires pour diviser le carré de côté  $\varepsilon_0$ .

Si  $D = 3$ , l'élément (un cube) de côté  $\varepsilon_0$  a pour support un espace de dimension 3.  $p(\varepsilon)$  est le nombre de cubes, de côté  $\varepsilon$ , nécessaires pour diviser le cube de côté  $\varepsilon_0$ .

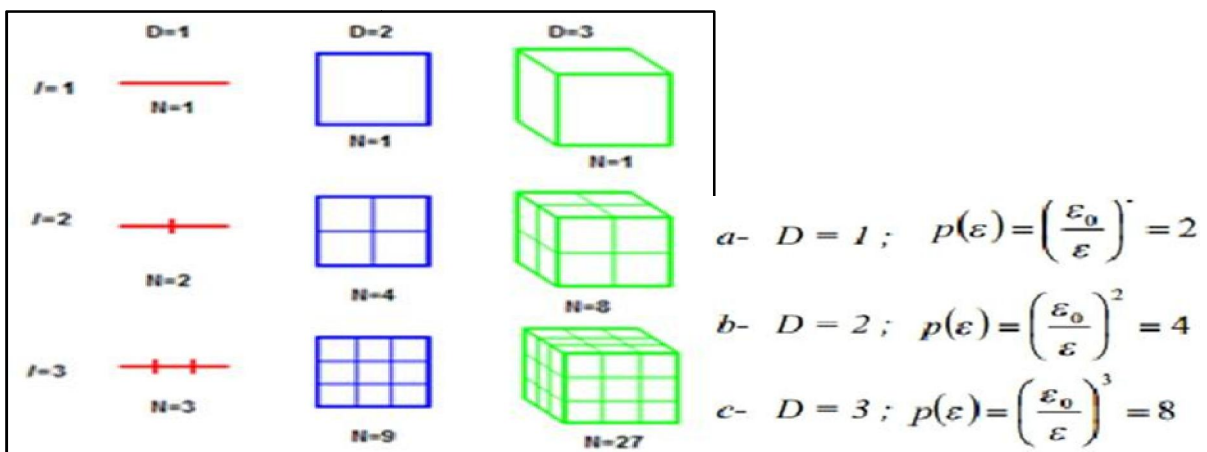


Figure I-30 : Les 3 dimensions entières.(FALCONER. K, 1990)

**I-6-3) Définition mathématique de la dimension fractale**

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

$$L(l) = \left(\frac{AB}{l}\right)^D \quad (\text{I-4})$$

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

$$n = \left(\frac{L}{l}\right)^D \quad (\text{I-5})$$

D'où :

$$D = \frac{\ln n}{\ln \frac{L}{l}} \quad (\text{I-6})$$

#### 1-6-4) Vérification avec la dimension classique

Si on prend un carré de côté  $c$ , alors ce carré se divise en 4 carrés de longueur  $c/2$ . Si  $D$  est la dimension fractale du carré, alors on a :

$$n = \frac{c^2}{\left(\frac{c}{2}\right)^2} = 4 \quad (\text{I-7})$$

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

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

De même, un cube de côté  $c$  se divise en 8 cubes de côté  $c/2$ . La dimension est alors égale à  $\ln 8 / \ln 2$ , qui est égal e à 3.

#### I-7) Dimension de Hausdorff-besicovitch ou dimension de recouvrement

Une première approche pour mesurer la dimension d'un objet  $E$  consiste à suivre la méthode usuelle de pavage de l'objet par des pavés (appartenant à l'espace dans lequel l'objet est plongé) de mesure  $\mu = \varepsilon d(E)$  ou  $d(E)$  est la dimension de l'objet. Mais lorsque  $d(E)$  est à priori inconnu, une solution consiste à faire des essais en prenant des unités de mesure  $\mu = \varepsilon^\alpha$  avec un exposant  $\alpha$  indéterminé.

Considérons par exemple un carré ( $d=2$ ) de côté  $L$ , et recouvrons le de pavés de côté  $\varepsilon$ , la mesure est donnée par  $M = N\mu$ , ou  $N$  est le nombre de pavés, C'est-à-dire  $N = (L/\varepsilon)^d$ , ainsi :

$$M = N \varepsilon^\alpha = (L/\varepsilon)^d \varepsilon^\alpha = L^d \varepsilon^{\alpha-d} \quad (\text{I-8})$$

#### I-8) Dimension de Bouligand-Minkowski

On peut également définir une dimension dite de Bouligand-Minkowski, Que l'on note  $\Delta(E)$  et voici quelques méthodes permettant de calculer  $\Delta(E)$

**I-8-1) La saucisse de Minkowski**

Soit  $E$  un ensemble plongé dans un espace euclidien de dimension  $d$  (précisément  $E$  est une partie bornée de  $\mathbb{R}^d$ ). Soit maintenant  $E(\varepsilon)$  l'ensemble des points de  $\mathbb{R}^d$  distants de moins de  $\varepsilon$  de  $E$ .

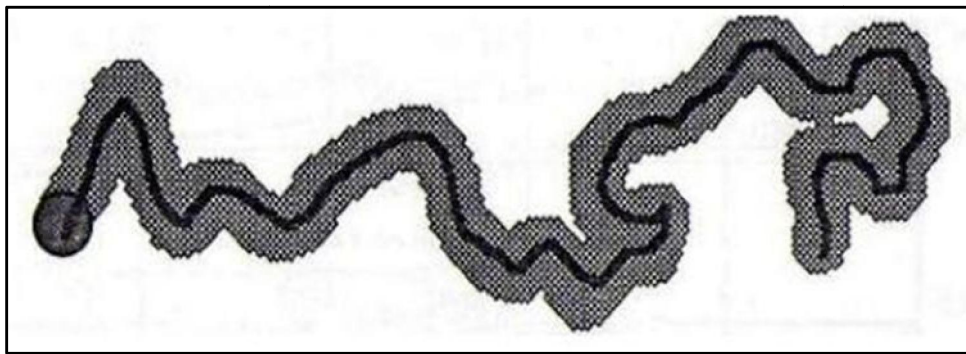
$E(\varepsilon)$  définit une saucisse de Minkowski, on l'appelle aussi épaissement ou dilatation de  $E$  comme en analyse d'image. On peut la définir comme la réunion

$$E(\varepsilon) = \bigcup_{x \in E} B_\varepsilon(x) \quad (\text{I-9})$$

$B_\varepsilon(x)$  est une boule de l'espace euclidien à  $d$  dimensions, centrée en  $x$  et de rayon  $\varepsilon$ . On calcule

$$\Delta(E) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left( d - \frac{\log \text{Vol}_d(E(\varepsilon))}{\log \varepsilon} \right) \quad (\text{I-10})$$

Où  $\text{Vol}_d$  représente simplement le volume en dimension  $d$  (par exemple, longueur, surface ou volume usuel). Si la limite existe,  $\Delta(E)$  est par définition la dimension de Bouligand Minkowski.



**Figure I-31** : Saucisse de Minkowski ou épaissement d'une courbe.(OUTAYEB.S, 2016).

**Conclusion**

Nous avons cherché à donner un aperçu sur des principes de la géométrie fractale en cherchant avant tout à faire un inventaire des principales définitions couramment utilisées. Si ces différentes "définitions" conduisent souvent au même résultat, elles ne sont pas équivalentes, et leur usage devient en particulier plus délicat dès que l'on dépasse le cadre de la stricte autosimilarité, que ce soit pour l'étude des structures naturelles ou celle des milieux fractals complexes.

Une dimension fractales est une valeur non entière ( $1 < D < 3$ ) contrairement aux dimensions euclidiennes (1, 2 et 3 qui désigne respectivement une ligne, un plan et un volume).

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

## **Chapitre II :**

### **Méthodes de calcul de la dimension fractale**

## Introduction

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

Pour déterminer la dimension d'un grain, on associe sa forme à celle d'une sphère équivalente, la dimension d'une particule est alors mesurée selon un diamètre équivalent, ce qui ne suffit pas pour décrire la forme réelle du grain et analyser le comportement d'un matériau. C'est dans ce but que plusieurs méthodes ont été développées.

Dans ce chapitre on présentera quelques méthodes utilisées pour le calcul de la dimension fractale et ces méthodes sont :

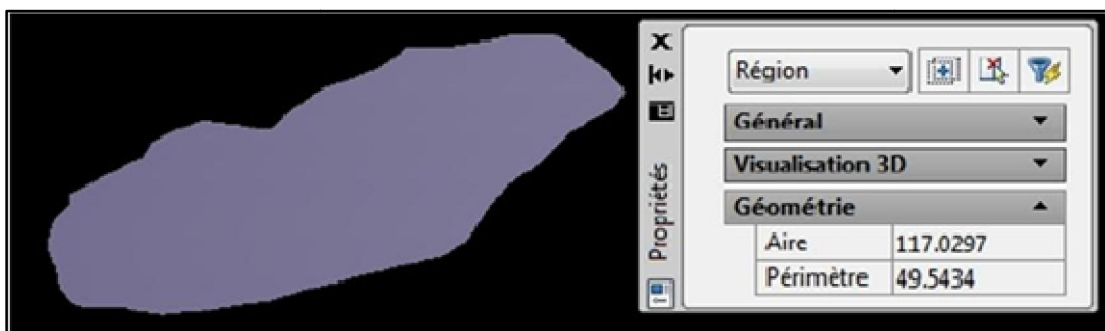
- Surface-Périmètre (Area-Perimeter) ;
- Méthode du diviseur (Line Divider) ;
- Méthode des lignes parallèles ;
- Méthode de compactage des boîtes (Box Counting) ;
- Méthode des masses.

### II-1) Méthodes de calcul couramment utilisées

#### II-1-1) Surface-Périmètre (Area-Perimeter)

La méthode de surface périmètre est l'une des méthodes de calcul de la dimension fractale de rugosité, la plus facile à appliquer à la géométrie fractale des grains du sol.

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



**Figure II-1** : Calcul du périmètre et de la surface d'un grain ( $\phi = 6.3$  mm) à l'aide de logiciel Auto-CAD 2009 (BOUZEBODJA.A, 2016).

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

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

Dans cette équation

C : est une valeur constante qui décrit la similitude de la forme fractale. P : est le périmètre du grain.

A : est la surface du grain.

D : est la dimension fractale moyenne de la rugosité des grains. Elle caractérise l'irrégularité du contour de grain. Théoriquement, elle vaut 1 pour des contours lisses et réguliers tels que le cercle. En prenant le logarithme des deux côtés dans l'équation, on peut obtenir l'expression suivante :

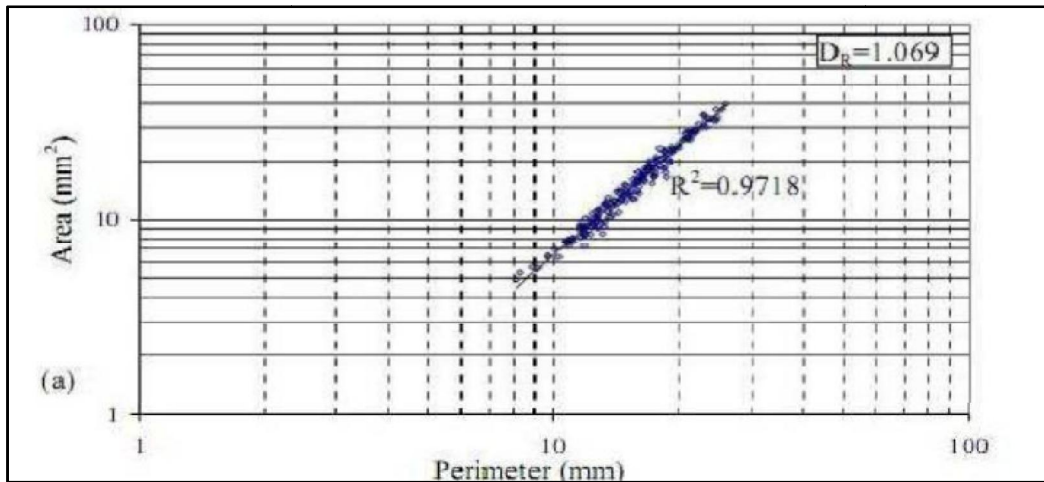
$$\frac{1}{D_R} \log P = \log (c\sqrt{A}) \quad (\text{II-2})$$

D'où l'on tire Log P par l'expression suivante ; En posant  $K = 18 \text{ Log } C$ .

$$\log P = k + \frac{D_R}{2} (\log A) \quad (\text{II-3})$$

Dans l'équation, la pente de la ligne d'ajustement normal d'Area-Perimeter est égale à  $2/D_R$ . Cependant, ce modèle ne peut pas déterminer la dimension fractale pour les grains de sol séparément.

Essentiellement, la dimension fractale déterminée par la méthode d'Area-Perimeter est une valeur "commune" pour les grains. Par conséquent, la méthode de Line Divider semble être une approche plus raisonnable concernant la détermination de la dimension fractale.



**Figure II-2 :** Application de la méthode de Area –Perimeter d'un gros grain de sable d'origine d'une pierre calcaire.(OUAKIF.T, 2017).

### II-1-2) Méthode du diviseur (Line Divider)

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

$$P(l) = n l^{1-D_R} \quad (\text{II-4})$$

$P(l)$  : périmètre totale de polygone.

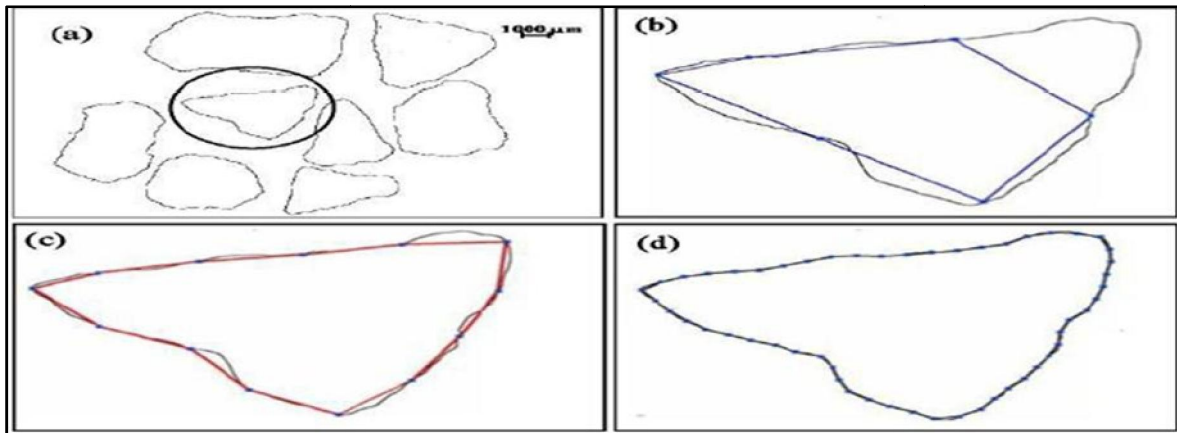
$(l)$  : unité de mesure.

$D_R$  : dimension fractale du grain étudié.

Cette méthode est particulièrement utilisée dans des images digitalisées (numérisées en noir et blanc) avec des mesures de tailles décroissantes. Traçants le périmètre de polygone  $P(l)$  obtenu en fonction de l'unité de mesure  $(l)$ , la dimension fractale est alors liée à la pente «  $m$  » de la meilleure droite de régression obtenue en utilisant les données de l'équation précédente, et sera calculée comme suit :

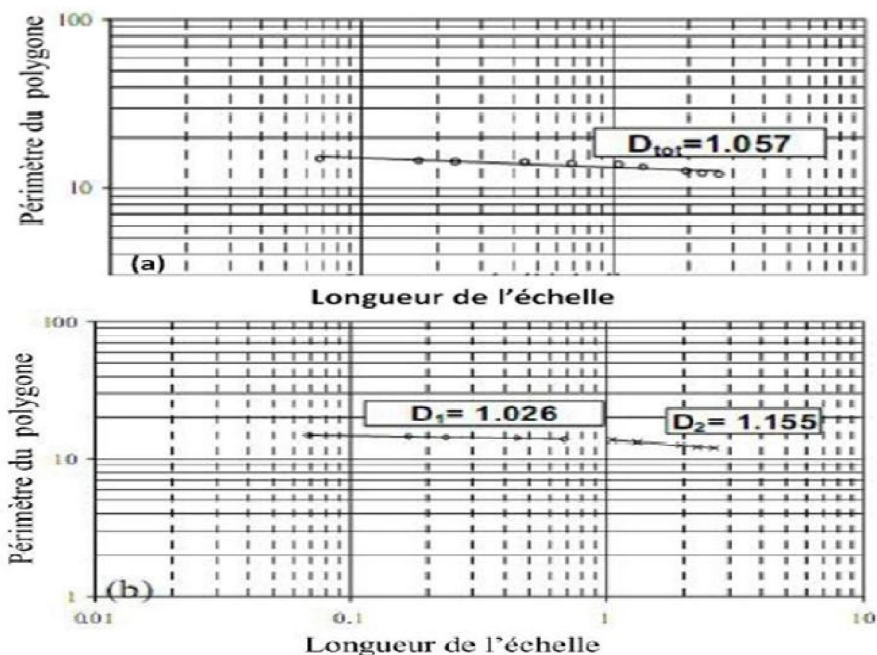
$$D_R = 1 - m \quad (\text{II-5})$$

Soit un grain simple donné dans la figure II.3.a, des lignes de mêmes tailles sont reliées entre elles pour former des polygones de différentes tailles à l'intérieur du grain figure (III.3.b.c.d). Tout le périmètre obtenu est tracé en fonction de l'unité de mesure, et ce rapport est utilisé pour calculer les dimensions fractales de rugosité.



**Figure II-3 :** (a) Image d'un grain de sable. (b), (c) et (d) contiennent les polygones tracés sur le grain avec des tailles de mesure respectivement de 2mm, 1mm et 0.25 mm.(BOUZEBODJA. A, 2016).

A partir de cette méthode, trois types de dimension fractale peuvent être déduits. Les polygones de plus petites tailles de mesures représentent la dimension de « texture » de fractale (D1) dans la figure (II-4-b), la ligne à la droite du point d'arrêts représente la dimension « structurale » de fractale (D2) dans la figure (II-4-b). La dimension totale de fractale (D<sub>tot</sub>) représente la ligne d'ajustement normale aux points de repères entiers, qui ne concernent pas le point d'arrêt des tendances structurales et de textures.



**Figure II-4 :** Calcul de la dimension fractale totale en (a), texturale (D1) et structurale (D2) en (b).(BOUZEBODJA. A, 2016).

### II-1-3) Méthode des lignes parallèles

La mesure de la dimension fractale par la méthode des lignes parallèles ressemble à la méthode précédente qui consiste à superposer l'image du grain sur un ensemble de lignes

parallèles à espacement constant  $\lambda$ , et joindre à l'aide d'un segment de droites les points d'intersections du contour du grain avec ces lignes (HAMMER.K.P, 2005). On fait la mesure du périmètre ainsi obtenu  $P(\lambda)$ . En diminuant de plus en plus le pas entre les lignes, on se rapproche au fur à mesure du contour réel du grain. En employant une unité de mesure en fonction de toute la longueur du périmètre des grains pour tracer des courbes à l'aide du logiciel Excel.

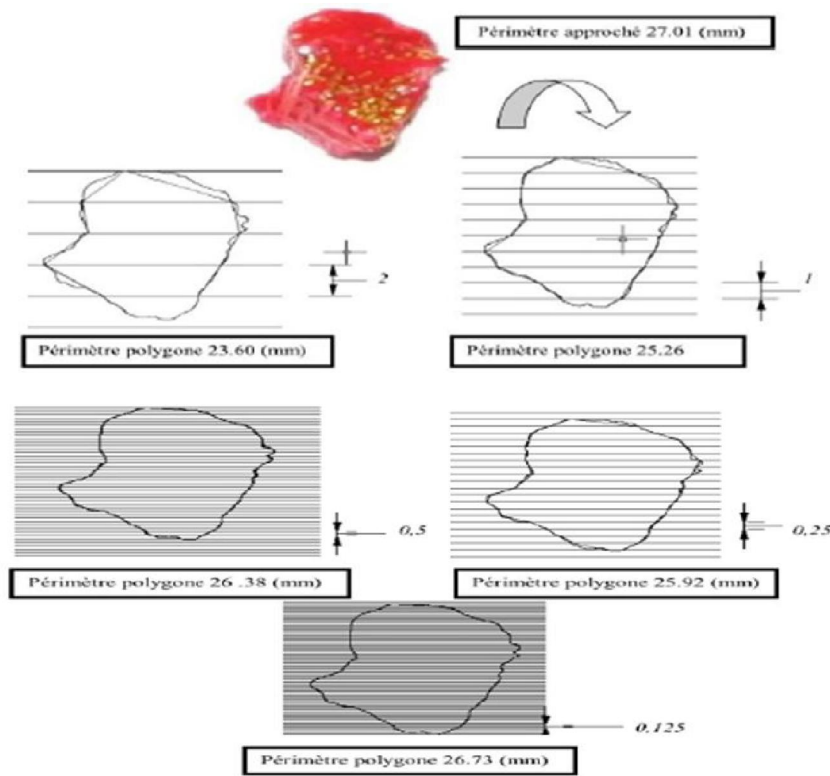


Figure II-5 : Présentation des exemples sur l'application de la méthode des lignes parallèles sur un grain de 5mm (YEZLIS, 2011).

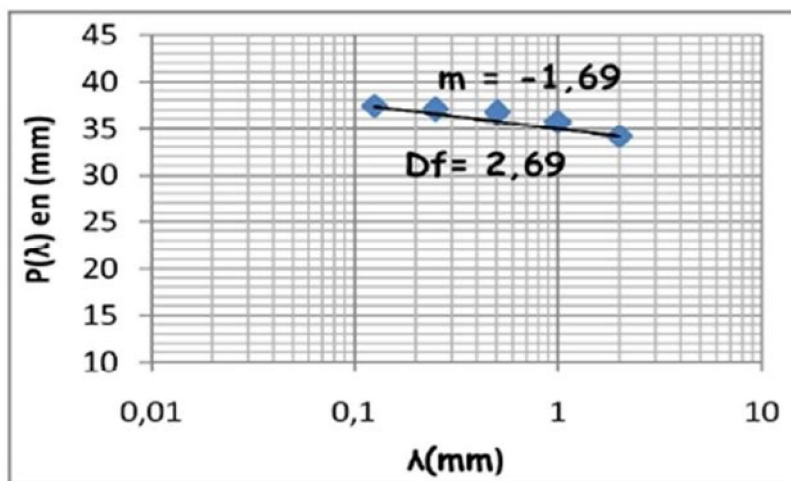


Figure II-6 : Détermination de la dimension fractale par la méthode des lignes parallèles (YEZLIS, 2011).

**II-1-4) Méthode de compactage des boites (Box Counting)**

Cette méthode est la plus fréquemment utilisée et la plus populaire en pratique. Elle 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 boites et compté, et on refait la même opération mais cette fois avec des boites de tailles décroissantes ainsi de suite...

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

$$N(X>x) = kx^{-D_f} \quad (II-6)$$

x : dimension des boites ;

N(X>x) : nombre des boites ;

K : constante ;

DF : dimension fractale.

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

$$DF = -m \quad (II-7)$$

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

**II-1-4-1) Calcul de la dimension fractale du contour du grain seulement**

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

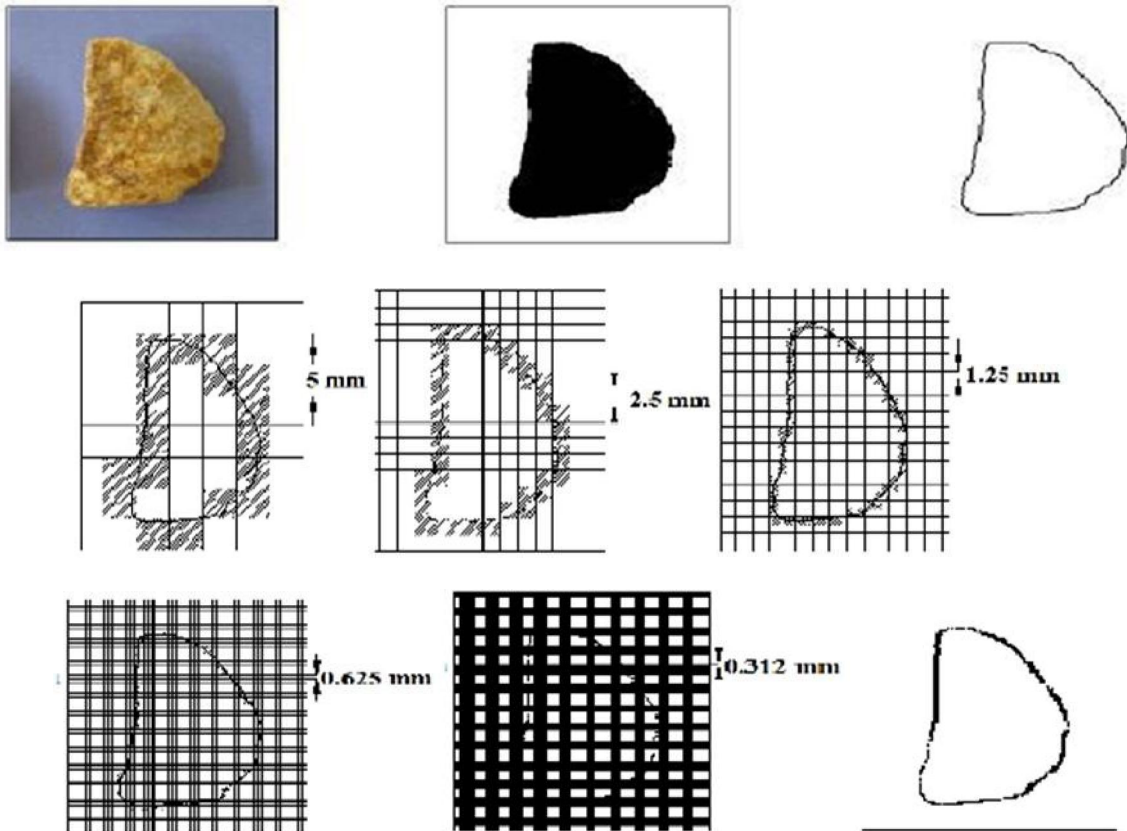


Figure II-7 : Différentes étapes de maillage de l’image du grain et illustration de la méthode.(OUTAYEB.S, 2016.)

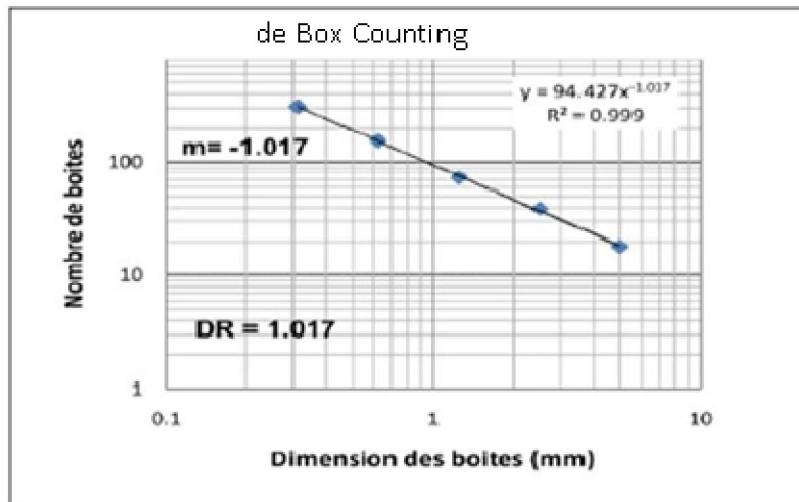
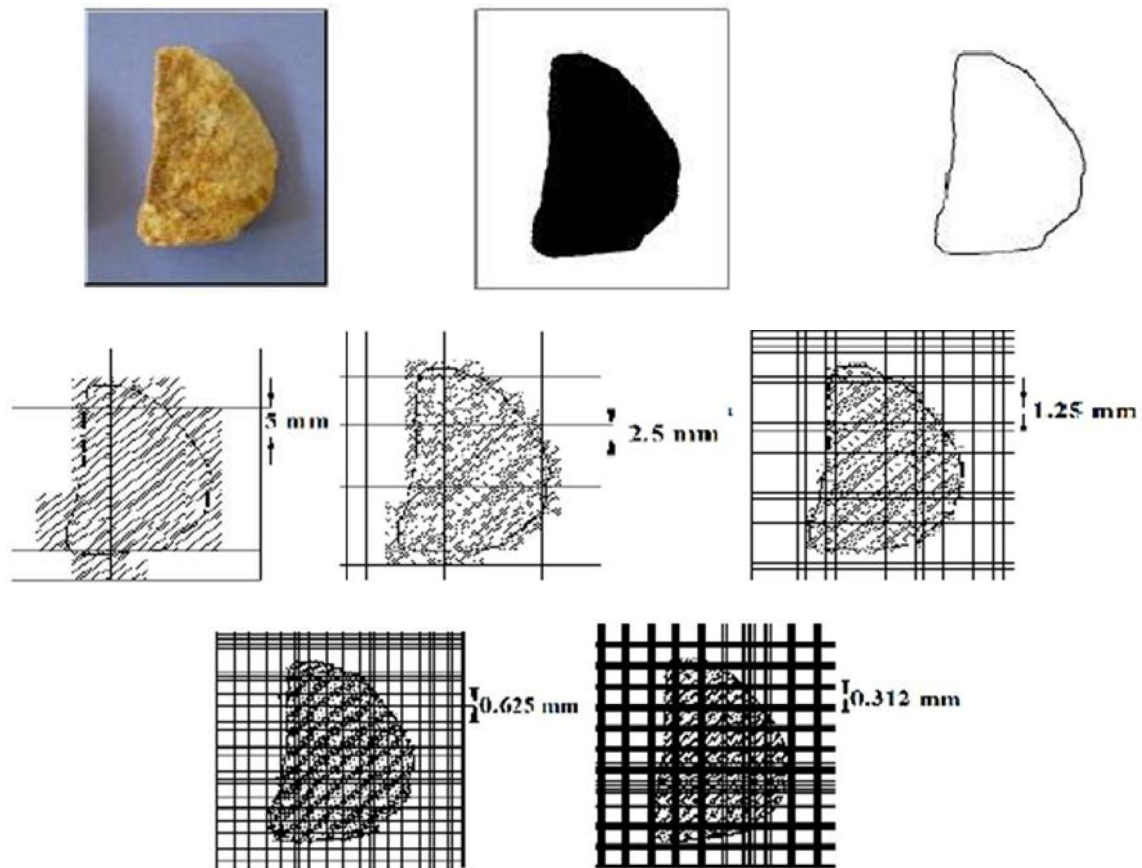


Figure II-8 : Calcul de la dimension fractale de la rugosité du grain (ACHIR. M, 2001).

II-1-4-2) Calcul de la dimension fractale de la surface du grain

Soit le même grain donné dans la figure (II-7), on refait les mêmes opérations (maillage de l’image), mais cette fois ci avec prise en compte du nombre de boîtes se trouvant à l’intérieur de la surface du grain.



**Figure II-9 :** Différentes étapes de maillage de l'image du grain avec prise en compte de la surface intérieure du grain. (OUTAYEB.S, 2016).

### II-1-5) Méthode des masses

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

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

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

$$(M_R/r) / (M_t/r) = (r/3DF_r)^{3DF_r} \quad (\text{II-8})$$

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

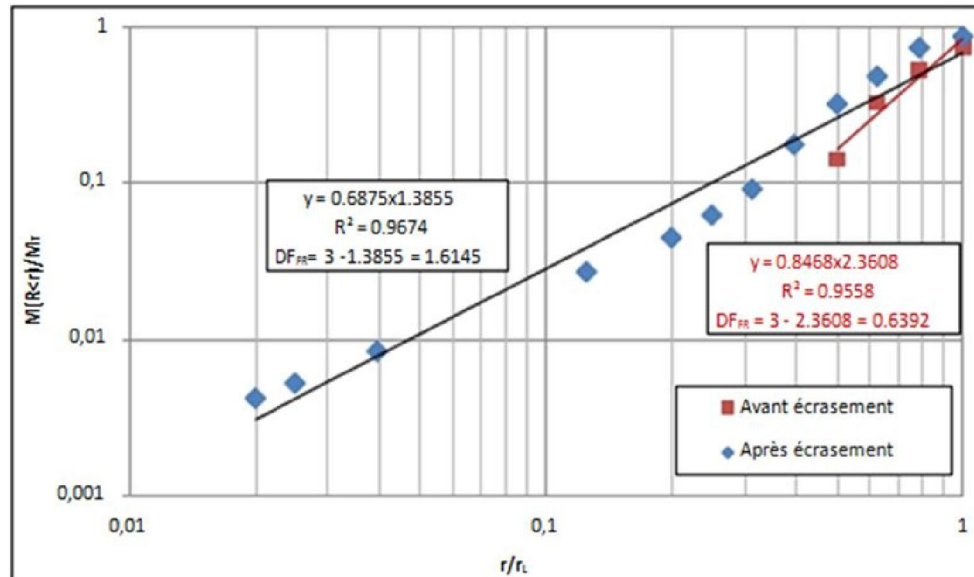
$M_t$  = masse totale des particules.  $r$  = taille de l'ouverture des passoires.

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

$DF_R$  = dimension fractale de fragmentation.

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

$$DF_R = 3 - m \text{ (II-9)}$$



**Figure II-10** : Détermination de la dimension fractale  $DF_r$  par la méthode des masses (BOUZEBODJA, A, 2016).

### Conclusion

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

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

## **Chapitre III :**

**Les effets des changements climatiques sur les sols**

## Introduction

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

Dans notre travail on va étudier les réactions des sols marneux aux changements climatiques.

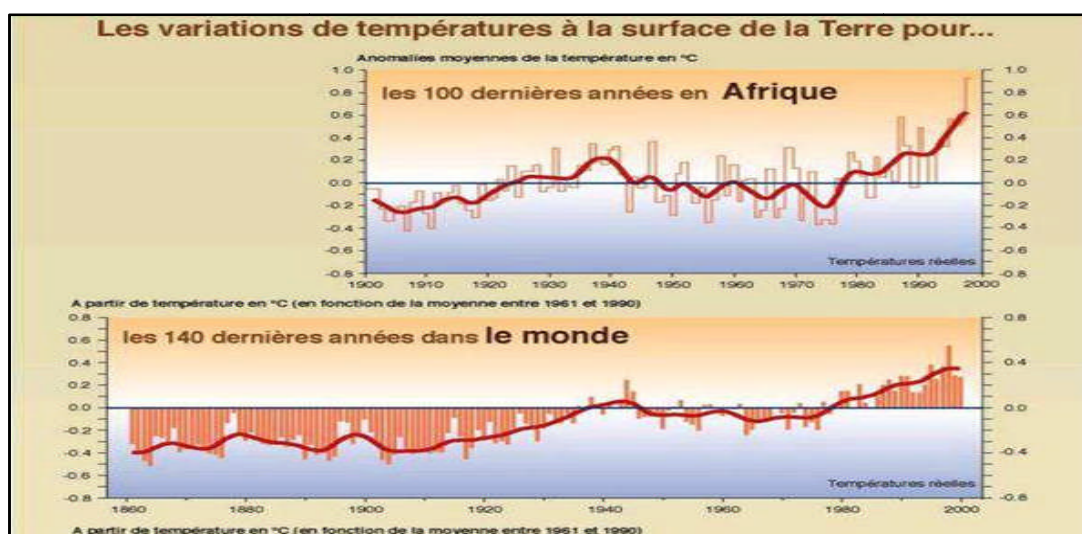
### III-1) Notion de climat

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).

### III-2) L'Algérie est-elle touchée par le réchauffement climatique ?

La conférence des Nations Unies sur les changements climatiques tenue au sommet fin 2015 à Paris, estimant que les pays du monde sont appelés à assumer leur responsabilité de façon commune mais en tenant compte également de leurs contributions historiques à la dégradation de l'environnement.

Le Maghreb a été identifié comme une zone particulièrement vulnérable face aux risques liés au changement climatique. L'exode rural conjugué à l'urbanisation intense sur la côte méditerranéenne durant les dernières décennies ont augmenté la vulnérabilité des populations concernées tout en accentuant les facteurs qui contribuent aux changements climatiques.



**Figure III-1** : Comparaison entre les variations de températures en Afrique et la tendance de réchauffement mondial, (<http://www.grida.no/publications>).

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'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.

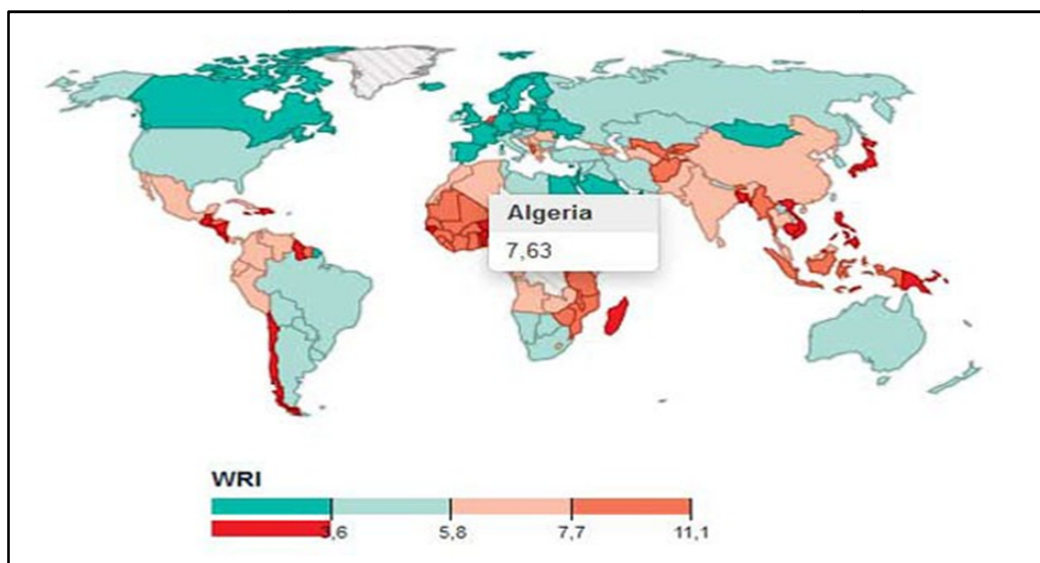
Concernant la pluviométrie en Algérie, l'étude fait ressortir un recul de 12% pour la période 1990-2005 en comparaison avec 1961-1990, causant une sécheresse à grande échelle au moment même où d'autres régions enregistrent des inondations dont celle de Bab El Oued en 2001 et dans la ville d'El Taref 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.

L'Algérie subit depuis les années 70 une sécheresse récurrente avec une baisse de précipitations d'environ 10% durant les 20 dernières années,

Les conséquences du réchauffement climatique sont de plus en plus visibles et "alarmantes" sur l'Algérie, et qui sont observées sur la pluviométrie, la dégradation des sols et l'érosion côtière, a indiqué le responsable au ministère des Ressources en eau et de l'environnement, Samir Grimes.

Donc L'Algérie figure parmi les pays à forts risques de changement climatique. C'est ce que révèle le rapport de l'université des Nations unies pour l'environnement et la sécurité humaine (UNU-EHS), Avec un indice de 7,63 % de vulnérabilité, l'Algérie se situe au top 50 des pays à risque (Figure III-2).



**Figure III-2** :Pays à risques de changement climatique, (l'université des Nations unies).

Cet indice est calculé en se basant sur les facteurs naturels, tel que les séismes, les inondations et la sécheresse, sur la prédisposition du pays à être touché par une catastrophe, les capacités à faire face, et enfin, la stratégie d'adaptation.

**III-3) Aperçu climatique global de l'année 2017**

**III-3-1) Quelques déclarations sur l'état du climat mondial en 2017**

- L'année 2017, année des extrêmes climatiques, pics de températures, vagues de chaleur, sécheresses, inondations dévastatrices et ouragans (Source : LCI).
- L'année 2017 parmi les plus chaudes de l'histoire (Source : COP23 /ONU).
- Le mois de juillet 2017, est le mois le plus chaud depuis 137ans (Source : NASA).

**III-3-2) Etat du climat Algérien en 2017**

- 1- Début de l'année 2017 très froid, avec la survenue d'une vague de froid qui a sévi durant le mois de janvier 2017. Cette vague de froid a affecté même les régions du Sud.
- 2- Un été chaud, voire très chaud dans certaines régions.
- 3- Une saison estivale marquée par l'occlusion de plusieurs foyers de feu de forêts affectant principalement la région Nord-est.
- 4- Une saison d'automne chaude, comme celles des dernières décennies et celle en cours (Automnes : 2004, 2006, 2013, etc).
- 5- Début des pluies tardif pour la plupart des régions de l'Algérie, ce qui a engendré des impacts directs sur l'agriculture et la ressource en eau affectant ainsi la disponibilité de l'eau dans les barrages.

**III-4) Climat de Tizi Ouzou**

Les sols àétudier dans les prochains chapitres sont prélevés aux environ de la wilaya de Tizi-Ouzou, et à l'aide des données de l' ONM (organisation nationale de la météorologie) de Tizi Ouzou sis a Boukhalfa on a pu avoir le bulletin climatique de tizi ouzou des années précédentes:

**Tableau III-1** : Températures de Tizi-Ouzou (ONM de Boukhalfa), 2006-2017enregistrées à l'ombre.

<b>2006</b>	JANV	FEVR	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUILL	AOUT	SEPT	OCTO	NOVEM	DECEM	Tot	Moy
T°Moy/mensu en°C	9,2	10,0	14,2	18,3	21,9	24,8	28,8	26,7	23,9	22,3	17,3	12,1	229,5	19,1
T°Moy/mensu mini	5,7	6,3	9,2	12,9	16,9	18,5	21,8	20,9	18,5	17,3	12,4	8,5	168,9	14,1
T°Moy/mensu MAX	13,8	15,3	20,7	25,2	29,0	32,3	37,1	34,2	31,7	30,1	23,8	16,7	309,9	25,8

<b>2007</b>	JANV	FEVR	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUILL	AOUT	SEPT	OCTO	NOVEM	DECEM	Tot	Moy
T°Moy/mensu en°C	11,4	13,0	12,3	15,7	19,5	23,3	27,5	28,1	23,7	19,4	13,6	10,6	218,1	18,2
T°Moy/mensu mini	7,0	9,1	8,1	12,3	14,1	17,8	20,8	21,9	18,4	15,2	9,6	7,2	161,5	13,5
T°Moy/mensu MAX	17,6	18,0	17,9	20,5	26,1	30,4	35,7	35,5	30,9	25,1	18,9	15,6	292,2	24,4

2008	JANV	FEVR	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUILL	AOUT	SEPT	OCTO	NOVEM	DECEM	Tot	Moy
T°Moy/mensu en°C	11,0	12,6	13,0	16,3	18,8	23,5	27,9	27,8	24,4	19,8	13,5	13,1	221,7	18,5
T°Moy/mensu mini	6,5	7,4	8,1	10,4	14,4	17,3	21,5	21,3	19,4	15,4	9,7	6,8	158,2	13,2
T°Moy/mensu MAX	16,5	18,5	18,9	23,2	25,0	30,8	35,6	36,0	31,1	26,2	18,8	15,4	296,0	24,7

2009	JANV	FEVR	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUILL	AOUT	SEPT	OCTO	NOVEM	DECEM	Tot	Moy
T°Moy/mensu en°C	10,8	10,4	12,7	14,0	20,8	25,2	29,6	28,0	22,8	19,3	15,3	15,8	224,7	18,7
T°Moy/mensu mini	7,7	5,9	7,6	9,6	15,0	18,2	22,8	22,1	18,2	14,3	10,9	8,9	161,2	13,4
T°Moy/mensu MAX	14,9	16,0	19,4	19,6	27,6	33,2	37,5	35,8	29,4	25,7	21,5	18,4	299,0	24,9

2010	JANV	FEVR	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUILL	AOUT	SEPT	OCTO	NOVEM	DECEM	Tot	Moy
T°Moy/mensu en°C	11,4	12,8	13,7	16,4	17,6	22,6	27,7	27,2	23,6	19,2	14,3	11,2	217,7	18,1
T°Moy/mensu mini	7,8	9,1	9,4	11,5	12,3	16,2	20,6	20,7	17,9	14,4	10,9	7,2	158,0	13,2
T°Moy/mensu MAX	16,1	17,6	19,7	22,2	24,3	29,8	35,8	35,5	31,1	26,2	19,0	16,7	294,0	24,5

2011	JANV	FEVR	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUILL	AOUT	SEPT	OCTO	NOVEM	DECEM	Tot	Moy
T°Moy/mensu en°C	10,6	10,3	13,4	17,6	19,7	23,2	27,5	28,5	24,8	19,6	15,7	11,7	222,6	18,6
T°Moy/mensu mini	6,9	6,3	8,7	12,1	14,8	17,8	21,6	21,8	18,9	14,5	12,2	8,3	163,9	13,7
T°Moy/mensu MAX	15,9	15,8	19,5	24,4	26,0	29,6	35,1	37,2	32,5	27,1	21,4	16,8	301,3	25,1

2012	JANV	FEVR	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUILL	AOUT	SEPT	OCTO	NOVEM	DECEM	Tot	Moy
T°Moy/mensu en°C	9,9	6,5	13,3	15,3	19,9	26,4	27,8	30,3	24,4	20,8	16,3	11,9	222,8	18,6
T°Moy/mensu mini	5,6	2,7	9,0	11,0	14,0	20,0	21,6	23,4	18,7	15,8	12,5	8,2	162,5	13,5
T°Moy/mensu MAX	16,3	11,9	19,7	21,1	27,0	34,2	35,7	30,1	32,3	28,1	21,8	17,4	295,6	24,6

2013	JANV	FEVR	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUILL	AOUT	SEPT	OCTO	NOVEM	DECEM	Tot	Moy
T°Moy/mensu en°C	10,8	9,4	14,3	15,8	17,5	22,0	26,7	26,9	24,1	23,1	13,6	11,2	215,4	18,0
T°Moy/mensu mini	6,9	5,2	10,4	11,3	12,8	15,5	20,3	20,3	19,1	18,1	17,9	7,4	165,2	13,8
T°Moy/mensu MAX	15,7	14,6	19,4	21,8	23,0	28,9	34,5	35,1	31,1	30,6	10,7	16,9	282,3	23,5

2014	JANV	FEVR	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUILL	AOUT	SEPT	OCTO	NOVEM	DECEM	Tot	Moy
T°Moy/mensu en°C	12,3	12,8	12,3	17,5	19,2	23,7	27,0	28,0	26,2	21,6	17,3	10,9	228,8	19,1
T°Moy/mensu mini	8,6	8,6	8,2	11,3	13,2	17,4	20,0	21,5	21,0	16,0	13,5	7,7	167,0	13,9
T°Moy/mensu MAX	17,6	18,8	17,5	24,3	26,5	30,7	34,7	35,9	33,7	29,0	22,7	15,4	306,8	25,6

2015	JANV	FEVR	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUILL	AOUT	SEPT	OCTO	NOVEM	DECEM	Tot	Moy
T°Moy/mensu en°C	9,9	9,8	13,1	17,3	21,4	24,7	29,7	28,8	24,4	20,2	14,9	12,2	226,4	18,9
T°Moy/mensu mini	6,0	6,5	8,4	11,7	15,2	17,9	22,2	23,2	19,7	16,0	10,8	7,2	164,8	13,7
T°Moy/mensu MAX	15,6	13,9	19,3	24,4	28,7	32,0	38,4	35,8	30,5	26,2	21,0	19,3	305,1	25,4

2016	JANV	FEVR	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUILL	AOUT	SEPT	OCTO	NOVEM	DECEM	Tot	Moy
T°Moy/mensu en°C	12,8	12,6	12,5	16,1	19,0	24,3	27,9	27,1	24,3	22,5	15,7	12,6	227,4	19,0
T°Moy/mensu mini	8,6	8,5	7,8	11,2	13,6	17,1	20,7	20,4	18,0	16,9	11,4	9,3	163,5	13,6
T°Moy/mensu MAX	18,4	18,0	17,6	22,1	25,0	32,0	35,7	34,6	31,7	29,6	21,3	17,6	303,6	25,3

2017	JANV	FEVR	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUILL	AOUT	SEPT	OCTO	NOVEM	DECEM	Tot	Moy
T°Moy/mensu en°C	8,9	12,7	14,5	16,4	21,8	26,4	29,4	29,7	23,9	19,5	13,7	10,4	227,3	18,9
T°Moy/mensu mini	5,2	8,6	8,8	10,5	15,2	19,8	22,3	25,1	18,1	13,5	9,8	7,5	164,4	13,7
T°Moy/mensu MAX	13,7	18,2	21,2	23	29,6	34,6	37,5	37,4	30,0	26,7	19,4	14,3	305,6	25,5

### III-5) Généralités sur les Sols

Le sol est défini par opposition au mot roche, dans sa définition géotechnique. C'est un agrégat naturel de grains minéraux, séparables par une action mécanique légère. Le sol est le résultat d'une altération naturelle physique ou chimique des roches. On conçoit donc que

la limite entre un sol et une roche altérée ne soit pas définie nettement. Le sol est un matériau meuble, ce caractère étant fondamental. Il ne suffit cependant pas à définir un sol naturel car certains matériaux produits par l'homme présentent aussi ce caractère. Par exemple les sous-produits miniers et les granulats concassés (sable, gravier, ballast...) sont aussi des matériaux meubles. Le mécanicien des sols étudie donc aussi bien des sols naturels que des matériaux fabriqués artificiellement à partir de sols ou de roches et présentant un caractère meuble.

Le terme de « sol » est général. Selon la norme (NF XP 94-010), un sol est défini comme étant un « agglomérat » constitué de particules solides séparables par trituration sous l'eau provenant soit de la désagrégation des roches par altération mécanique ou chimique sous l'effet d'agents naturels, soit de la décomposition d'organismes vivants, végétaux ou animaux, soit d'une activité industrielle

Le terme de sol, selon cette définition, convient à de nombreux matériaux :

- les formations géologiques superficielles comme les dépôts de sédiments quaternaires, les roches endogènes altérées (arènes de gneiss, altérites de schistes)
- les formations géologiques sédimentaires anciennes constituées de roches « tendres » (marnes, argiles, sables ...).

Selon (HOLMES et CLARK, 1985) ; les roches sédimentaires se composent de:

- \*82% de roches à grains fins (marnes, schistes, argiles) ;
- \*12% de calcaires.

Dans notre cas, on s'intéresse aux roches sédimentaires plus exactement le matériau marne.

### III-6) Définition de la marne

- **En géologie**, la marne est définie comme étant une roche sédimentaire constituée d'un mélange de calcaire et d'un pourcentage d'argile variant entre 30 à 70 %. Elle est moins compacte que les calcaires et moins plastique que les argiles.
- **En géotechnique**, les marnes sont des roches relativement tendres qui présentent une résistance élevée à l'état sec mais leur comportement est différent en contact avec l'eau ; elles deviennent gonflantes et non résistantes, ce qui limite leur utilisation comme matériaux de remblais dans les travaux de génie civil et infrastructures, (MELLAL et LAMRI, 2010).

### III-7) Caractéristiques des marnes

Les marnes sont 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'argile montmorillonitique 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 texture. 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 composantes, de la texture initiale et de la nature de la fraction argileuse.

### III-8) Identification visuelle :

Il existe deux sortes de marne qui sont les suivants :

#### a. Les marnes saines

Elles se présentent sous forme de massifs de couleur grisâtre. Elles sont compactes et n'ont pas subi un quelconque chargement concernant leurs caractéristiques physiques et mécaniques(Figure III-4).



Figure III.4 :Marne grisâtre - M'Douha.

#### b. Les marnes altérées

Leur couleur est jaune. Elles ont subi une modification de leurs caractéristiques physiques et chimiques causant par conséquent une dégradation des propriétés mécaniques(Figure III-5).



**Figure III-5 :** Marne d'une couleur jeune La Lieude Hérault.

❖ On montre quelque type de marnes dans ces figures :



**Figure III-6 :** Lamarne gréseuse de M'Douha. **Figure III-7:** Calcaire marneux ; Carlencas.



**Figure III-8 :** La marne bleue. **Figure III-9 :** Une marne carbonifère.

### III-9) L'altération des marnes

L'altération des marnes se traduit essentiellement par une dégradation de la structure de la roche en surface sous l'effet de divers mécanismes (BUFFALO, 1989 et GALLART, 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 affluant est le drainage des nappes. On citera, parmi les paramètres d'altération :

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

Le processus d'altération s'effectue suivant les deux catégories complémentaires ci-après.

#### a. L'altération physique et mécanique

L'altération physique provoquée par la dessiccation et l'humidification a pour conséquence l'apparition de fissures, pour laquelle la tension superficielle est rigoureusement exigible. De plus, elle détruit les liaisons entre les agrégats près de la surface est montrée sur la figure N°10.



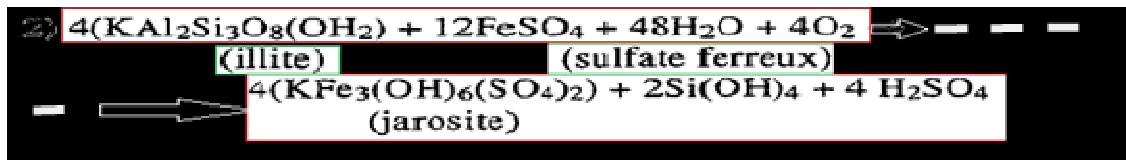
Figure III-10 :Altération de la surface et le profil de marne.

#### b-L'altération chimique

L'écoulement de l'eau et l'oxydation entraînent une transformation des divers minéraux(LE BOUTEILLER. C, 2011).

**La présence de pyrite:** Les pyrites sont des minéraux qui sont souvent rencontrés dans les roches sédimentaires, mais en général comme minéral accessoire. L'oxydation de la pyrite est alors donnée comme une cause de l'altération de ces roches par plusieurs auteurs (HARPER et al. 1979; STEWARD et CRIPPS- 1983; TAYLOR, 1988; CHIGIRA, 1990; COULTHARD et BELL- 1993 ; RAKONTONDRA TSIMA et al. 1993).





Un autre effet de réduction de la qualité mécanique de la roche provoquée par l'oxydation de la pyrite est dû à la formation de vides et à l'augmentation de la porosité de la roche. Ce phénomène est une conséquence de la dissolution des carbonates par les acides produits dans le processus d'oxydation (VEAR et CURTIS, 1981 ; APUD STEWARD et CRIPPS, 1983), voir les figures suivantes.

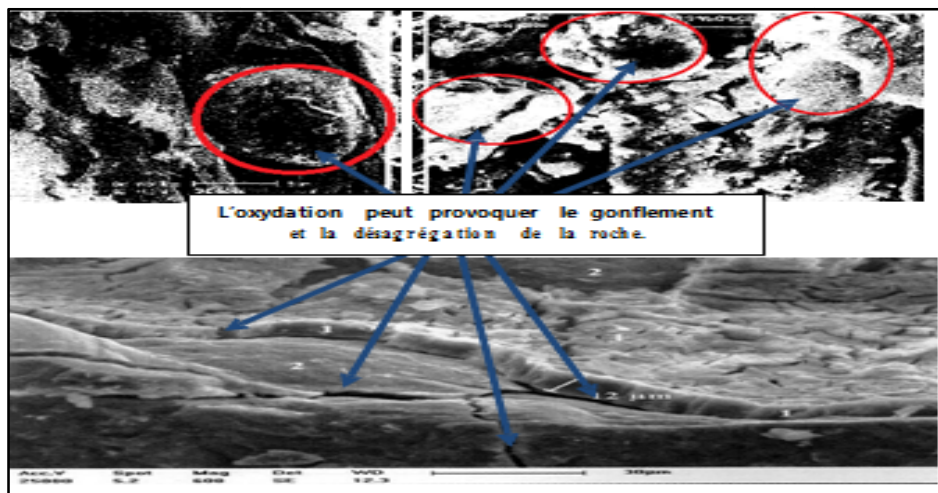


Figure III- 11 :Gonflement et la désagrégation de la marne.

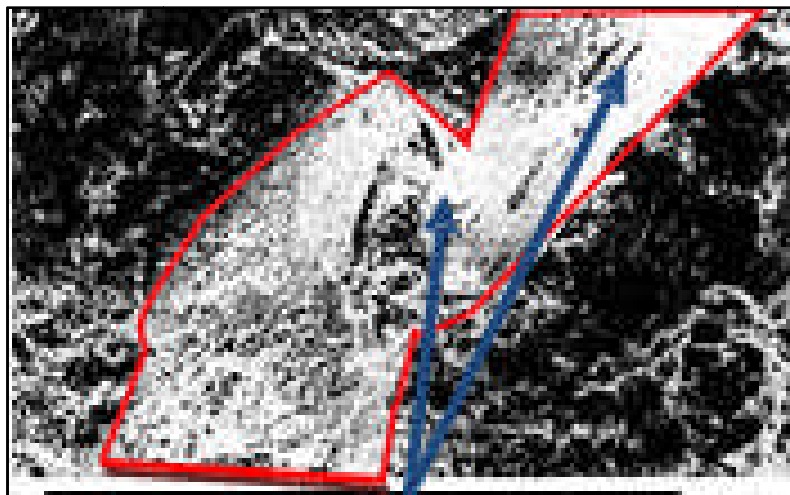
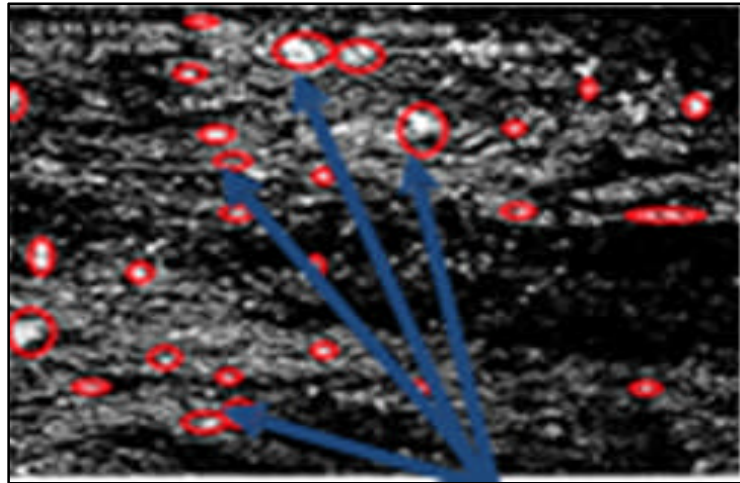


Figure III- 12 :Les plaquettes de carbonates Avant la présence de pyrite.



**Figure III- 13 :** Avant le gonflement Présence de pyrite (Points plus clairs).

### III-10) Influence du réchauffement climatique sur les sols

#### ❖ Explication du phénomène

Les sols fins riches en argiles gonflantes, soumis à un brassage par les « mouvements vertiques » liés aux variations saisonnières de volume des sols, conduisant en période sèche à la formation de fentes de retrait, en période humide à la formation, en surface, de microreliefs du matériau à la formation de surfaces de friction ou « slickensides » caractéristiques (DUCHAUFOR.R, 1977-1984 et TESSIER.D, 2006).

#### III-10-1) Les dégradations qui peuvent engendrer par les sols marneux

##### A-Retrait-gonflement

Le problème principal est le **gonflement/retrait** qui cause des fissures apparaissant clairement sur les constructions et sur les routes. Ces fissures occasionnent des ouvertures dans les fenêtres et les portes et elles se propagent dans la maçonnerie et la structure de l'ouvrage.

Les ouvrages sont sujets au gonflement principalement dans la structure et la maçonnerie du bâtiment. Parmi ces derniers, Les maisons individuelles, construites sans mesures de précaution de construction sur ce type de sol, sont sujettes à des dégradations et des fissures au niveau des poteaux, des murs de remplissage et des fondations (radier, semelle superficielle, ou filante et les pieux).

Ces désordres résultent du caractère différentiel que prennent les mouvements du sol de fondation (terrassement ou gonflement) sollicitant la structure en flexion ou en cisaillement.

Ces différences relatives de mouvement proviennent par ailleurs de l'hétérogénéité des sols de fondation, de celle des forces appliquées par la structure sur le sol, ainsi que des perturbations hydriques que le bâtiment peut engendrer (Figures III-14, 15 et 16). Les dégâts causés aux structures des bâtiments reposant sur des sols fins gonflants aux U.S.A (1976) ont été chiffrés à environ 2.25 milliards de dollars.

❖ Cas des bâtiments



Figure III-14 : Fissure sur les murs et Fissures diagonales (DERRICHE Z et al.2002).

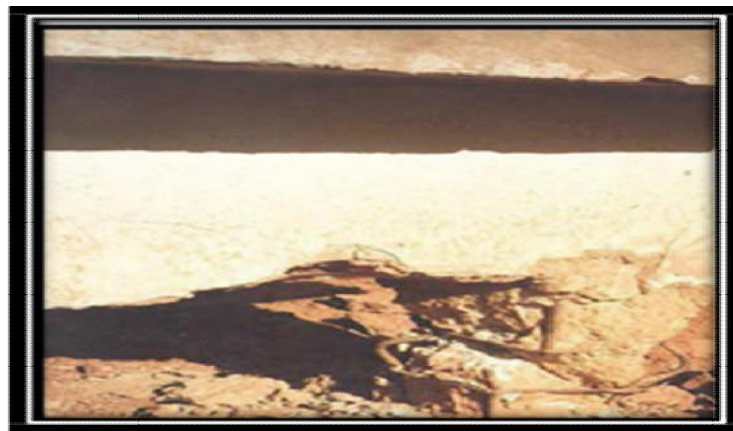


Figure III-15 : Cisaillement au niveau des racines (DERRICHE. Zet al.2002).

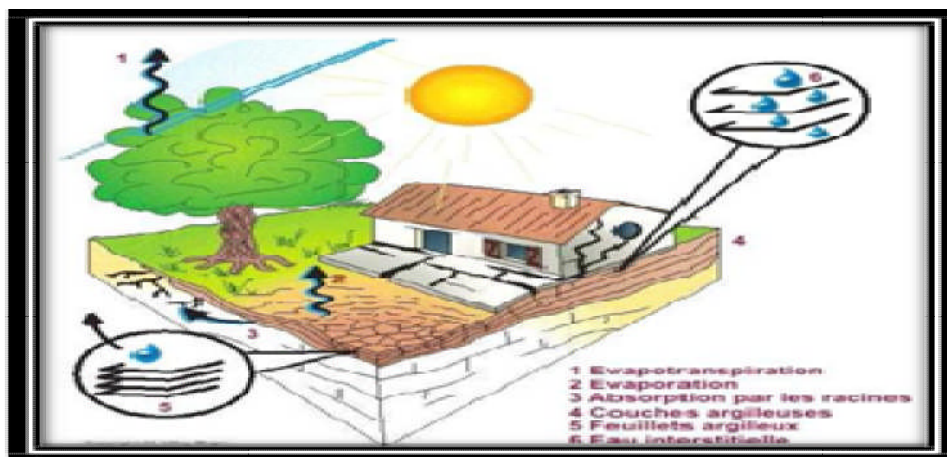


Figure III-16: Risque à prendre en compte lors de la construction (FREEAH, 2006).

❖ Cas des chaussées

Le gonflement peut provoquer des désordres importants à la structure de la chaussée. Ce phénomène est causé par des variations de teneur en eau du sous-sol. D'après

(JENNINGS,1962), il peut être attribué au climat et à la surcharge. D'autres signalent que sur les routes d'importance moyenne, il ya apparition de divers type de fissures(Figure III-17).



**Figure III-17** : Dégradation des routes (FREEAH, 2006).

### **B-Gel - dégel**

Dans le cas de roches à sédiments, il y a d'une part toujours de l'eau présente dans le matériau. En effet, les marnes, du fait de leur structure en feuillet et de leur affinité électrostatique avec les molécules d'eau, sont très difficilement dé-saturées. D'autre part, la marne est un matériau à rupture fragile plutôt que ductile, sa résistance à la rupture en traction de la marne est de 2MPa. Par contre 10MPa pour le calcaire ou 28 MPa pour le quartzite (AHRENS, 1995). La marne est donc a priori particulièrement sensible au phénomène de gélifraction.

### **C-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(Figures III-18 et 19).



**Figure III-18** : Dessiccation de la marne.



**Figure III-19** : Humectation.

### **Conclusion**

L'expérience acquise dans l'analyse de l'aléa sécheresse géotechnique et de ses effets sur les constructions mérite d'être confrontée aux perspectives du changement climatique global. Il faut espérer que, devant les changements à venir, les écosystèmes présenteront la résilience nécessaire pour s'adapter. Les communautés administratives et sociologiques, confrontées à un milieu naturel de plus en plus stressant, devront définir dans l'urgence les bases d'un développement soutenable. La mise en œuvre des politiques de prévention des risques, incluant l'information et la formation des citoyens, doit participer de cette réaction positive.

**Chapitre IV :**

**Essais d'identifications**

## Introduction

Tout projet de construction, que ce soit une route, un pont ou un bâtiment doit être étudié avec des données complètes, ce qui suppose une bonne reconnaissance du sol donc la géotechnique est le domaine d'étude des propriétés physiques, mécaniques et hydrauliques des sols en vue de leur application en construction civile. C'est une science empirique basée sur les données recueillies lors des essais en laboratoire.

Dans notre travail les essais d'identification physique qui ont été effectués sur les types du sol étudiés sont:

- ✓ La teneur en eau (w) ;
- ✓ Masse volumique des grains solides ;
- ✓ Masse volumique humide ;
- ✓ Masse volumique sèche ;
- ✓ L'indice des vides, le degré de saturation ;
- ✓ Analyse granulométrique par la sédimentométrie;
- ✓ Les limites d'Atterberg ;
- ✓ Valeur de bleu de méthylène ;
- ✓ Analyse chimique.

### IV-1) 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 répertoriée 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 Km<sup>2</sup>.

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

#### ✓ **Echantillon N°01 :**

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 (Figure IV-1).



Figure IV-1: Site de prélèvement de la marne 1 Boghni.

✓ **Echantillon N°02 :**

L'échantillon N°02 est prélevé d'un site à «Draa El Mizan» (**DEM**) (date de prélèvement : **01/2018 (LNHC de Tizi-Ouzou)**); pour une réalisation de bâtir, la profondeur de sondage est entre 13 m et 14 m (Figure IV-2).



Figure IV-2: Site de prélèvement de la marne 2DEM.

✓ **Echantillon N°03:**

L'échantillon N°03 est prélevé d'un site à «Dely Ibrahim, Alger» (date de prélèvement : **02/2018, LNHC de Tizi-Ouzou**); pour une réalisation d'un marché la profondeur de sondage est entre 04 m et 05 m.



Figure IV-3: site de prélèvement de la marne 3 Dely Ibrahim.

✓ **Echantillon N°04 :**

L'échantillon N°03 est prélevé à «Tizi-Ouzou» boulevard Chabane, (date de prélèvement : 04/2018 ;à une profondeur de 0 m à0,5m.



Figure IV-4: Site de prélèvement de la marne 4 les Chabane.

**IV-2)Caractéristiques physiques et chimiques :**

**IV-2-1) Caractéristiques physiques :**

## IV-2-1-1) La teneur en eau

La norme **NF P90-050 (octobre 1991)** a pour objet la détermination de la teneur en eau pondérale, par la méthode de l'étuvage.

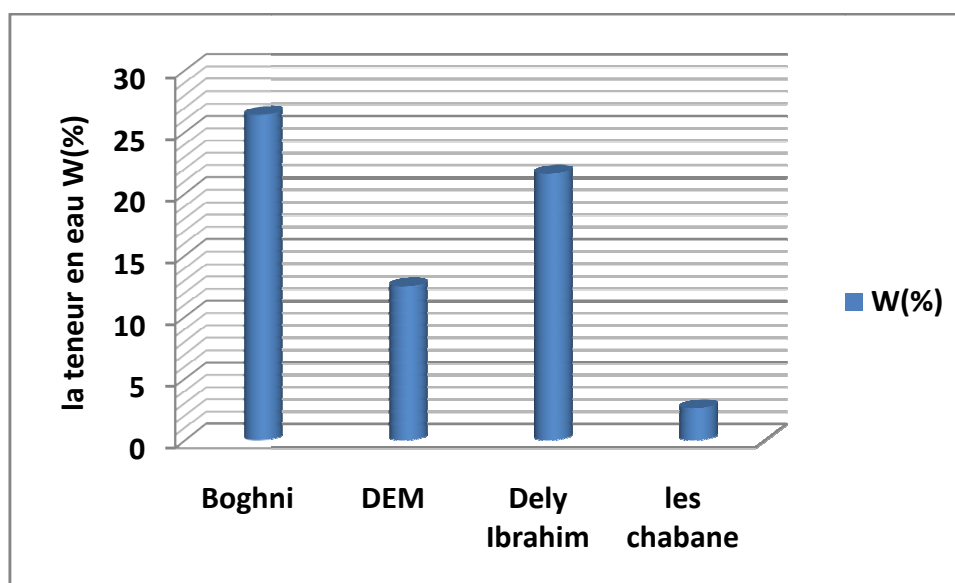
C'est le rapport du poids d'eau que le sol contient au poids de ses éléments secs, après dessiccation à l'étuve à 105°C (60°C dans le cas des sols contenant des éléments organiques).

$$W = (w_w / w_s) \times 100 \quad (\text{IV-1})$$

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

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

Sites de prélèvement des échantillons	W (%)
Boghni	26,42
DEM	12,46
Dely Ibrahim	21,62
LesChabane	2,58



**Figure IV-5 :** Teneurs en eau naturelles des différents échantillons.

- **Interprétation des résultats**

A l'exception de la marne de **Boghni** et **Dely Ibrahim** dont la teneur en eau est relativement élevée ; Les marnes issues des sites **les Chabane** et **DEM**, présentent des teneurs en eau naturelles faibles ceci peut être expliqué par le fait que ces dernières se présentent sous forme de blocs compacts, donc avec un volume des vides très réduit et

une perméabilité très faible, d'où la difficulté d'infiltration d'eau, sachant que les échantillons sont prélevés en période hivernale.

#### IV-2-1-2) Masse volumique des sols :

##### 1-Masse volumique des grains solides des sols selon La norme (NF P 94 – 054)

##### Méthode au pycnomètre :

La norme NF P94-054 (octobre 1991) a pour objet la détermination, au pycnomètre à eau, de la masse volumique des grains solides de sol. Elle s'applique sur échantillons d'éléments de dimension inférieure à 2 mm.



Figure IV-6: Matériels utilisés.

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

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

Avec :

$m_1$  : masse du pycnomètre vide ;

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

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

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

$\rho_w$  : Masse volumique de l'eau égale à 1000kg/m<sup>3</sup>.

Tableau IV-2: Masse volumique des grains solides.

Sites	$\rho_s$ (g /cm <sup>3</sup> )
Boghni	2,78
DEM	2,61
Dely Ibrahim	2,73
Les Chabane	2,29

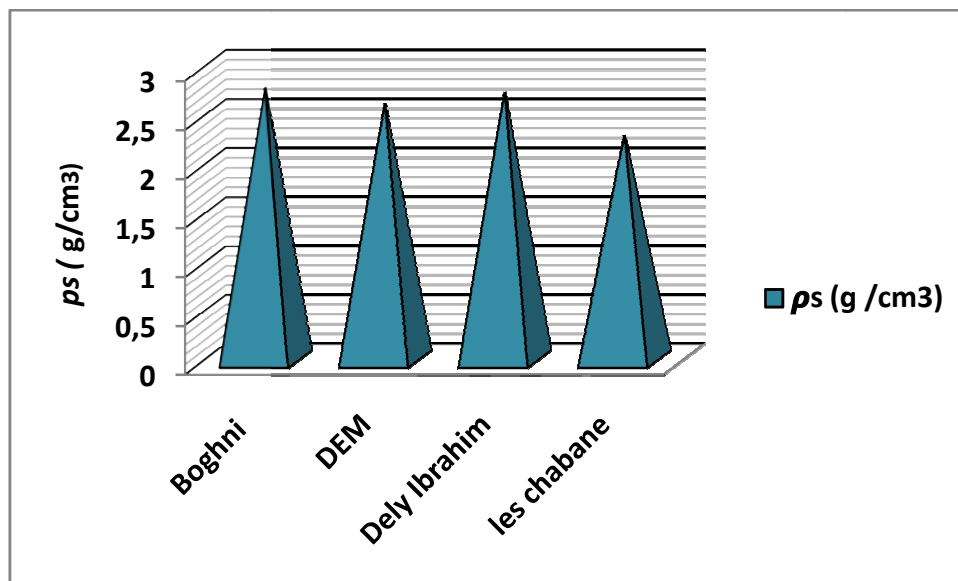


Figure IV-7 : Masses volumiques des grains solides des marnes étudiées.

## 2-Masse volumique humide des sols (NF P 94 - 053) – Méthode de l'immersion dans l'eau :

À la moyenne d'une balance hydrostatique, on pèse notre échantillon paraffiné dans l'eau. La même masse de l'échantillon dans l'air est paraffinée et ensuite pesée dans l'air.

Méthode de mesure de  $\rho_h$  par pesée hydrostatique :

(La masse de l'échantillon est obtenue par pesage à l'air et le volume par la méthode de l'immersion dans l'eau).

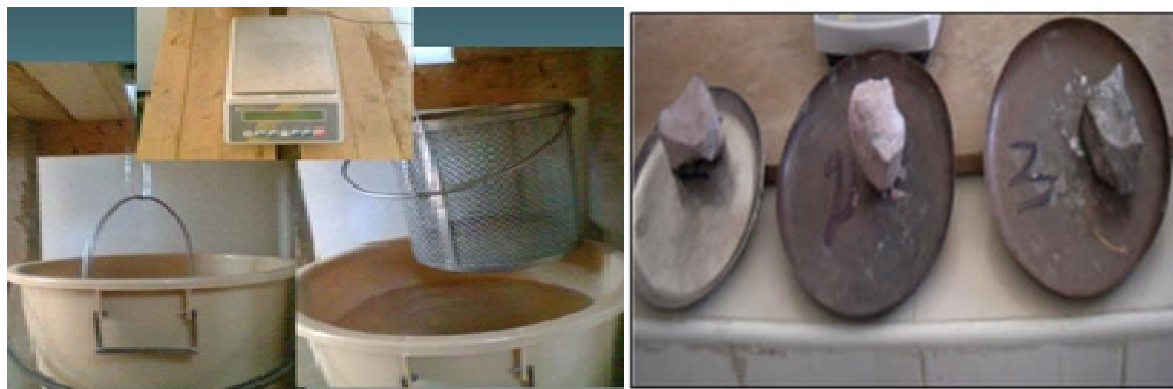


Figure IV-8 : Matériel d'essai de l'immersion dans l'eau.

Tableau IV-3 : Masse volumique humide.

site	$\rho_h$ (g/cm³)
Boghni	1,98
DEM	2,03
Dely Ibrahim	2,03
Les chabane	2,01

**3-Masse volumique du sol sec (NF P 94 – 064) :**

On utilise la formule suivante :

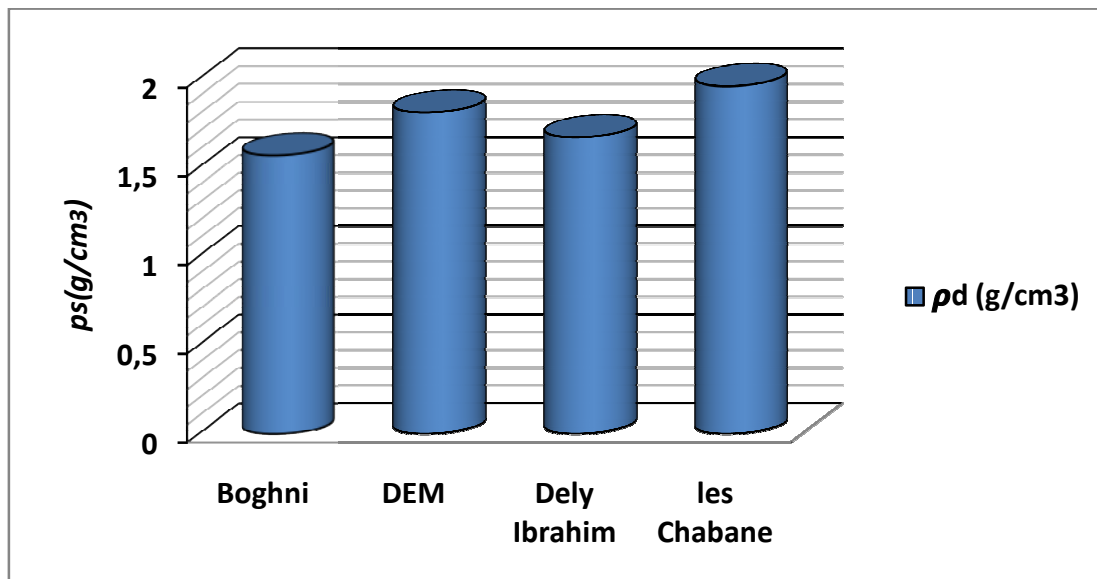
$$\rho_d = \rho_h / (1 + w) \tag{IV-3}$$

**Tableau IV-4 :**Classification des masses volumiques sec.

$\rho_d$ (g /cm <sup>3</sup> )	Appréciation
< 1,6	Faible
1,6 – 1,8	Moyenne
> 1,8	dense

**Tableau IV-5 :**Masse volumique du sol sec.

Site	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Appréciation
Boghni	1,57	<b>faible</b>
DEM	1,81	<b>moyenne</b>
Delly ibrahim	1,67	<b>moyenne</b>
Les chabannes	1,96	<b>dense</b>



**FigureIV-9 :**Masses volumiques sèches des marnes étudiées.

**IV-2-1-3) Indice des vides et degré de saturation :**

- **Indice des vides "e"**

Il est défini comme étant le rapport du volume des vides (V<sub>v</sub>) au volume des grains solides (V<sub>s</sub>).  $e = V_v / V_s$  : (L'indice des vides peut être supérieur à 1) sachant que l'indice des vides dépend aussi des paramètres déjà déterminés ( $\rho_s$  et  $\rho_d$ ) selon la formule suivante :

$$e = (\rho_s / \rho_d) - 1 \tag{IV-4}$$

« L'indice des vides peut être supérieur à 1, il varie généralement entre 0,1 et 5. Mais il peut atteindre des valeurs importantes ( $e > 10$ ) pour certains sols. Il est exprimé sans unité ou en pourcentage (%) » (BOUDLAL, 2007).

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

sites	e
Boghni	0,7707
DEM	0,4419
Delly Ibrahim	0,6347
Les chabannes	0,1623

❖ **Interprétation des résultats :**

Dans le cas des sols étudiés, les résultats des indices des vides pour les quatre sites (**Tableau IV-6**) varient de **0,1623 à 0,7707**, ce qui nous permet de connaître la proportion des vides, et de conclure que la marne de Les Chabane est plus compacte par rapport à celle de Boghni qui est moins compacte.

Les roches marneuses et la calcite qui permet aux grains de rester collés les uns sur les autres, réduisant ainsi le volume des vides (MEHANI, K, 1997).

• **Degré de saturation "sr" :**

Le degré de saturation indique le pourcentage des vides remplis par l'eau. Il est défini comme le rapport du volume de l'eau ( $V_w$ ) au volume des vides ( $V_v$ ).

$$Sr = V_w / V_v \quad (IV-5)$$

$$\text{avec : } Sr = (\rho_s / \rho_w) \times (W / e) \quad (IV-6)$$

**Tableau IV-7:** L'état de saturation du matériau d'après TERZAGHI.

Sr (%)	Appréciation
100	saturé
76 – 99	détrempé
51 – 75	mouille
26 – 50	humide
1 – 25	légèrement humide
0	sec

**Tableau IV-8 :** Degré de saturation pour les 7 sites.

Sites	Sr (%)	Appréciation
<b>Boghni</b>	95,29	détrempé
<b>DEM</b>	73,59	mouillé
<b>Dely Ibrahim</b>	92,99	détrempé
<b>Les chabane</b>	3,64	légèrement humide

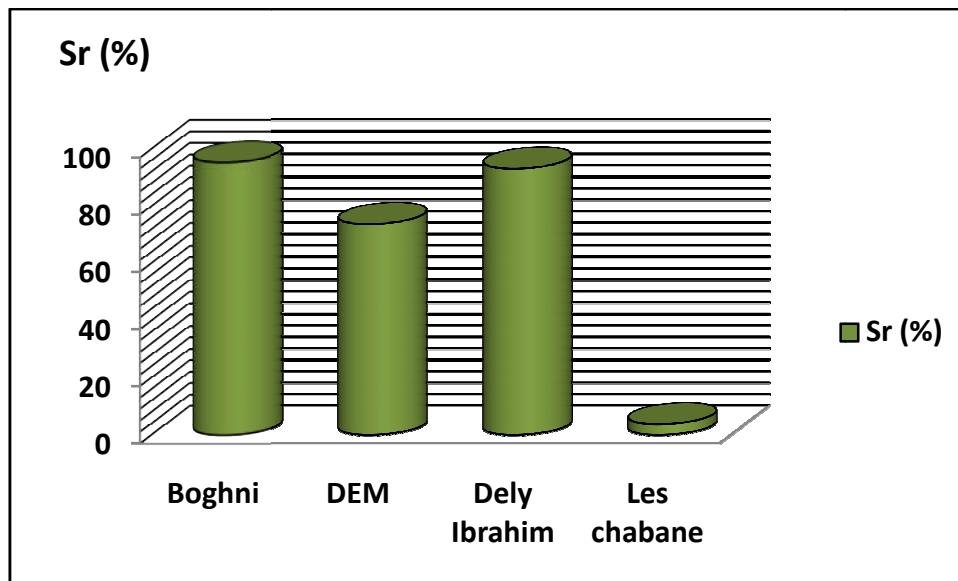


Figure IV-10 : Degrés de saturation Sr des marnes étudiées.

• *Interprétation des résultats:*

Le degré de saturation de la marne de les **Chabane** est inférieur à **40 %**, ce qui permet de dire qu'on est en présence d'un sol non saturé (légèrement humide), par contre la marne de **Boghni** et celle de **Dely Ibrahim et Draa El Mizan** sont partiellement saturés.

**IV-2-1-4) L'analyse granulométrique par sédimentation [NF P94- 056] :**

L'analyse granulométrique par sédimentation est un essai qui complète l'analyse granulométrique par tamisage pour déterminer la répartition selon le diamètre des grains de fraction fine de sol inférieure à  $80 \mu\text{m}$ .

**a) Principe de l'essai :**

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

**b) La procédure de l'essai**

En premier lieu, on prépare un mélange d'eau distillée additionnée d'un défloculant. Ce dernier a pour but de décoller les grains les uns des autres et ainsi permettre leurs libres

mouvements dans l'eau. Cette solution est constituée à partir de 440 cm<sup>3</sup> d'eau distillée et de 60 cm<sup>3</sup> d'une solution à 5% d'hexamétaphosphate de sodium. Ensuite, on prend 40 g dutamisât de 0,08 mm qu'on imbibe dans 500 cm<sup>3</sup> de la solution préparée pendant au moins 15 heures, à température ambiante.

Au moyen de l'agitateur mécanique, la prise d'essai est dispersée dans la solution pendant **3 minutes** au minimum, à **10 000 tr/min**. La suspension est immédiatement versée dans une éprouvette d'essai, en complétant par de l'eau distillée à la température ambiante jusqu'à 1000 cm<sup>3</sup>. À côté, une éprouvette-témoin est également remplie d'eau distillée où on plonge un thermomètre parfaitement propre. On agite vigoureusement, à l'aide de l'agitateur manuel, afin d'assurer une concertation uniforme sur toute la hauteur de l'éprouvette. L'essai débute au moment où on retire l'agitateur et on plonge le densimètre avec précaution après déclenchement du chronomètre. La densité est lue au sommet du ménisque à 0,0001 près pour les temps suivants en minutes : 0,5 ; 1 ; 2 ; 5 ; 10 ; 20; 40 ; 80 ; 240 ; 1440.



**Figure IV-11:** Matériel d'essai d'analyse granulométrique par sédimentométrie.

**c) Les résultats des analyses granulométriques par sédimentométrie :**

**Tableau IV-9:** Résultats des analyses granulométriques par sédimentométrie pour le site de Boghni

diamètre (m)	80	75,00	55,00	38,00	25,00	17,00	12,00	8,00	5,00	2,00
%passant	99,84	92,66	81,50	71,13	60,35	53,19	47,01	38,83	31,65	20,40

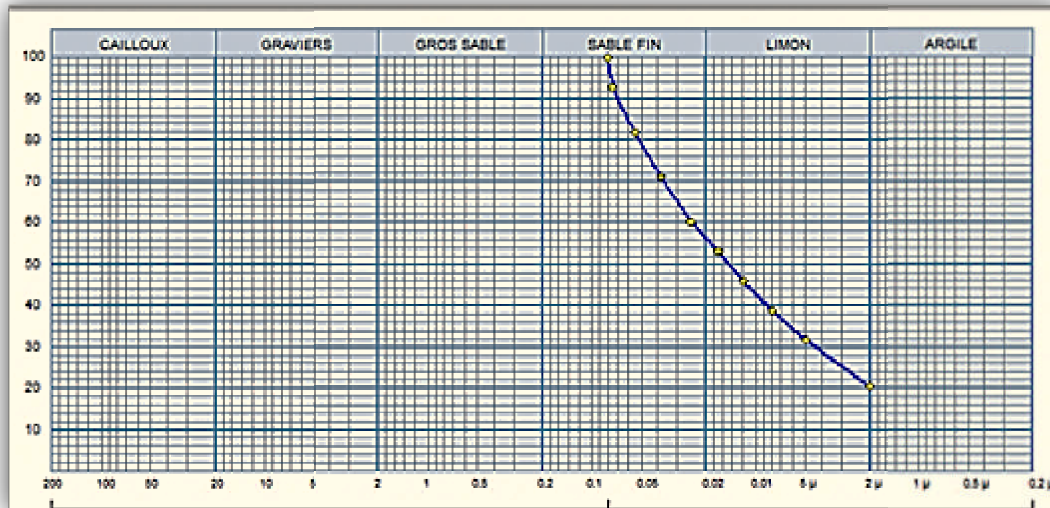


Figure IV-12 :Analyse granulométrique par sédimentation sol de Boghni.

Tableau IV-10 :Résultats des analyses granulométriques par sédimentométrie pourle sol de DEM.

<b>diamètre (µm)</b>	80	75	55	38	25	17	12	8	5	2
<b>% passant</b>	95,02	88,98	82,35	72,40	52,49	44,19	35,90	38,74	27,50	15,52

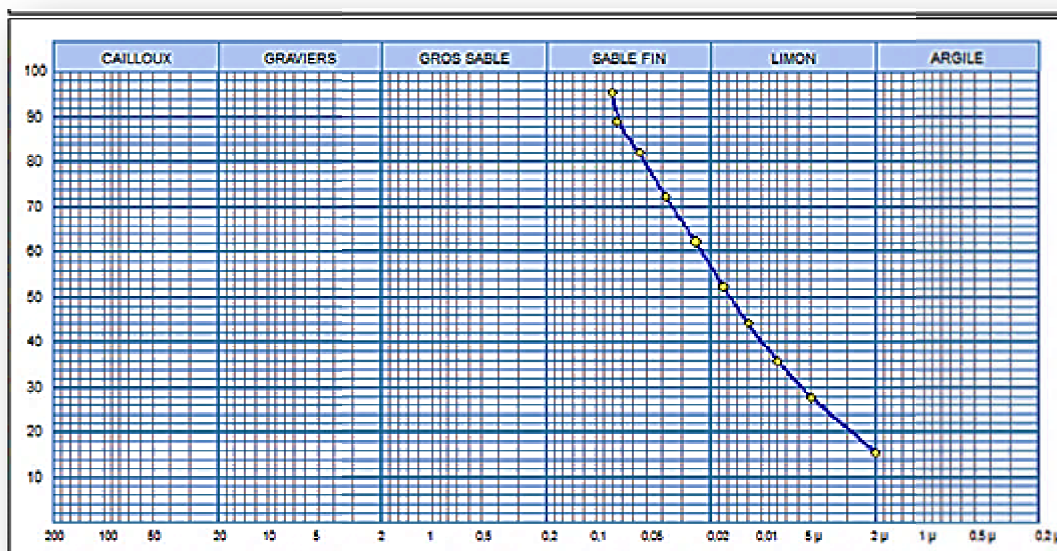
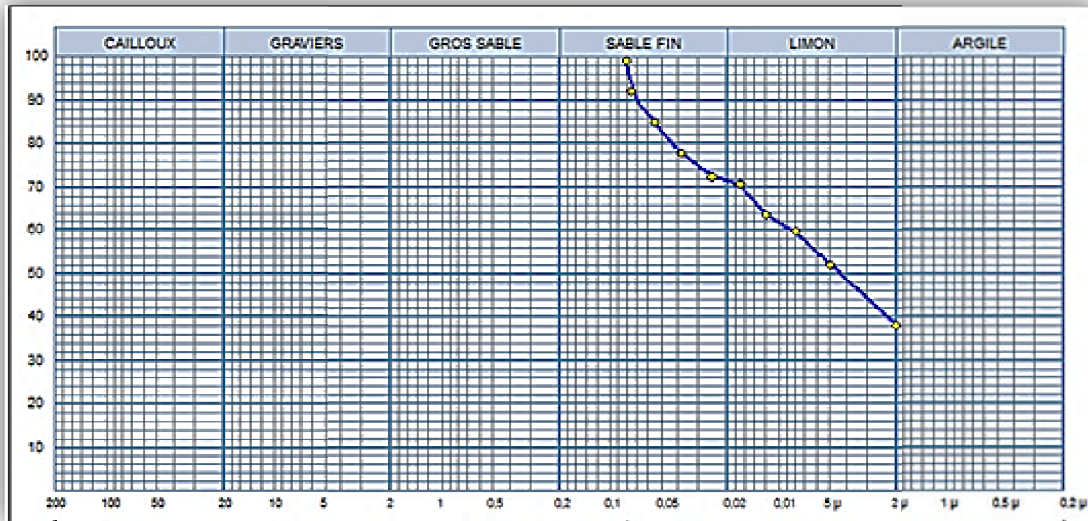


Figure IV-13 : Analyse granulométrique par sédimentation sédimentométrie pour le sol de DEM.

**Tableau IV-11** : Résultats des analyses granulométriques par sédimentométrie pour le site dely ibrahim.

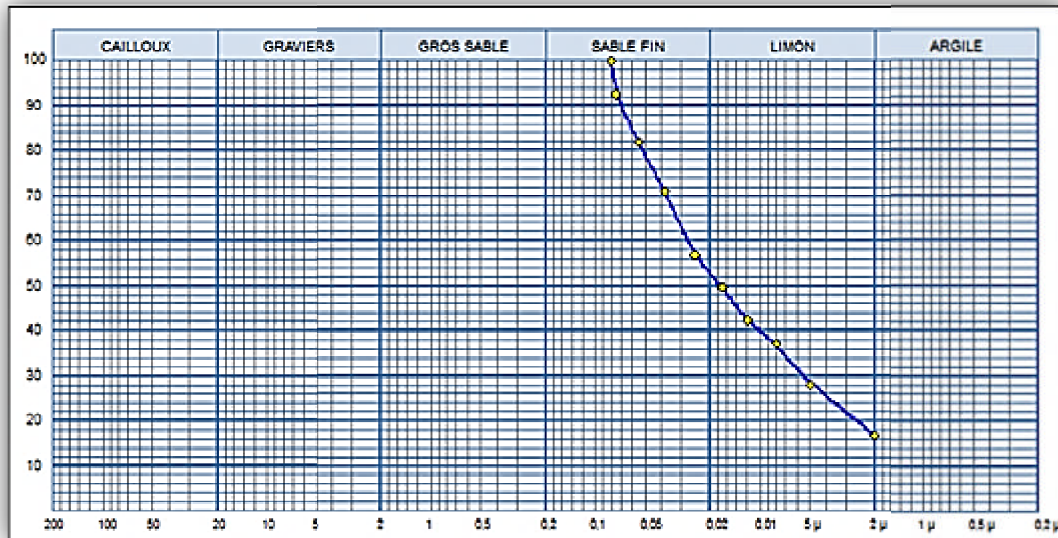
<b>diamètre (µm)</b>	80	75	55	38	25	17	12	8	5	2
<b>% passant</b>	99,21	92,08	84,95	77,81	72,45	70,68	63,55	59,98	52,14	38,21



**Figure IV-14** : Analyse granulométrique par sédimentation site Dely Ibrahim.

**Tableau IV-12** : Résultats des analyses granulométriques par sédimentométrie pour le site Les Chabane

<b>diamètre (µm)</b>	80	75	55	38	25	17	12	8	5	2
<b>% passant</b>	99,83	92,65	81,89	71,12	56,77	49,59	42,42	37,03	28,06	16,79



**Figure IV-15:** Analyse granulométrique par sédimentation site Les Chabane.

#### -Interprétation des résultats :

Les résultats de la sédimentométrie sont exprimés par des courbes semi-logarithmiques donnant le pourcentage des tamisât cumulés en fonction du diamètre des grains.

La granulométrie de ces sols est inférieure à 80 μm, ce qui permet de les classer dans la catégorie des sols fins.

#### IV-2-1-5) Les limites d'ATTERBERG [NF P 94-051] :

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

Ces limites sont :

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

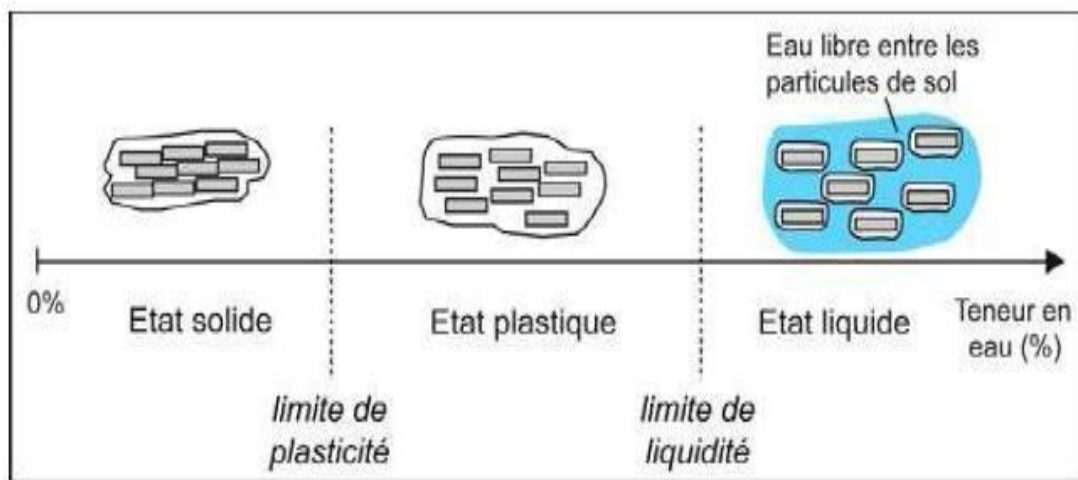
**La limite de plasticité** est la teneur en eau qui sépare l'état plastique de l'état solide. Cette limite est fixée conventionnellement comme la valeur de la teneur en eau, exprimée en pourcentage, pour laquelle un rouleau de sol confectionné manuellement, à dimensions fixées, se fissure.

### a) La procédure de l'essai :

L'essai s'effectue en deux phases :

La recherche de la limite de liquidité à la coupelle de Casagrande ; La recherche de la limite de plasticité au rouleau.

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



**Figure IV-16:** Limites d'Atterberg (SANTAMARINA, 2001).

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

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

Après le contrôle du fonctionnement de l'appareil et de la pointe de l'outil à rainurer qui doit être inférieure à 2,2 mm, tout en réglant la hauteur de chute de la coupelle, on malaxe la totalité du tamisât afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide. Avec une spatule, on étend une masse de pâte sur la coupelle qui doit être propre et sèche. Cette dernière est étalée en plusieurs couches pour éviter d'emprisonner les bulles d'air, présentant à la fin de l'opération un aspect symétrique. Ensuite, on trace une rainure à l'aide de l'outil à rainurer en forme de V, comme est indiqué dans les figures suivantes (Figure IV-18) :



Figure IV-17 : Coupelle de Casagrande.

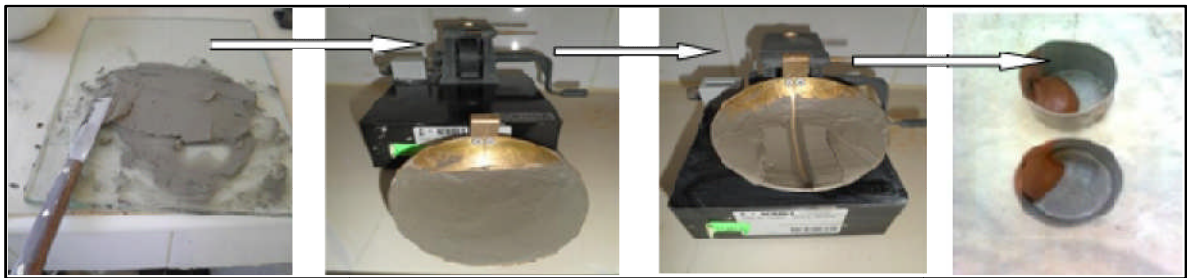


Figure IV-18: Détermination de la limite de liquidité.

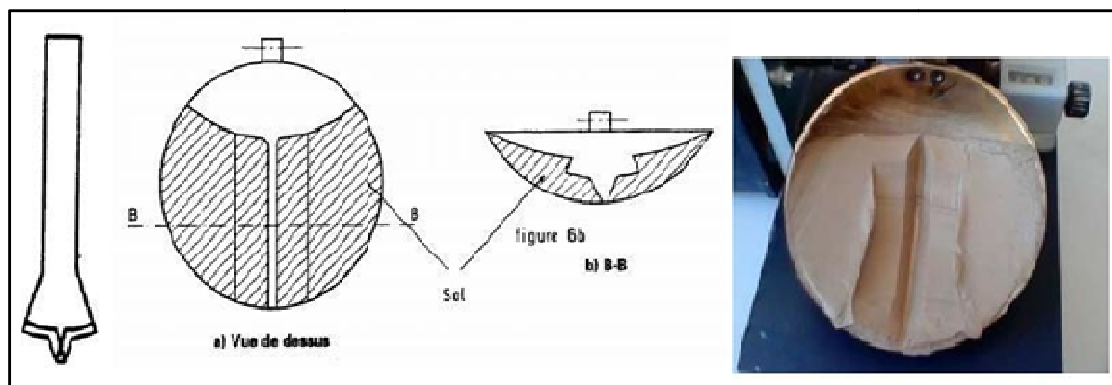


Figure IV-19: La fermeture de la rainure (CHEHEB.F,2016).

On imprime à la coupelle une série de chocs, tout en comptant le nombre qui doit être compris entre 15 et 35, nécessaires pour que les lèvres de la rainure se rejoignent sur une longueur d'environ 1cm (Figure IV-20).

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

#### A-2) La détermination de la limite de plasticité :

La teneur en eau au point de transition entre les états plastique et solide.

C'est la teneur en eau conventionnelle d'un rouleau de sol qui se fissure au moment où son diamètre atteint  $3 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$  de diamètre et une longueur de 10 cm (Figure IV-20). La dimension fixée à une longueur comprise entre 10 et 15 cm et, se fissure.



Figure IV-20 : La limite de plasticité.

### A-3) L'indice de plasticité ( $I_p$ ):

La différence des limites ( $w_l$ ) et ( $w_p$ ). Cet indice définit l'étendue du domaine plastique.

$$I_p = w_L - w_P \quad (\text{IV-7})$$

### b) Résultats des limites d'Atterberg :

#### b-1) La limite de plasticité :

Tableau IV-13 : Limite de plasticité moyenne des marnes étudiées.

Type de l'échantillon	$W_P(\%)$
Boghni	25,92
DEM	25,56
Delly Ibrahim	29,58
Les Chabane	20,41

#### b-2) La limite de liquidité :

Les valeurs trouvées des limites de liquidité des différents échantillons sont inscrites au Tableau IV-14.

Tableau IV-14: Limite de liquidité des échantillons de marnes.

Type de l'échantillon	$W_L(\%)$
Boghni	49
DEM	49,50
Dely Ibrahim	59
Les chabane	45,78

Sur un graphique, on représente les teneurs en eau  $W$  obtenues en ordonnée et le logarithme du nombre de coups  $N$  en abscisse. La relation entre ces paramètres permet de

tracer une droite. La limite de liquidité  $W_L$  est déterminée à partir de cette dernière. Elle correspond à une teneur en eau obtenue pour une valeur N égale à 25 coups. Les résultats sont comme suit :

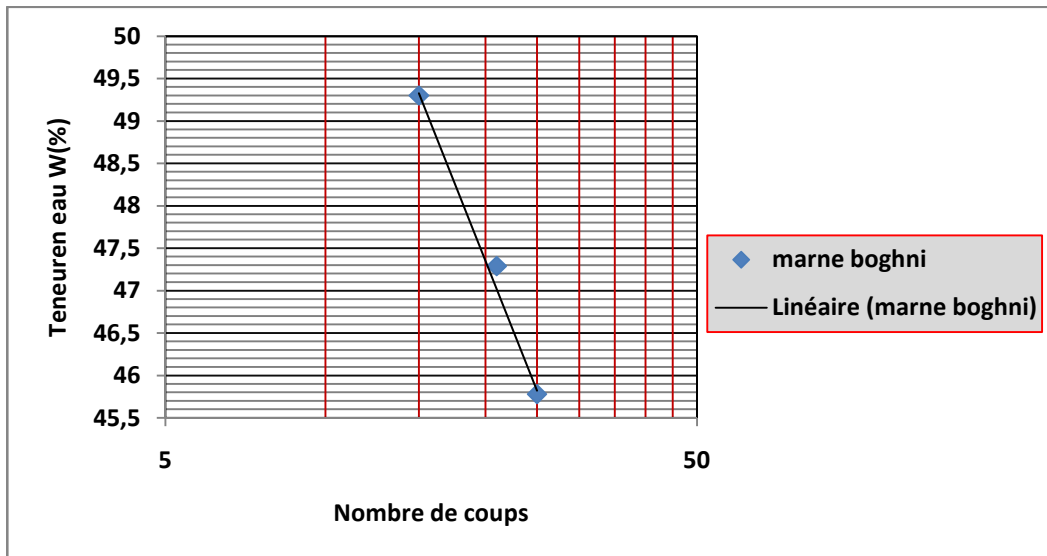


Figure IV-21 : Courbe de limite de liquidité de la marne Boghni.

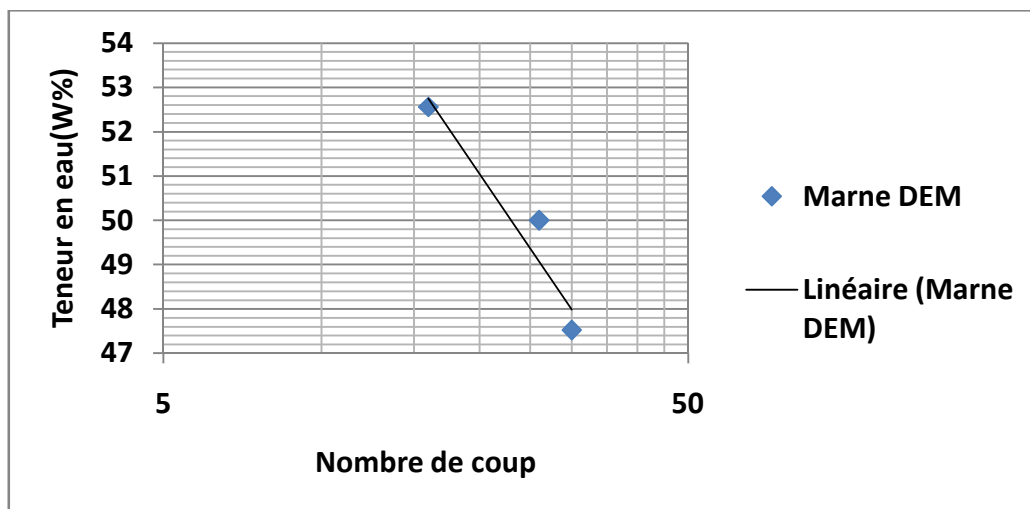


Figure IV-22 : Courbe de limite de liquidité de la marne DEM.

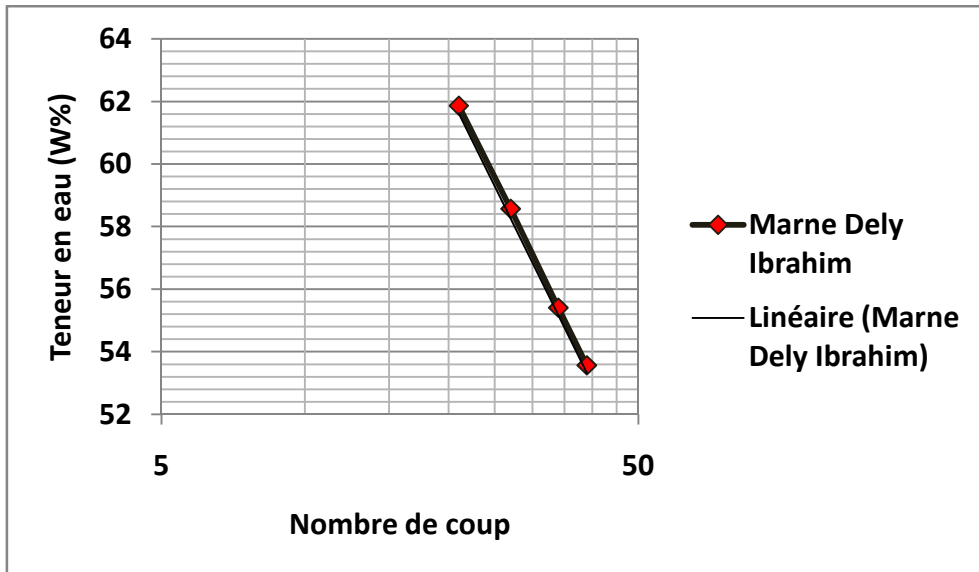


Figure IV-23 : Courbe de limite de liquidité de la marne Dely Ibrahim.

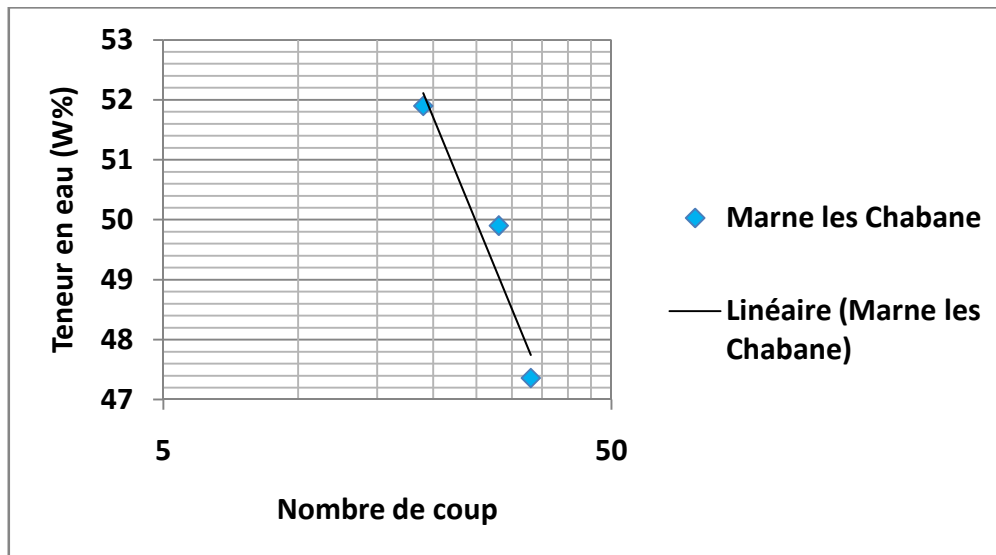


Figure IV-24 : Courbe de limite de liquidité de la marne de Les Chabane.

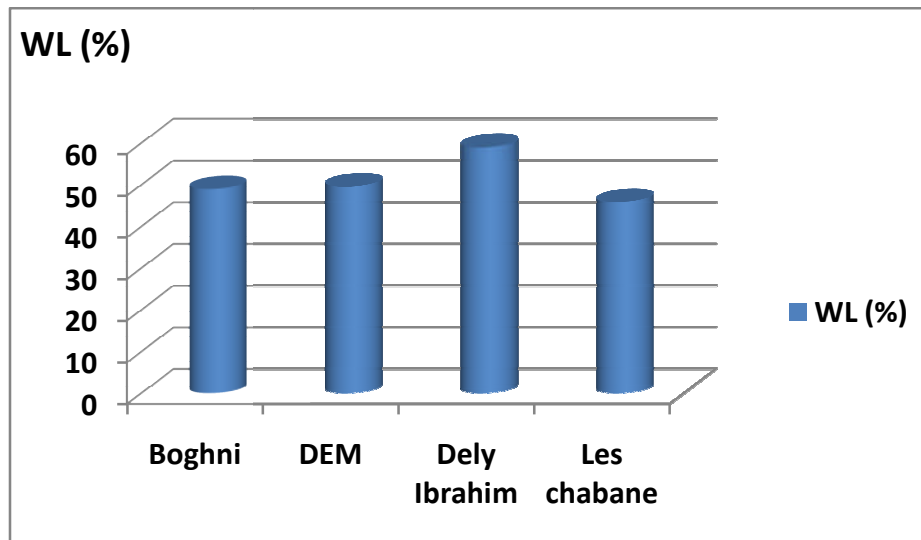


Figure IV-25 : Limites de liquidité moyennes des marnes étudiées.

**b-3) Indice de plasticité :**

**Tableau IV-15:** Classification selon l'indice de plasticité.

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Sol non plastique
$5 < I_p < 30$	Sol peu plastique
$30 < I_p < 50$	Sol plastique
$50 < I_p$	Sol trèsplastique

**Tableau IV-16 :** Indice de plasticité des marnes étudiées.

Type de l'échantillon	Indice de plasticité	Degré de plasticité
Boghni	23,08	Sol peu plastique
DEM	23,94	Sol peu plastique
Delly Ibrahim	29,42	Sol peu plastique
Les chabanes	25,36	Sol peu plastique

**-Interprétation des résultats**

L'indice de plasticité ; déduit après la détermination des limites de liquidité et de plasticité, des marnes étudiées est compris entre 23 et 30, ce qui indique que ces marnes sont peu plastique.

**b-4) L'indice de consistance  $I_c$  :**

De ces valeurs, l'indice de consistance  $I_c$  peut être déterminé, qui permet d'apprécier la consistance des sols plastiques en se référant aux plages de valeurs présentées ci-dessous.

$$I_c = (W_L - W) / I_p \quad (\text{IV-8})$$

**Tableau IV-17:** L'indice de consistance.

<b>I<sub>c</sub></b>	<b>Appréciation</b>
0 -0,25	Pâteux
0,25 -0,50	Mou
0,5 -0,75	Ferme
0,75-1	Midur
>1	Dur

**Tableau IV-18:**Résultats de l'indice de consistance.

<b>sol</b>	<b>I<sub>C</sub></b>	<b>Etat de sol</b>
Boghni	0,978	Mi dur
DEM	1,547	Dur
Dely Ibrahim	1,270	Dur
Les Chabane	1,703	Dur

Pour les résultats de l'indice de consistance **I<sub>c</sub>**, on a conclu que la marne de Boghnia une consistance de sol mi dur par contre les marnes de **DEM** et **Dely Ibrahim** et celle des **Chabane** ont une consistance dur.

#### IV-2-1-6) L'activité A<sub>C</sub> :

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

**L'activité de Skempton :  $A_c = I_p / F_2$ .**

**Tableau IV-19 :** Classes de l'activité A<sub>c</sub>.

<b>Classes d'activité</b>	
<b>Activité A<sub>c</sub></b>	<b>Dénomination</b>
$0 < A_c < 0,5$	inactif
$0,5 < A_c < 0,75$	peu actif
$0,75 < A_c < 1,25$	normal
$1,25 < A_c < 2$	actif
$2 < A_c$	très actif

**Tableau IV-20:** Activité (A<sub>C</sub>) de SKEMPTON pour les deux sols.

Sites	L'activité ( $A_C$ )	Résultats
Boghni	1,142	actif
DEM	1,542	actif
Dely Ibrahim	0,769	moyennement actif (normale)
Les Chabane	1,510	actif

#### IV-2-1-7) Mesure du potentiel de gonflement

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

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

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

#### a) Classifications

##### a-1) Classifications selon un seul paramètre

**Tableau IV-21** : Evaluation du potentiel de gonflement à partir de l'indice de plasticité (MOUROUX.P et al, 1988).

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

**Tableau IV.22** : Résultats du potentiel de gonflement à partir de l'indice de plasticité (MOUROUX.P et al. 1988).

sites	l'indice de plasticité	potentiel de gonflement
Boghni	23,08	Moyen
DEM	23,94	Moyen
Dely Ibrahim	29,42	Moyen
Les Chabanes	25,36	Moyen

## a-2) Combinaison de deux paramètres

**Tableau IV.23 :** Degré d'expansion en fonction de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité (SNETHEN.N et al. 1977).

<b>Ip</b>	<b>WL(%)</b>	<b>Classification</b>
< 25	< 50	Faible
25-35	50-60	Moyen
> 35	> 60	Trèsélevé

**Tableau IV.24 :** Résultats de degré d'expansion en fonction de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité (SNETHEN.N et al.1977).

<b>sites</b>	<b>Ip</b>	<b>WL (%)</b>	<b>Classification</b>
Boghni	23,08	49	Faible
DEM	23,94	49,5	Faible
Dely Ibrahim	29,42	59	Moyen
Les Chabane	25,36	45,78	Moyen

**IV-2-1-8) Mesure du potentiel de retrait :**

Plus généralement, la limite de retrait est fortement liée à la plasticité du sol et croît avec la limite de liquidité bien qu'il semble que l'on ne puisse pas établir de relation directe entre les deux paramètres. En 1980, le « *Building Research Establishment* » anglais a proposé une classification des potentiels de retrait des sols argileux en fonction de leur teneur en argile et de leur indice de plasticité (Tableau IV.25). On peut donc dire que la limite de retrait d'un sol argileux sera liée aux mêmes paramètres que ceux qui définissent son potentiel de gonflement, parmi lesquels on peut citer:

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

**Tableau IV-25 :** Evaluation du potentiel de retrait à partir de l'indice de plasticité.

<b>sites</b>	<b>Ip</b>	<b>F2 &lt; 2 µm (%)</b>	<b>Commentaires</b>
Boghni	23,08	20,40	moyen
DEM	23,94	15,52	moyen
Delly Ibrahim	29,42	38,21	moyen
Les chabanes	25,36	16,79	moyen



**Figure IV-26:** Potentiel de retrait d'après (Building Research Establishment, 1980).

#### IV-2-1-9) Valeur au bleu de méthylène (VBS) (NF P 94 – 068) – Essai à la tâche

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

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

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

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

Si le test est positif, la zone humide est teintée de bleu c'est-à dire on arrête le dosage (figure IV-28). La valeur de bleu de sol est donnée par la relation suivante:

$$\text{VBS} = \text{Mb} / \text{Ms} * 100 \text{ avec } \text{Mb} = \text{V} * 100 \quad (\text{IV-9})$$



**Figure IV-27:** Essai au bleu de méthylène (résultats de l'essai à la tâche).

Avec :

**M<sub>b</sub>** : la masse de bleu permettant la saturation par adsorption (g);

**M<sub>s</sub>** : la masse sèche de la prise d'essai (g) ;

**V** : le volume de solution de bleu utilisée (cm<sup>3</sup>).

**Tableau IV-26:** Désignation du sol en fonction de son VBS.

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

**Tableau IV-27:** Résultats des valeurs au bleu de méthylène.

Sites	VBS	Désignation du sol
Boghni	7,99	sol argileux
DEM	7,5	sol argileux
Dely Ibrahim	6,54	sol argileux
Les Chabane	6,01	sol argileux

**-Interprétation des résultats**

Les valeurs obtenues au bleu de méthylène montrent que tous les sites des marnes étudiés présentent des sols argileux.

**IV-2-2) les caractéristiques chimiques : laboratoire LNHC (BOUIRA).****IV2-2-1) Teneur en carbonate de calcium CaCO<sub>3</sub> (NF P 94 – 048) – Méthode du calcimètre :****1) Principe de l'essai**

L'essai consiste à déterminer le volume de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) 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.



**Figure IV-28:** Appareil de détermination de CaCO<sub>3</sub>.

**2) Mode opératoire**

La détermination de la teneur en CaCO<sub>3</sub> s'effectue au calcimètre Dietrich-Fröling.

- **En première étape:** L'essai consiste à mesurer à l'aide d'une burette à gaz le volume de CO<sub>2</sub> dégagé par la réaction du HCl d'un volume de 10 ml sur le carbonate de calcium de contenu: 1g.
- **En deuxième étape:** soit une prise d'échantillon de masse 1g passant au tamis de 0.2mm diluée dans une solution de CaCO<sub>3</sub>ce qui donnera par la suite un volume de CO<sub>2</sub>. L'acide chlorhydrique dilué décompose le carbonate de calcium selon la réaction :



**Figure IV-29:** Principaux étapes de la méthode de calcimètre.

La teneur en  $\text{CaCO}_3$  d'un sol fin est un bon indice de sa résistance mécanique et de sa sensibilité à l'eau. Suivant la valeur de cette teneur, le comportement du sol évolue depuis celui d'une argile jusqu'à celui d'une roche, la valeur de transition étant aux alentours de 60-70%. En complément de leur classification géotechnique, (MAGNAN, 1997).

**Tableau IV-28:** La description des sols en fonction de leur teneur en  $\text{CaCO}_3$ .

Teneur en $\text{CaCO}_3$ (%)	Désignation du sol
0-10	Argile
10-30	Argile marneuse
30-70	Marne
70-90	Calcaire marneux
90-100	Calcaire

**Tableau IV-29:** Résultats de la teneur en carbonate de calcium.

Sites	$\text{CaCO}_3$ (%)	Désignation du sol
Boghni	10,10	Argile marneuse
DEM	25	Argile marneuse
Dely Ibrahim	29,68	Argile marneuse
Les Chabanes	40,62	Marne

#### IV-2-2-2) Teneur en matières organiques-(NF P 94-047) - Méthode par calcination :

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

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



**Figure IV-30:** Détermination de la teneur pondérale en matières organiques.

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

**TableauIV-30:**Descriptiondessolsenfonctiondeleurteneurenmatièresorganiques.

Teneurenmatièreorganique (%)	Désignationgéotechnique		
0-3	Solinorganique		
3-10	Solfaiblementorganique	fO	Vase
10-30	Solmoyennementorganique	mO	Soltourbeux
>30	Soltrèsorganique	tO	Tourbe

**TableauIV-31:** Résultatsdesmatièresorganiques.

Sites	Matièresorganiques MO(%)	Désignationgéotechnique
Boghni	0,97	sol inorganique
DEM	5,01	Sol faiblementorganique
Dely Ibrahim	1,93	sol inorganique
Les Chabane	1,3	Solinorganique

### -Interprétation des résultats

La teneur en matières organiques est comprise entre 0,97 et 5,01% (Tableau IV-31). En se basant sur la classification présentée sur le Tableau IV-30, les sols étudiés sont des sols inorganiques sauf celui de DEM qui est un sol faiblement organique. La présence de matière organique peut être nuisible au sol des fondations des ouvrages.

### IV2-2-3) Sulfates solubles dans l'acide -selon la norme NF EN 1744-1(P 18-660-1) :

#### a)Principe

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.

#### b-Préparation de la prise d'essai

Concasser et réduire le sous-échantillon par étapes. Broyer ensuite continuer à réduire jusqu'à obtenir une masse d'environ 20 g passant au tamis étalon de 0,125 mm. Prendre environ 2 g de cette matière comme prise d'essai. Si un séchage est nécessaire en cours de

préparation, la température ne devra pas dépasser  $(110 \pm 5)$  °C pour éviter l'oxydation des sulfures.



**Figure IV-31** : Détermination des sulfates solubles dans l'acide.

**Tableau IV-32:** Définition des classes d'agressivité des sols en fonction de la teneur en sulfates  $SO_4$

Teneur en sulfates $SO_4$ (%) dans lesolsec	Degréd'agressivité	symbole	Niveaudeprotection
0,24-0,6	Faiblementagressif	A1	1
0,6-1,2	Moyennementagressif	A2	2
1,2-2,4	Fortementagressif	A3	2
>2,4	Trèsfortementagressif	A4	3

**Tableau IV-33:** Lesrésultatsd'agressivitédessolsenfonction(%)de $SO_4$

Sites	Teneur en Sulfates $SO_4$ (%)	Degréd'agressivité	Symbole	Niveaude protection
Boghni	traces	/	/	/
DEM	traces	/	/	/
Dely Ibrahim	traces	/	/	/
LesChabene	1,8	Fortementagressif	A3	2

#### -Interprétation des résultats

La teneur en  $SO_4$  pour les sites Boghni, DEM, Dely Ibrahim présententdes teneurs faibles. Tandis que la marne Les Chabane, présente une teneur fortement agressive.

#### IV-3-2-4) 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.



**Figure IV-32:** Détermination des chlorures solubles dans l'eau.

**Tableau IV-34:** Les résultats des chlorures.

Sites	Chlorures $Cl^-$
Boghni	traces
DEM	traces
Dely Ibrahim	traces
Les Chabane	traces

#### -Interprétation des résultats

Sur les sites étudiés les résultats obtenus montrent qu'il y a une faible teneur en chlorures (traces).

**Tableau IV-35 :** Résultats finales pour les caractéristiques physiques et chimiques.

Sites	Boghni	DEM	D-Ibrahim	Les Chabane
<b>W(%)</b>	26,42	12,46	21,62	2,58
<b>W<sub>1</sub>(%)</b>	49	49,50	59	45,78
<b>W<sub>p</sub>(%)</b>	25,92	25,56	29,58	20,41
<b>Ip(%)</b>	23,08	23,94	29,42	25,36

<b>Ic(%)</b>	0,978	1,547	1,270	1,703
<b><math>\rho_s</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,78	2,61	2,73	2,29
<b><math>\rho_h</math>(g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,98	2,03	2,03	2,01
<b><math>\rho_d</math>(g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,57	1,81	1,67	1,96
<b>e</b>	0,7707	0,4419	0,6347	0,1683
<b>Sr(%)</b>	95,29	73,59	92,99	35,10
<b>F&lt; 2<math>\mu</math>m (%)</b>	20,40	15,52	38,21	16,79
<b>VBS</b>	7,99	7,5	6,54	6,01
<b>CaCO<sub>3</sub>(%)</b>	10,10	25	29,68	40,62
<b>MO(%)</b>	0,97	5,01	1,93	1,3
<b>SO<sub>4</sub><sup>-</sup> (%)</b>	traces	traces	traces	1,8
<b>Cl<sup>-</sup> (%)</b>	trace	trace	trace	trace

### Conclusion

Les résultats des essais d'identification réalisés au laboratoire pour les échantillons étudiés, nous ont permis d'avoir une idée sur leurs natures physiques et chimiques et montrent que toutes les marnes étudiées contiennent presque les mêmes pourcentages des ions en  $cl^-$ ,  $so_4^-$ , MO. Ceci confirme selon la norme **FDP 18-011 DU 12/09** que l'agressivité est nulle pour les sites étudiés sauf pour les Chaban il est souhaitable d'utiliser le ciment CRS pour la construction des fondation des ouvrages.

Dans ce qui suit, nous allons entamer l'étude de leur comportement aux effets climatiques par les essais de gel-dégel, de dégradabilité et de canicules.

## **Chapitre V :**

**Etude des effets climatiques au laboratoire**

## INTRODUCTION

Une bonne reconnaissance du sol nécessite une campagne suffisante composée d'essais in-situ et de laboratoire. Dans les conditions d'exploitation, les matériaux granulaires se dégradent sous l'effet de différents processus d'altération. Dans ce chapitre on s'intéresse aux effets climatiques et à leur influence sur le comportement du sol étudié.

Pour cela on tient à représenter l'effet des changements climatiques sur les sols dans la nature par les trois essais suivants :

- Gel/dégel
- Dégradabilité
- Canicules

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

### V-1) Préparation des échantillons :

Les échantillons sont prélevés des sites différents par le laboratoire LNHC (Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction) comme :

- Sol de Boghni.
- Sol de Draa El Mizan.
- Sol de Dely Ibrahim.

Et le 4<sup>eme</sup> sol a été prélevé à Tizi-Ouzou au boulevard « Les Chabane », qui a été compacté au laboratoire pédagogique MDS.

### V-2) Compactage du sol prélevé au site Les Chabane :

Le compactage des sols est l'ensemble des opérations mécaniques qui conduisent à augmenter le poids volumique sec ( $\rho_d$ ) du sol traité, ce qui conduit à réduire son volume apparent ( $V_t$ ).

En générale, après le compactage, le sol acquière :

- Une augmentation de la densité sèche ;
- Une augmentation de la capacité portante ;
- Une augmentation de la résistance au cisaillement ;
- Une diminution de la perméabilité ;
- Une diminution de la compressibilité.

Cependant, la portance dépend de la nature du sol, de son pourcentage d'eau et du degré de compactage. Quel que soit le sol, sa résistance mécanique augmente avec sa densité en faisant passer plusieurs fois des engins lourds qui assurent le compactage (Figure V-1).

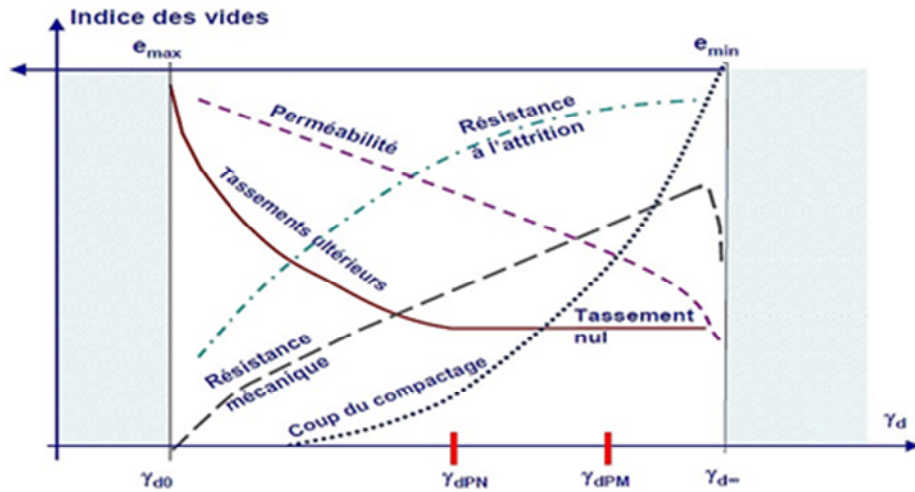


Figure V-1: Objectifs du compactage.

### V-2-1) Les principes de base du compactage

Le compactage consiste à appliquer suffisamment d'énergie au sol pour y réduire l'indice des vides et ainsi en accroître la compacité. La masse volumique sèche ( $\rho_d$ ) d'un sol compacté sera donc supérieure à celle d'un sol non compacté. C'est d'ailleurs cette caractéristique qui permet de vérifier l'efficacité du compactage.

### V-2-2) Essai Proctor

#### 1-But de l'essai

L'essai Proctor a pour but de déterminer la teneur en eau optimale pour un sol de remblai donné et des conditions de compactage fixées, qui conduit au meilleur compactage possible ou encore capacité portante maximale, (BOUDLAL, 2007).

#### 2-Principe de l'essai

L'essai Proctor consiste à prélever des échantillons de sol qu'on fait passer à l'étuve pendant 24h à une température  $105^{\circ}\text{C}$  par suite on prépare généralement six quantités de sol de masses équivalentes de ces échantillons auxquelles on ajoutera un certain pourcentage d'eau qui varie progressivement d'un même intervalle pour chaque couche à compacter.

Puis procéder au compactage par couche successive dans un moule Proctor avec une méthodologie précise. L'aboutissement de cet essai permet d'obtenir une teneur en eau optimale ( $W_{opt}$ ) qui correspond à une densité maximale ( $\rho_d$ ).

#### 3- Matériel utilisé



**Figure V-2 :** Matériel de confection des éprouvettes d'essai Proctor normal.

- Moule Proctor ;
- Dame Proctor ;
- Règle à raser ;
- Balance ;
- Etuve ;
- Eau et éprouvette graduée.



**Figure V-3 :** Etape de démoulage du moule Proctor.

<b>Tableau V-1: Résultats de l'essai Proctor site les Chabannes</b>			
N° de l'essai	1	2	3
% d'eauajouté	10%	14%	18%
teneuren eau %	8,87	12,51	15,85
densitésèche (g/cm <sup>3</sup> )	1,756	1,965	1,841

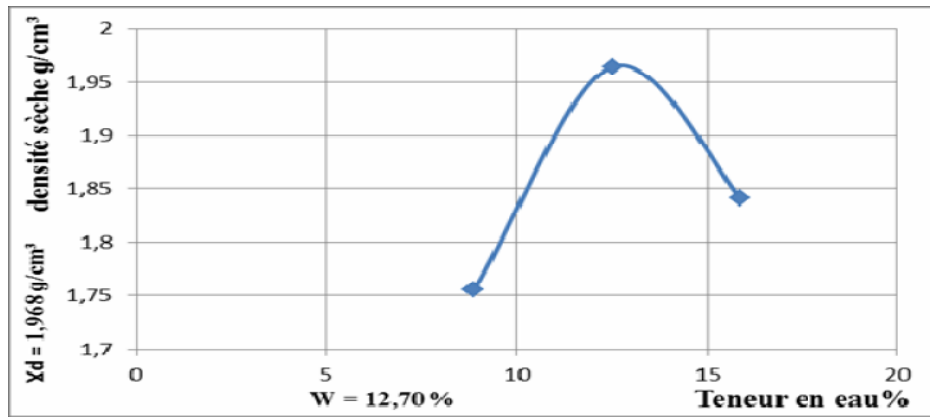


Figure V-4 : Courbe expérimentale d'essai Proctor pour le site Les Chabane.

### V-2-3) Échantillonnage

- On ramène les échantillons et on les coupe à des tronçons de dimensions supérieures à celle de l'anneau de la boîte circulaire de l'essai du cisaillement direct (Figure V.5).
- On place l'anneau sur le tronçon et on presse manuellement au avec un presseur hydraulique.
- Les échantillons sont taillés jusqu'à obtenir une surface lisse avec un diamètre de 63 mm et une hauteur de 25,4 mm (les mêmes dimensions de l'anneau).
- À la fin un presseur hydraulique est utilisé pour faire sortir l'échantillon de l'anneau.



Figure V-5 : Préparation des échantillons.

### V-2) Les essais réalisés :

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

#### V-2-1) Essai Gel-Dégel :

##### V-2-1-1) Principe d'essai :

Après avoir imbibé les échantillons à la pression atmosphérique, ils sont soumis à 10 cycles de gel-dégel. Chaque cycle comporte un refroidissement à  $-17,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  et un dégel à

une température de 20 °C. On étudie les sols après chaque cycle et on calcule le changement de leur dimension fractale.

**Remarque :**

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

**V-2-1-2) Appareillage :**

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

- étuve ventilée (105 ±5) °C ;
- tares, les barques ;
- enceinte climatique ;
- balance de précision à ±0,1gr ;
- eau distillée.



**Figure V-6:** Enceinte climatique.

**V-2-1-3) Déroulement d'essai :**

Après avoir préparé les échantillons, il y a une procédure à suivre avant de poser les échantillons dans l'enceinte climatique (suivant la norme **EN 1367\_1 de Gel-Dégel**) :

- Sécher les échantillons à l'étuve pendant 24h.

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

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

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

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

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

#### V-2-1-4) Images des échantillons :

##### 1-site Boghni



Figure V-7 : Marnede Boghni à l'état naturel.

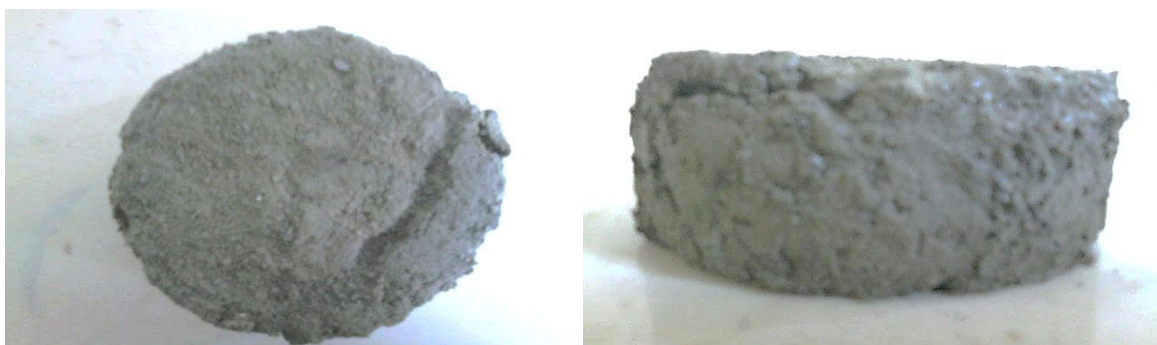


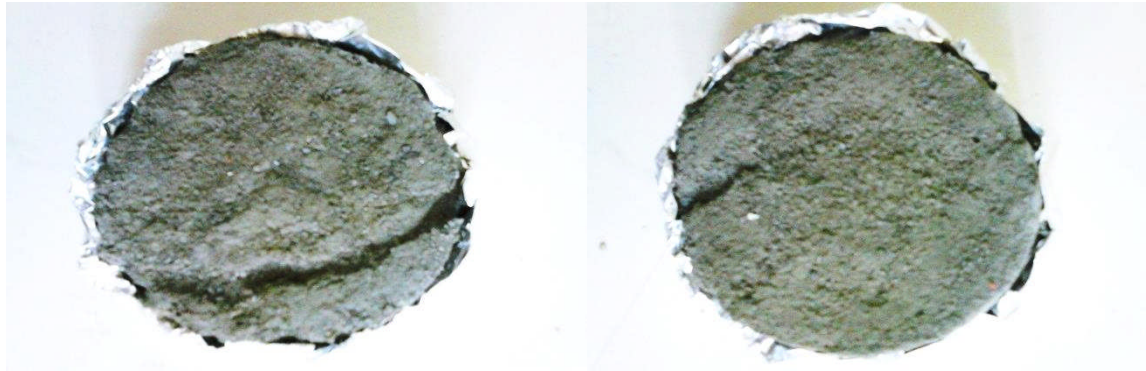
Figure V-8 : Echantillon 1 après l'étuve.



**Figure V-9 :** Echantillon 2 après l'étuve.



**Figure V-10 :** Echantillon témoin après 5 cycles de Gel-Dégel.



**Figure V-11 :** Echantillon 1-2 après 5 cycles de Gel-Dégel.



**Figure V-12 :** Echantillon témoin après 10 cycles de Gel-Dégel.



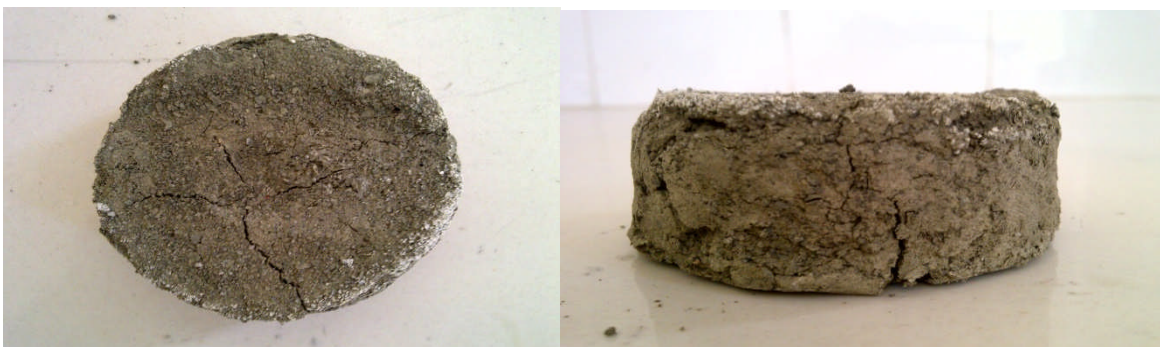
**Figure V-13 :** Echantillon 1 après 10 cycles de Gel-Dégel.



**Figure V-14 :** Echantillon 2 après 10 cycles de Gel-Dégel.



**Figure V-15 :** Echantillon témoin à 48h après l'essai.



**Figure V-16 :** Echantillon 1 à 48h après l'essai.

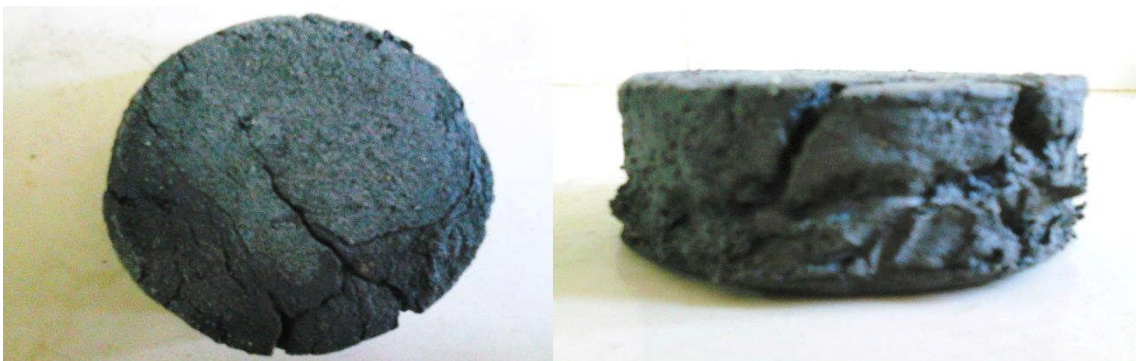


**Figure V-17 :** Echantillon 2 à 48h après l'essai.

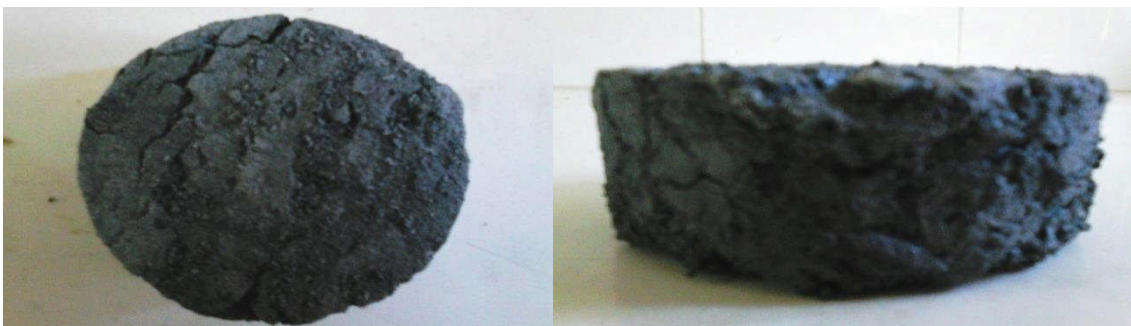
**2-Site Draa-El-Mizan (DEM)**



**Figure V-18 :** Marne DEM à l'état naturel.



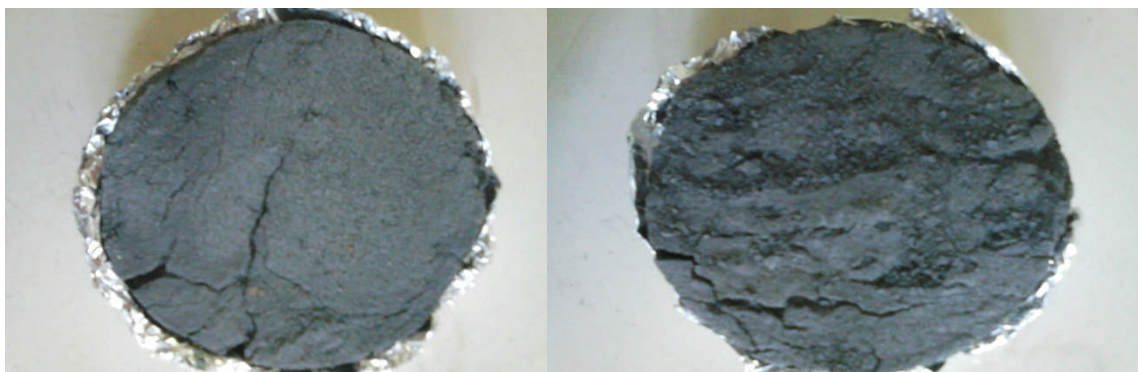
**Figure V-19 :** Echantillon 1 après l'étuve.



**Figure V-20:** Echantillon 2 après l'étuve.



**Figure V-21 :** Echantillon témoin après 5 cycles de Gel-Dégel.



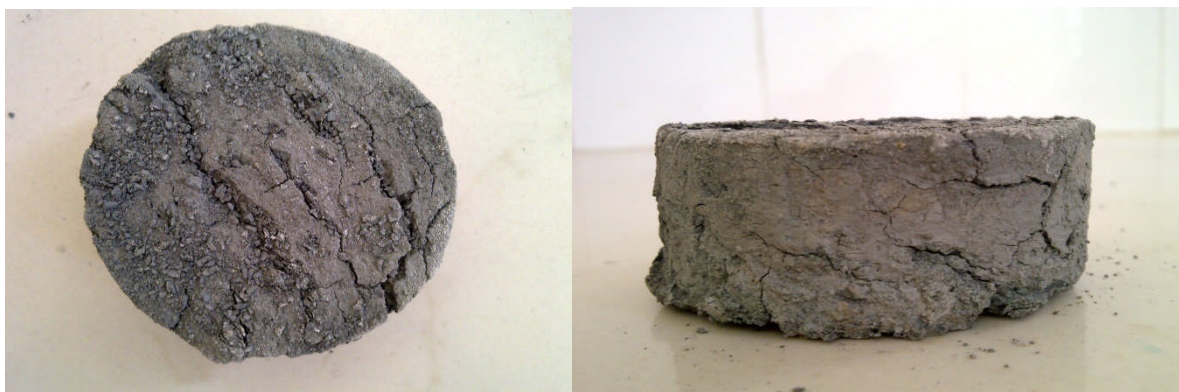
**Figure V-22 :** Echantillon 1-2 après 5 cycles de Gel-Dégel.



**Figure V-23 :** Echantillon témoin après 10 cycles de Gel-Dégel.



**Figure V-24:** Echantillon 1 après 10 cycles de Gel-Dégel.



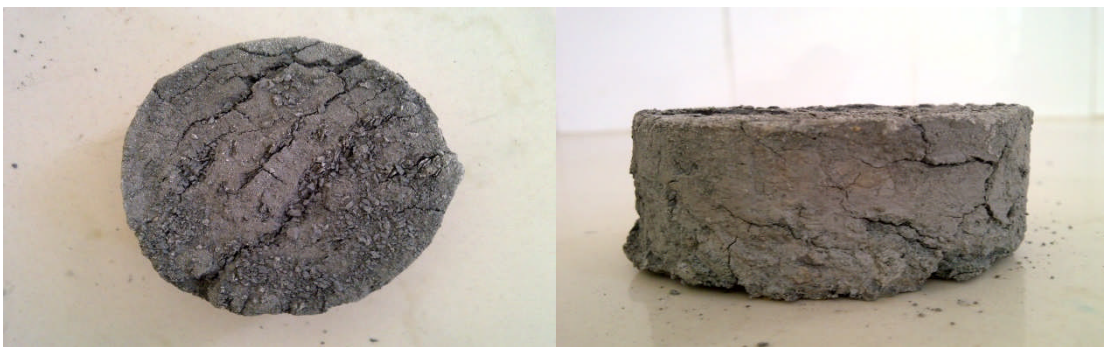
**Figure V-25 :** Echantillon 2 après 10 cycles de Gel-Dégel.



**Figure V-26 :** Echantillon témoin à 48h après l'essai.



**Figure V-27:** Echantillon 1 à 48h après l'essai.



**Figure V-28 :** Echantillon 2 à 48h après l'essai.

**3-Site Dely Ibrahim :**



**Figure V-29 :** Marne Dely Ibrahim à l'état naturel.



**Figure V-30:** Echantillon 1 après l'étuve.



**Figure V-31:** Echantillon 2 après l'étuve.



**Figure V-32 :** Echantillon témoin après 5 cycles de Gel-Dégel.



**Figure V-33 :** Echantillon 1-2 après 5 cycles de Gel-Dégel.



**Figure V-34 :** Echantillon témoin après 10 cycles de Gel-Dégel.



**Figure V-35 :** Echantillon 1 après 10 cycles de Gel-Dégel.



**Figure V-36 :** Echantillon 2 après 10 cycles de Gel-Dégel.



**Figure V-37 :** Echantillon témoin à 48h après l'essai.



**Figure V-38 :** Echantillon 1 à 48h après l'essai.



**Figure V-39 :** Echantillon 2 à 48h après l'essai.

**4-Site les Chabane:**



**Figure V-40 :** Marne Les Chabane à l'état naturel.



**Figure V-41:** Echantillon 1 après l'étuve.



**Figure V-42:** Echantillon 2 après l'étuve.



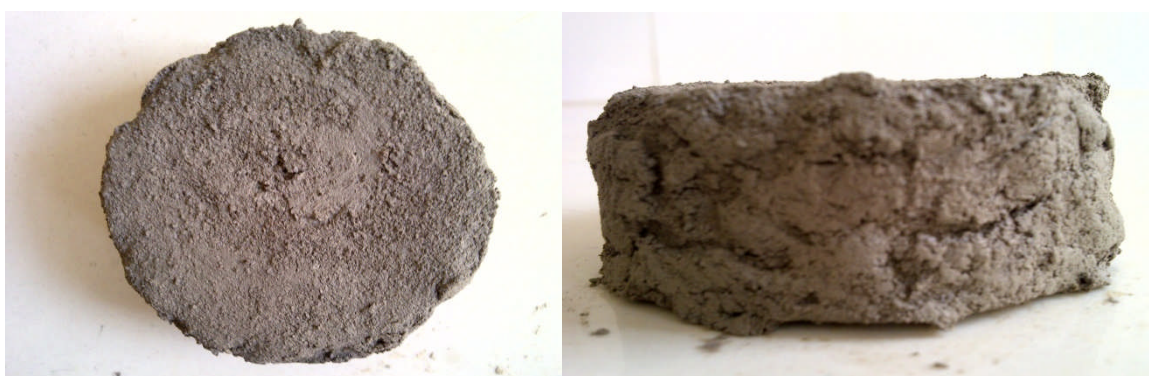
**Figure V-43 :** Echantillon témoin après 5 cycles de Gel-Dégel.



**Figure V-44 :** Echantillon 1-2 après 5 cycles de Gel-Dégel.



**Figure V-45 :** Echantillon témoin après 10 cycles de Gel-Dégel.



**Figure V-46 :** Echantillon 1 après 10 cycles de Gel-Dégel.



**Figure V-47 :** Echantillon 2 après 10 cycles de Gel-Dégel.



**Figure V-48** : Echantillon témoin à 48h après l'essai.



**Figure V-49** : Echantillon 1 à 48h après l'essai.



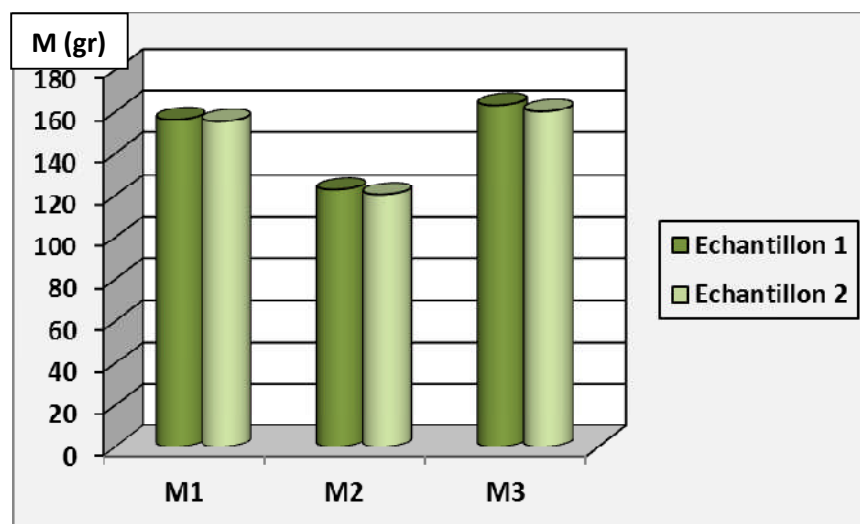
**Figure V-50** : Echantillon 2 à 48h après l'essai.

**V-2-1-5) Les résultats obtenus :**

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

**Tableau V-2:** Les masses des échantillons du site de Boghni durent l'essai de Gel-Dégel.

Site de Boghni	Masse avant l'essai	Masse après l'étuve	Fin de l'essai
<b>Echantillon 1</b>	156,250	122,704	163,039
<b>Echantillon 2</b>	155,451	120,407	160,100

**Figure V-51 :** Variation de la masse de la marne de Boghni au cours d'essai Gel-Dégel.**Tableau V-3 :** Les masses des échantillons du site DEM durent l'essai de Gel-Dégel.

Site de DEM	Masse avant l'essai	Masse après l'étuve	Fin de l'essai
<b>Echantillon 1</b>	174,121	150,859	180,421
<b>Echantillon 2</b>	179,613	158,147	183,107

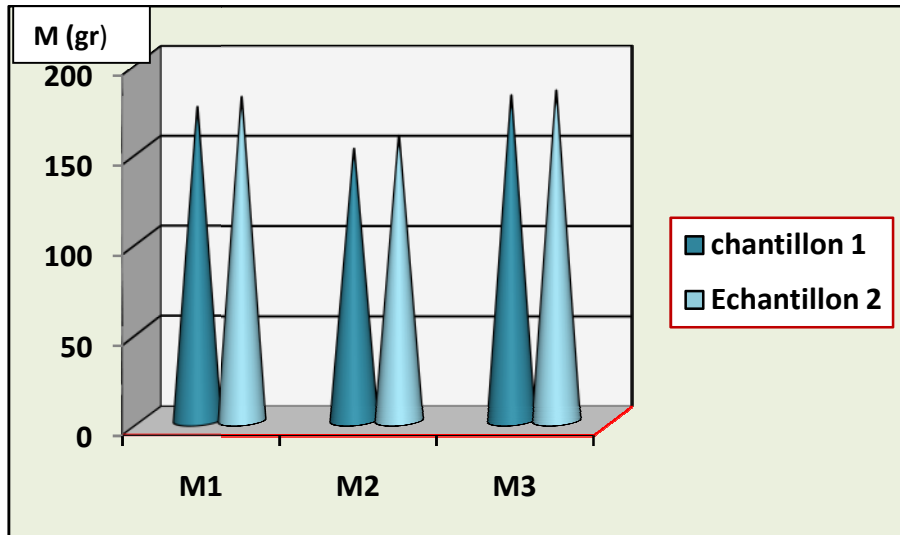


Figure V-52 : Variation de la masse de la marne de DEM au cours d'essai Gel-Dégel.

Tableau V-4 : Les masses des échantillons du site Dely Ibrahim durant l'essai de Gel-Dégel.

Site Dely Ibrahim	Masse avant l'essai	Masse après l'étuve	Fin de l'essai
<b>Echantillon 1</b>	159,145	128,295	160,120
<b>Echantillon 2</b>	158,520	122,204	159,657

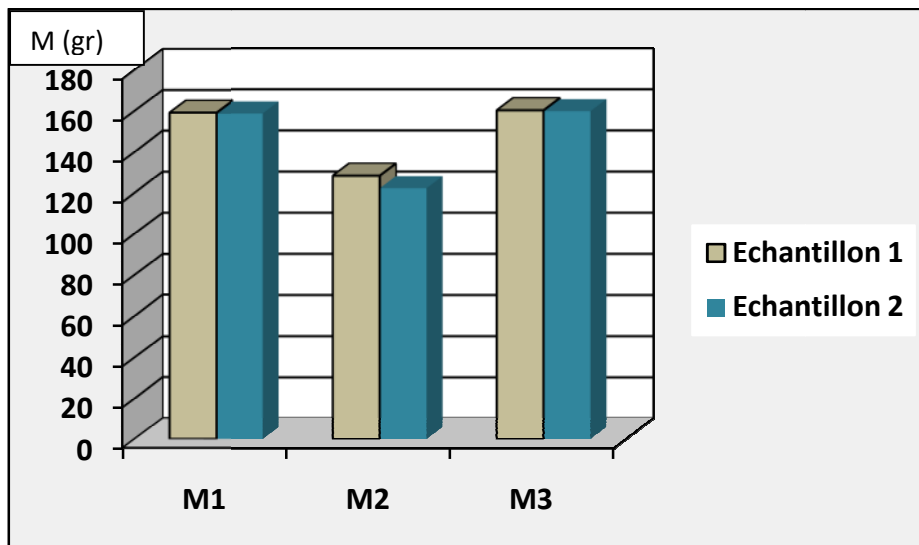
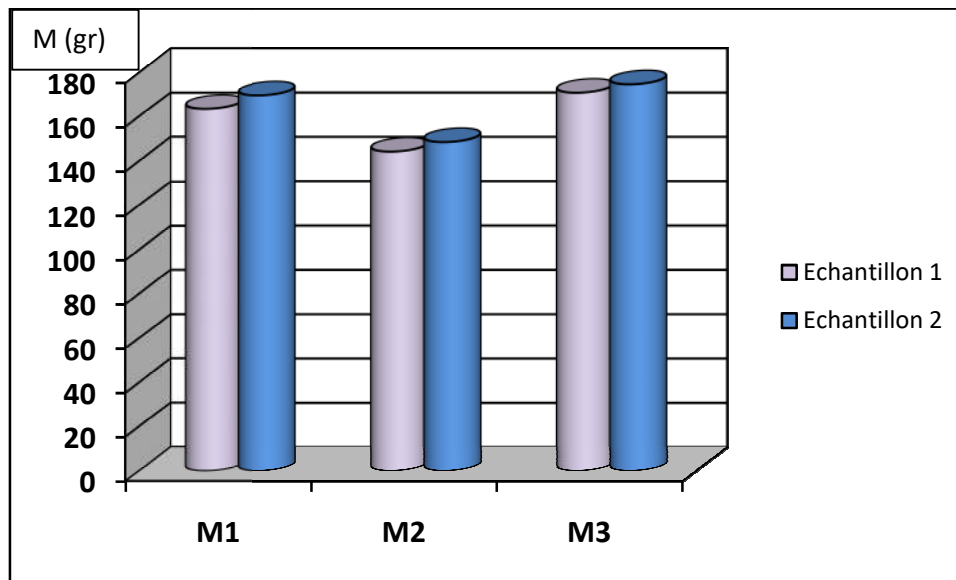


Figure V-53 : Variation de la masse de la marne de Dely Ibrahim au cours d'essai Gel-Dégel.

**Tableau V-5 :** Les masses des échantillons du site Les Chabane durant l'essai de Gel-Dégel.

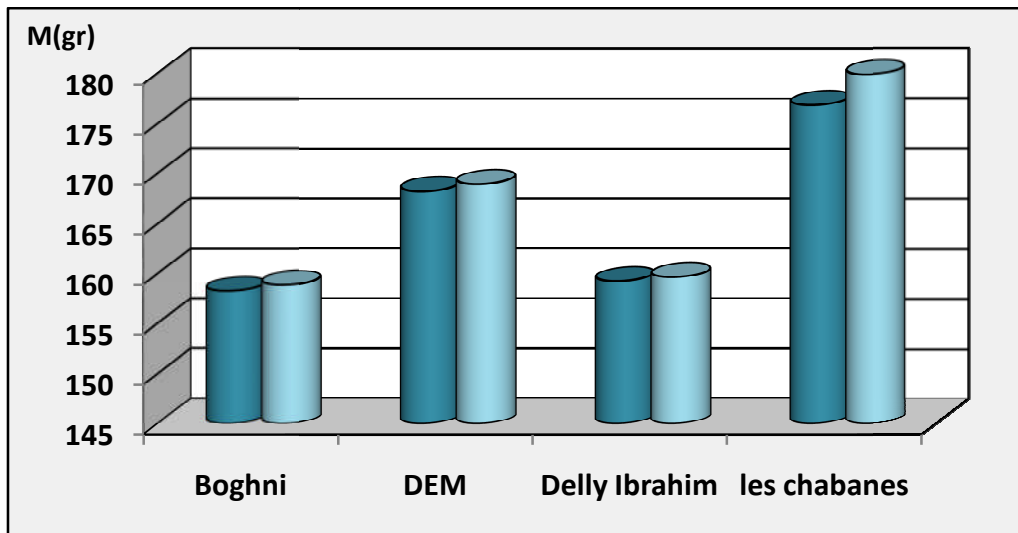
Site Les Chabane	Masse avant l'essai	Masse après l'étuve	Fin de l'essai
<b>Echantillon 1</b>	163,438	144,169	170,727
<b>Echantillon 2</b>	169,529	148,462	174,521



**Figure V-54 :** Variation des masses de la marne Les Chabane au cours d'essai Gel-Dégel.

**Tableau V-6 :** Variation de la masse des échantillons témoins pendant l'essai d'enceinte climatique.

Solstémoins	Boghni	DEM	Dely Ibrahim	Les Chabane
<b>Avant l'essai</b>	158,247	168,231	159,245	176,817
<b>Fin de l'essai</b>	158,849	168,933	159,648	179,912



**Figure V-55:** Variation de la masse des échantillons témoins au cours d'essai Gel-Dégel.

#### V-2-1-6) Interprétation des résultats

L'évolution de la structure et la texture des échantillons 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 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.

Les échantillons passés directement à l'enceinte climatique, à l'état naturel ont eu une augmentation de masse, parce que l'essai est terminé avec des conditions très humides, c'est pour ça les échantillons à la fin de l'essai sont très humides mais sans apparition de déformations verticales et horizontales.

Aussi Les résultats de cet essai sont caractérisés par le rétrécissement volumique des échantillons après séchage. La marne de Boghni a subi un retrait de volume, qui s'est manifesté plus dans le sens verticale; avec une apparitions des fissures. Pour les marnes de DEM et Dely Ibrahim ; on remarque que les échantillons ont subi un certain retrait-gonflement, qui s'est manifesté dans le sens verticale et horizontal des réarrangements se sont produits à la phase de gonflement, et l'augmentation de la perméabilité, ou cour de cycle du gel la température a baissé jusqu'à  $-2.5^{\circ}\text{C}$  ; l'eau est gelée dans les pores et lors du séchage de large fissures sont apparus alors les échantillons ont subi des déformations dans les deux sens verticaux et horizontaux. Par contre celle de Les Chabane n'a pas subi de déformations ni dans le sens vertical ni dans le sens horizontal mis à part le retrait de volume qui n'est pas important. On peut dire que la composition minéralogique des sols a joué un rôle important dans les résultats de cet essai. Sachant que les illites ont une propriété de gonflement moyenne, et la présence de la moscovite a une forte sensibilité à l'eau.

**V-2-2) Essai de Dégradabilité :****V-2-2-1) But de l'essai :**

L'essai de Dégradabilité permet d'apprécier les potentialités d'un matériau à évoluer après sa mise en œuvre sous l'action des cycles immersion-séchage (cycles climatiques).

Le matériau est ensuite soumis à quatre cycles d'immersion-séchage, en débutant par le séchage puis l'immersion comme suit :

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

**V-2-2-2) Appareillage :**

Les éléments constituant l'appareillage sont :

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

**V-2-2-3) Le déroulement de l'essai :**

Les échantillons sont placés dans des bacs dans l'étuve et sont mis aux conditions normalisées (**suivant la norme P94-067**), après leurs préparations. Le 1<sup>er</sup> cycle débute par une mise en immersion et le 4<sup>ème</sup> 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 V-56:** Saturation des échantillons à l'aide d'une seringue.

**V-2-2-4) Les images retenues des échantillons :**

**1-Site Boghni**



**Figure V-57 :** Marne de Boghni à l'état naturel.



**Figure V-58 :** Marne de Boghni après le 1<sup>er</sup> cycle.



**Figure V-59 :** Marne de Boghni après le 2<sup>ème</sup> cycle.



**Figure V-60 :** Marne de Boghni après le 3<sup>ème</sup> cycle.



**Figure V-61:** Marne de Boghni après le 4<sup>ème</sup> cycle.

## 2-Site Draa El Mizan



**Figure V-62:** Marne de DEM à l'état naturel.



**Figure V-63 :** Marne de DEM après le 1er cycle.



**Figure V-64** : Marne de DEM après le 2<sup>ème</sup> cycle.



**Figure V-65** : Marne de DEM après le 3<sup>ème</sup> cycle.

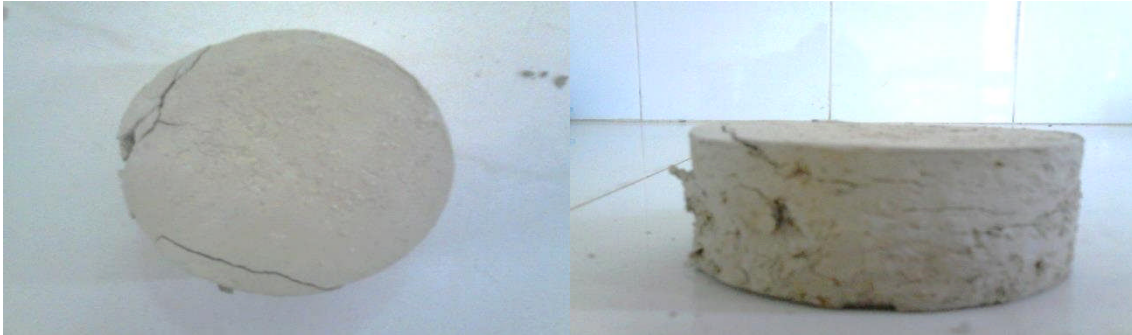


**Figure V-66** : Marne de DEM après le 4<sup>ème</sup> cycle.

### 3-Site Dely Ibrahim



**Figure V-67** : Marne de Dely Ibrahim à l'état naturel.



**Figure V-68** : Marne de Dely Ibrahim après le 1<sup>er</sup> cycle.



**Figure V-69** : Marne de Dely Ibrahim après le 2<sup>ème</sup> cycle.



**Figure V-70** : Marne de Dely Ibrahim après le 3<sup>ème</sup> cycle.



**Figure V-71** : Marne de Dely Ibrahim après le 4<sup>ème</sup> cycle.

**4-Site Les Chabane**



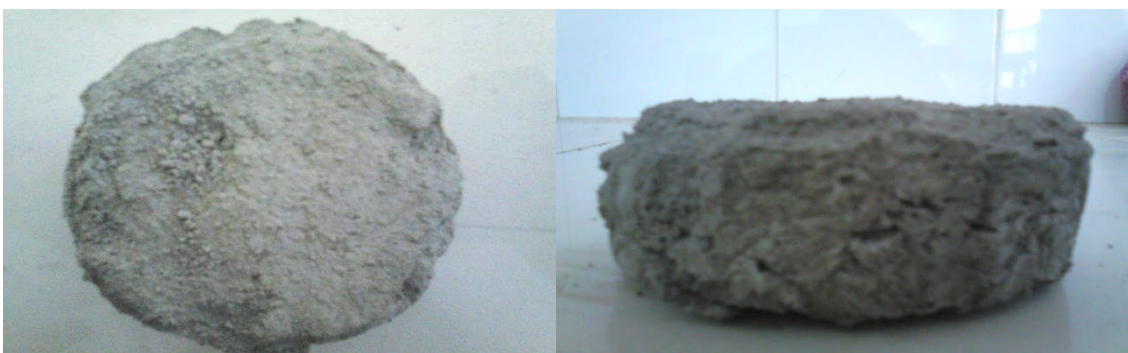
**Figure V-72 :**Marne Les Chabane à l'état naturel.



**Figure V-73 :** Marne Les Chabanes après le 1<sup>er</sup> cycle.



**Figure V-74 :** Marne Les Chabanes après le 2<sup>ème</sup> cycle.



**Figure V-75 :** Marne Les Chabane après le 3eme cycle.



**Figure V-76 :** Marne Les Chabane après le 4<sup>ème</sup> cycle.

**•Interprétation des résultats :**

L'étude est réalisée sur des échantillons de marne intacte prélevée dans des sites différents. Ces échantillons sont taillés de façon à avoir un diamètre de 63 mm et une hauteur de 25,4mm. 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 et à l'intérieur des échantillons.

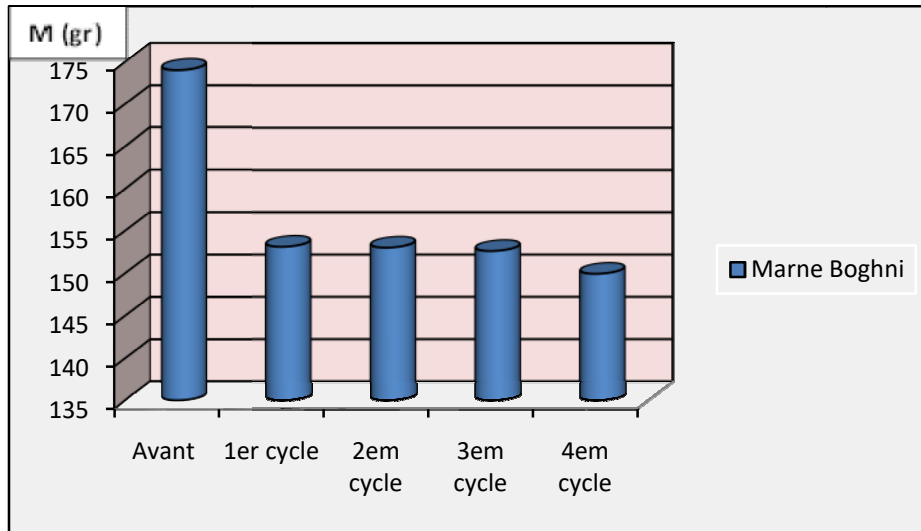
Et on remarque que l'échantillon de Boghni s'éclate à partir de la phase d'humidification du 2ème cycle, on peut dire que ce phénomène a été engendré lorsque les minéraux se transforme et déclenche le phénomène de retrait-gonflement (généralement la montmorillonite et les illites qui ont des potentiels élevés pour le gonflement).Donc on peut dire que la marne de Boghni se comporte comme des argiles gonflantes.

**V-2-2-5) Les résultats obtenus :**

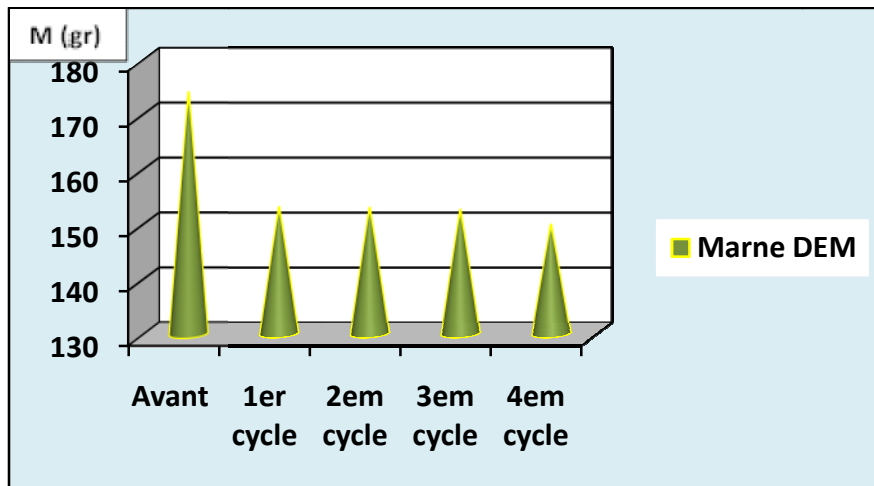
Les résultats relevés avant l'essai (à l'état naturel) et après chaque cycle de mouillage-séchage, sont présentés ci-dessous.

**Tableau V-7 :** Variation de la masse de la marne au cours de l'essai.

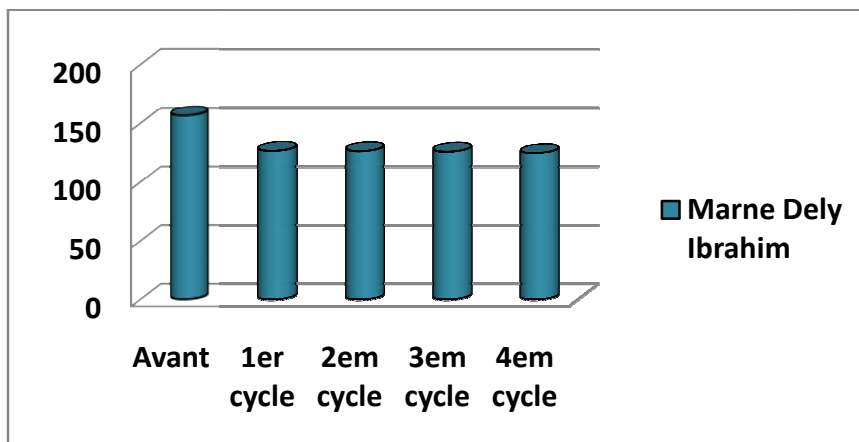
Sites	Boghni	DEM	Dely Ibrahim	Les Chabane
<b>Avant l'essai</b>	156,350	168,131	156,849	174,022
<b>Après 1<sup>er</sup> cycle</b>	127,895	148,363	126,697	153,155
<b>Après 2<sup>em</sup> cycle</b>	127,097	147,863	126,398	153,055
<b>Après 3<sup>em</sup> cycle</b>	126,697	147,764	125,997	152,656
<b>Après 4<sup>em</sup> cycle</b>	125,799	146,665	124,700	149,960



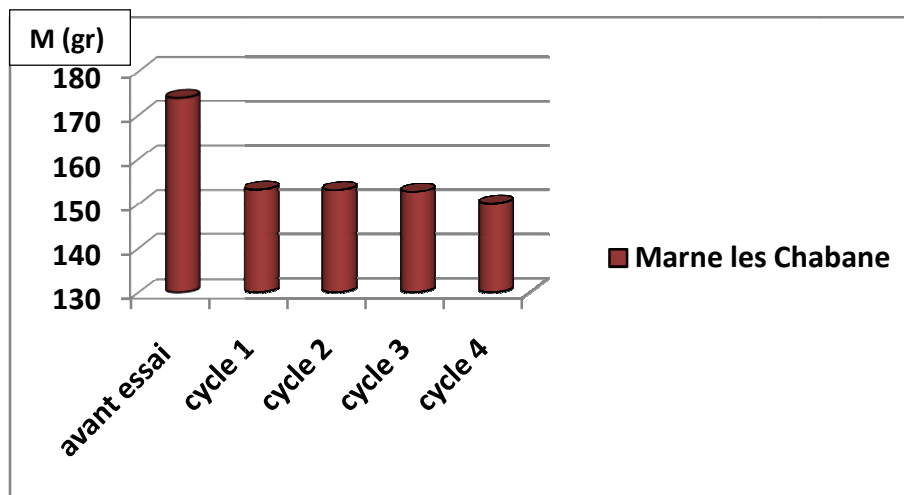
**Figure V-77:** Variation des masses des échantillons de Boghni au cours de l'essai de Dégradabilité.



**Figure V-78:** Variation des masses des échantillons de Draa El Mizan au cours d'essai de Dégradabilité.



**Figure V-79:** Variation des masses des échantillons de Dely Ibrahim au cours d'essai de Dégradabilité.



**Figure V-80:** Variation des masses des échantillons Les Chabane au cours d'essai de Dégradabilité.

**•Interprétation des résultats :**

Les résultats obtenus (Tableau V-6) ont montré que les masses des échantillons diminuent après chaque cycle, c'est dû au phénomène de retrait-gonflement, qui a un rôle très important pour ces pertes.

**V-2-3) Essai aux canicules:**

**V-2-3-1) 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 le changement de leur dimension fractale.

**V-2-3-2) Appareillage :**

Les éléments constituant l'appareillage sont :

- étuve ventilée (105 ±5) °C ;
- tares, les barques ;
- enceinte climatique ;
- balance de précision à ±0,1gr ;
- eau distillée.

**V-2-3-3) Déroulement d'essai :**

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

1<sup>er</sup> étape représente la saison d'hiver, on a imbibé les échantillons jusqu'à saturation à la pression atmosphérique pendant trois jours.

Pour la 2<sup>ème</sup> étape qui représente l'été, sécher les échantillons à l'étuve pendant 24h à 65c<sup>0</sup> jusqu'à avoir une masse constante.

Et la dernière étape, les échantillons sont soumis aux canicules du mois de Juillet et le mois d'Aout 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:

- une température de 57c<sup>0</sup>, le degré d'humidité est de 30% et le degré de ventilation est 24% pendant 10h.
- une température de 20c<sup>0</sup>, le degré d'humidité est de 75% et le degré de ventilation est 24% pendant 14h.

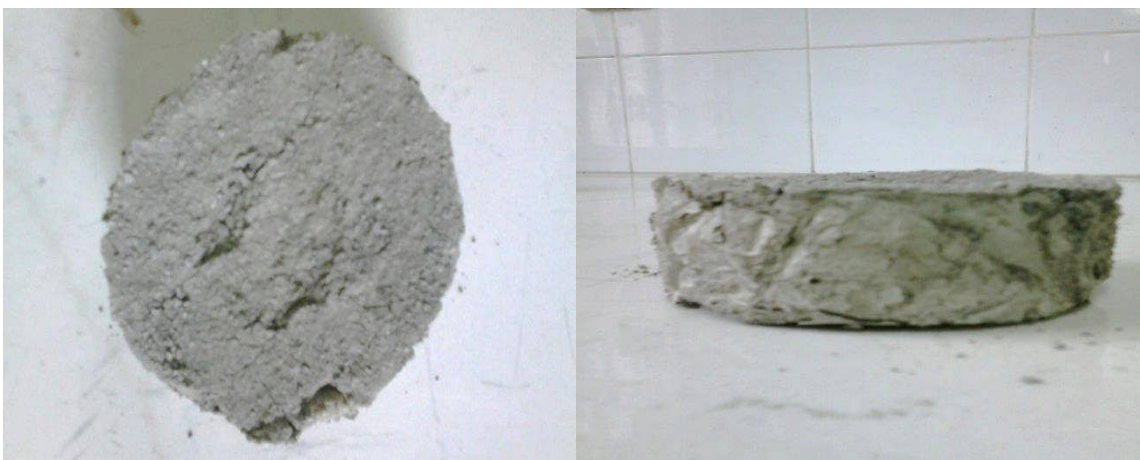
La procédure porte 10 cycle de réchauffement/refroidissement dont le 1<sup>er</sup> cycle débute par un réchauffement et le dernier se termine par un réchauffement pour avoir 10 cycles complets.

#### V-2-3-4) Les images retenues des échantillons :

##### *1-site Boghni*



**Figure V-81:** Site Boghni à l'état naturel.



**Figure V-82:** Echantillon 1 après l'étuve.



**Figure V-83:** Echantillon 2 après l'étuve.



**Figure V-84:** Echantillon 1 à la fin de l'essai.



**Figure V-85:** Echantillon 2 à la fin de l'essai.

**2- Site Draa El Mizan**



**Figure V-86:** site DEM à l'état naturel.



**Figure V-87:** Echantillon 1 après l'étuve.



**Figure V-88:** Echantillon 1 à la fin de l'essai.

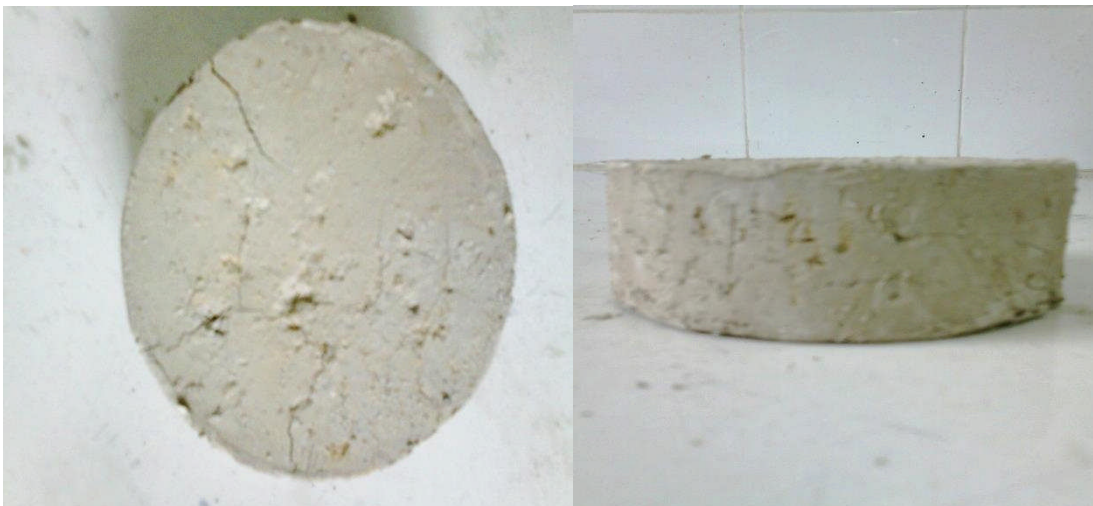
***3-Site Dely Ibrahim***



**Figure V-89:** site Dely Ibrahim à l'état naturel.



**Figure V-90:** Echantillon 1 après l'étuve.



**Figure V-91:** Echantillon 2 après l'étuve.



**Figure V-92:** Echantillon 1 à la fin de l'essai.



**Figure V-93:** Echantillon 2 à la fin de l'essai.

**4-Site Les Chabane**



**Figure V-94:** Site Les Chabane à l'état naturel.



**Figure V-95:** Echantillon 1 après l'étuve.



**Figure V-96:** Echantillon 2 après l'étuve.



**Figure V-97:** Echantillon 1 à la fin de l'essai.



**Figure V-98:** 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. Les échantillons de Dely Ibrahim et Draa El Mizan et Boghni ont subi un retrait cumulé au cours des cycles de réchauffement-refroidissement et l'élargissement des fissures est favorisé dans les plans de faiblesse préexistants et à l'intérieur des échantillons, par contre les échantillons de Les Chabane n'ont pas eu de déformations importantes sur le plan horizontal ni sur le plan vertical.

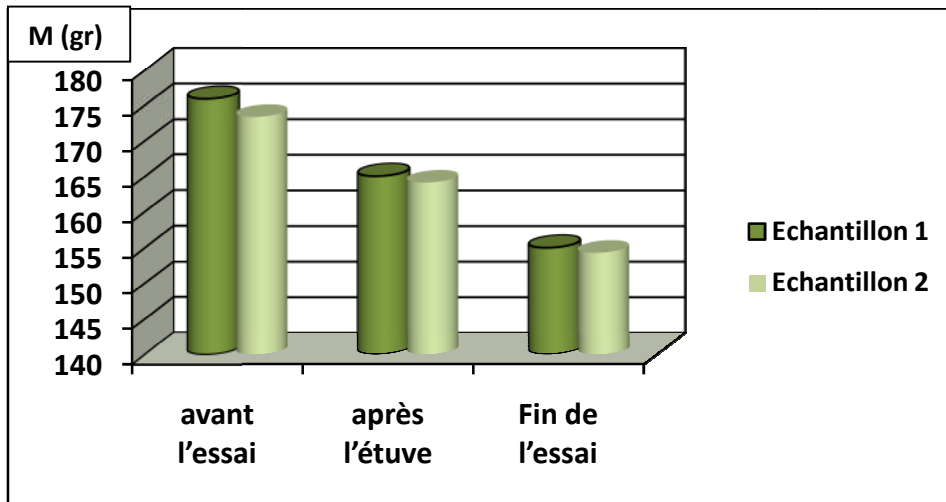
En peut dire que le phénomène a été engendré lorsque les minéraux se transforment et déclenchent le phénomène de retrait-gonflement (généralement lamontmorillonite et les illites qui ont des potentiels élevés pour le gonflement).

#### **V-2-3-5) 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 V-8 :** Variation de la masse des échantillons de Boghni au cours de l'essai aux canicules.

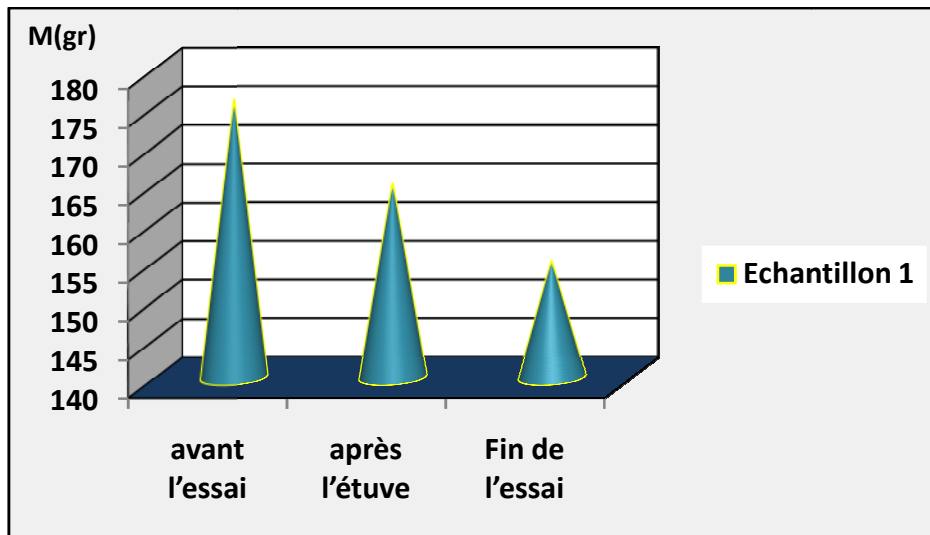
Site Boghni	Masse avant l'essai	Masse après l'étuve	Fin de l'essai
<b>Echantillon 1</b>	153,854	146,270	133,187
<b>Echantillon 2</b>	167,033	149,452	140,974



**Figure V-99** : Variation de la masse des échantillons de Boghni au cours d'essai aux canicules.

**Tableau V-9** : Variation de la masse des échantillons de DEM au cours de l'essai aux canicules.

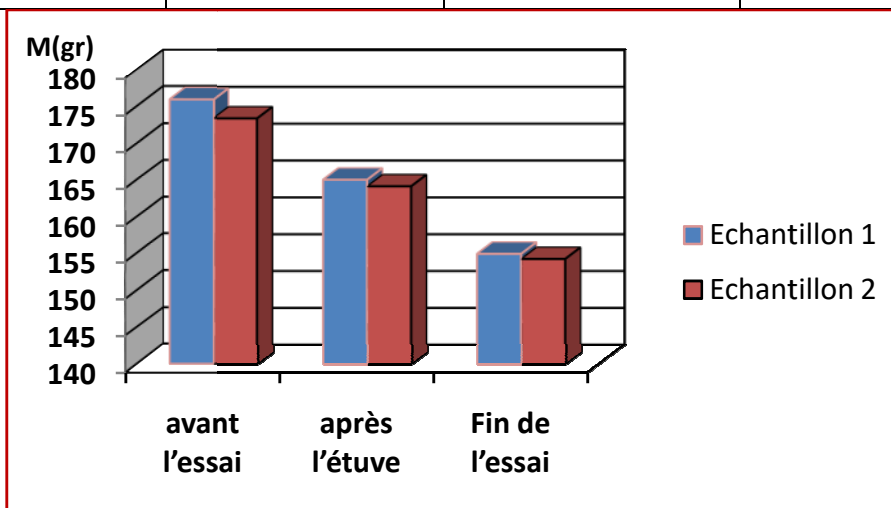
Site DEM	Masse avant l'essai	Masse après l'étuve	Fin de l'essai
<b>Echantillon 1</b>	180,811	170,140	162,041



**Figure V-100** : Variation de la masse des échantillons de DEM au cours d'essai aux canicules.

**Tableau V-10 :** Variation de la masse des échantillons de Dely Ibrahim au cours de l'essai aux canicules.

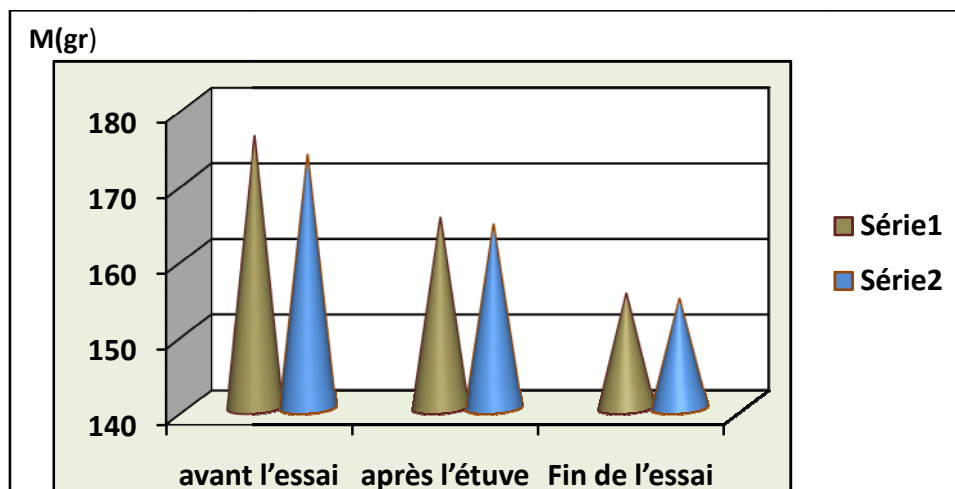
Site Dely Ibrahim	Masse avant l'essai	Masse après l'étuve	Fin de l'essai
<b>Echantillon 1</b>	154,952	138,125	127,596
<b>Echantillon 2</b>	156,320	140,452	129,692



**Figure V-101 :** Variation de la masse des échantillons de Dely Ibrahim au cours d'essai aux canicules.

**Tableau V-11 :** Variation de la masse des échantillons de les Chabane au cours de l'essai aux canicules.

Site Les Chabanes	Masse avant l'essai	Masse après l'étuve	Fin de l'essai
<b>Echantillon 1</b>	175,919	165,100	155,052
<b>Echantillon 2</b>	173,423	164,212	154,353



**Figure V-102 :** Variation de la masse des échantillons de 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.

**Conclusion :**

Ce chapitre a représenté les sollicitations saisonnières cycliques sur les échantillons étudiés; les effets de retrait-gonflement, les fissures et même le changement de la texture et la structure des échantillons, qui ont progressé pendant le déroulement des essais. La présence des minéraux a joué un rôle très important dans le changement de comportement des échantillons.

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

## **Chapitre VI :**

**Calcul de la dimension fractale par la méthode Box  
counting**

### Introduction :

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

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

### VI-1) Application de la méthode de Box Counting :

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

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

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

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

La méthode Box Counting est définie dans le chapitre II.

Un exemple du calcul est représenté ci-dessous (Figure VI-1), un échantillon de marne de forme cylindrique, de  $\varnothing = 63.4$  mm

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

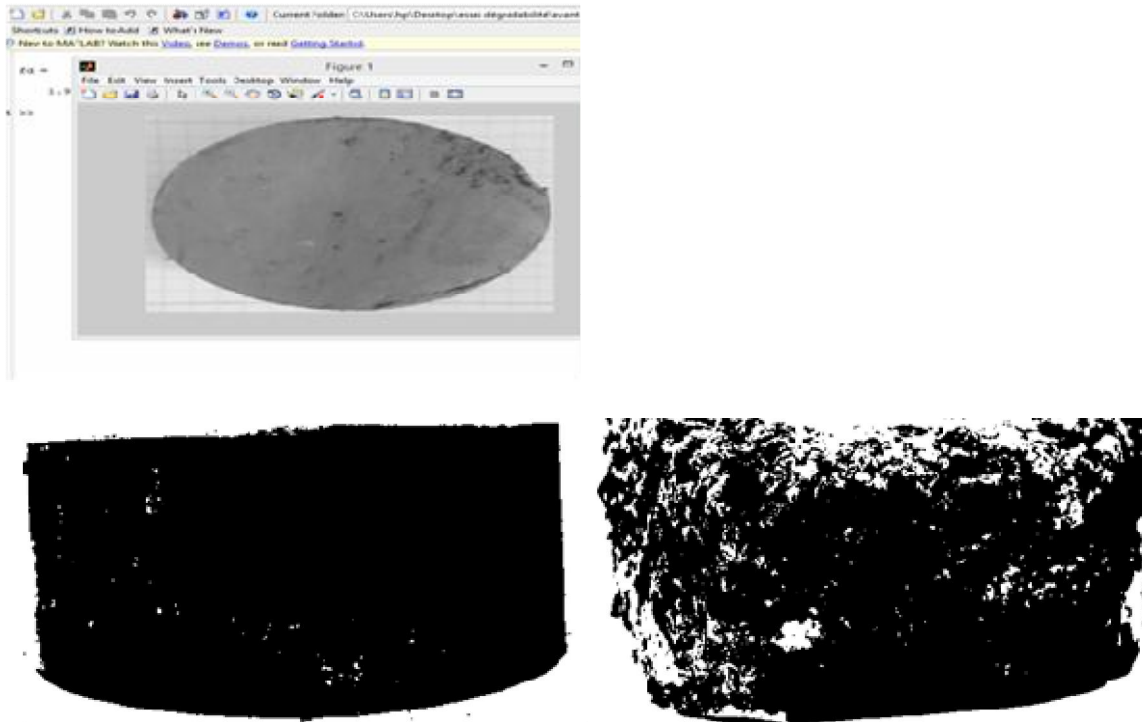


Figure VI-1 : Exemple du calcul DFR par le logiciel MATLAB R2009b.

### VI-2) Résultats et interprétations :

#### VI-2-1) Essai de Dégradabilité :

##### 1-Marne de Boghni :

Tableau VI-1 : 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	1,9720	1,8654	1,8552	1,7681	1,6200

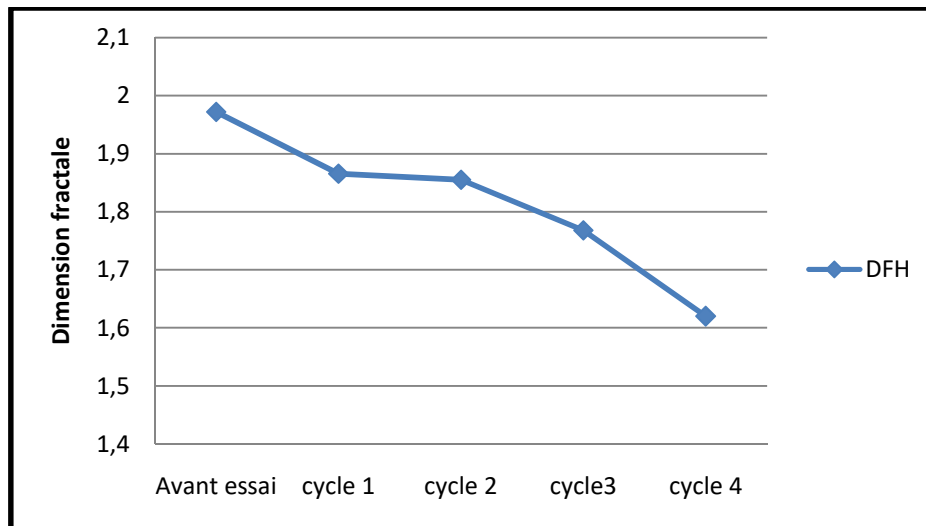


Figure VI-2 :Variation de la dimension fractale horizontale de la marne deBoghni.

Tableau VI-2 : Résultats de la dimension fractale verticale de la marne deBoghni.

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

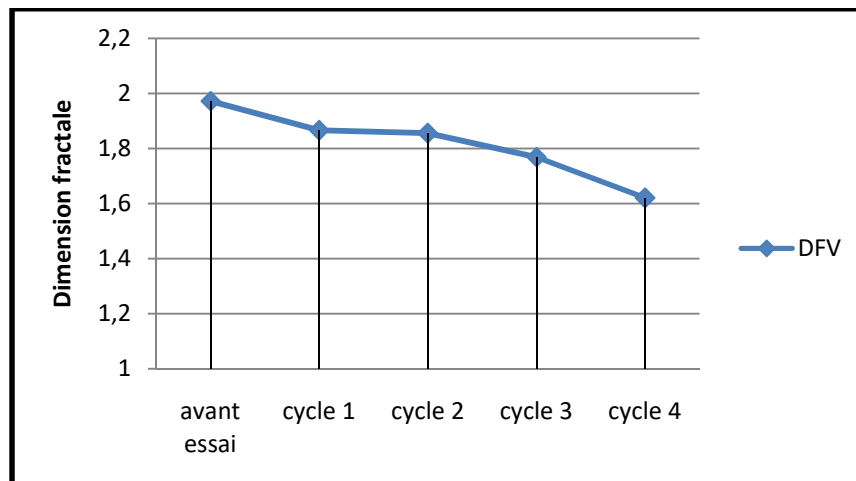


Figure VI-3 :Variation de la dimension fractale verticale de la marne de Boghni.

2-Marne Draa el Mizane :

Tableau VI-3 : Résultats de la dimension fractale horizontale de la marne DEM.

Marne	DFH Avant essai	DFH après 1 <sup>er</sup> cycle	DFH après 2 cycles	DFV après 3 cycles	DFH après 4 cycles
DEM	1,9812	1,9532	1,8793	1,7891	1,6987

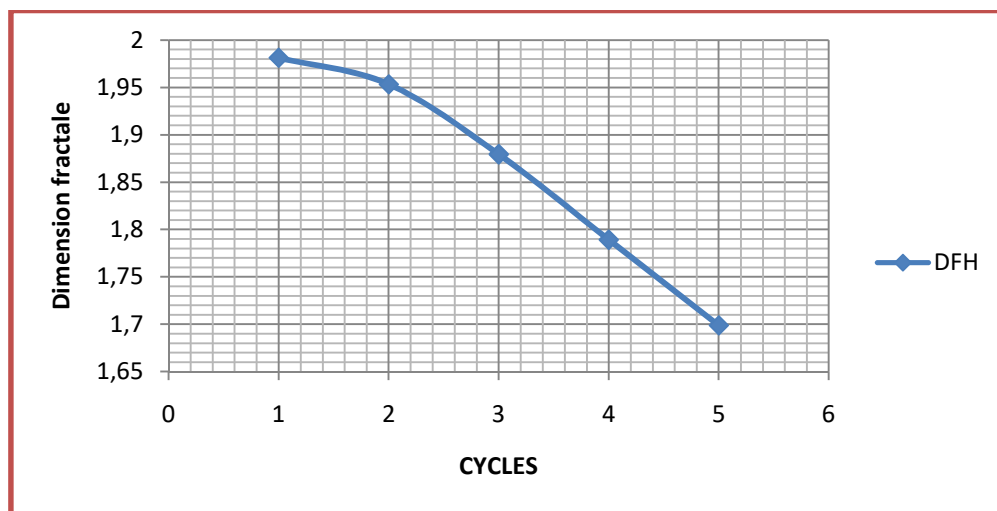


Figure VI-4 : Variation de la dimension fractale horizontale de la marne DEM.

Tableau VI-4 : Résultats de la dimension fractale verticale de la marne DEM.

Marne	DFV Avant essai	DFV après 1 <sup>er</sup> cycle	DFV après 2 cycles	DFV après 3 cycles	DFV après 4 cycles
DEM	1,9685	1,9601	1,8986	1,8111	1,6894

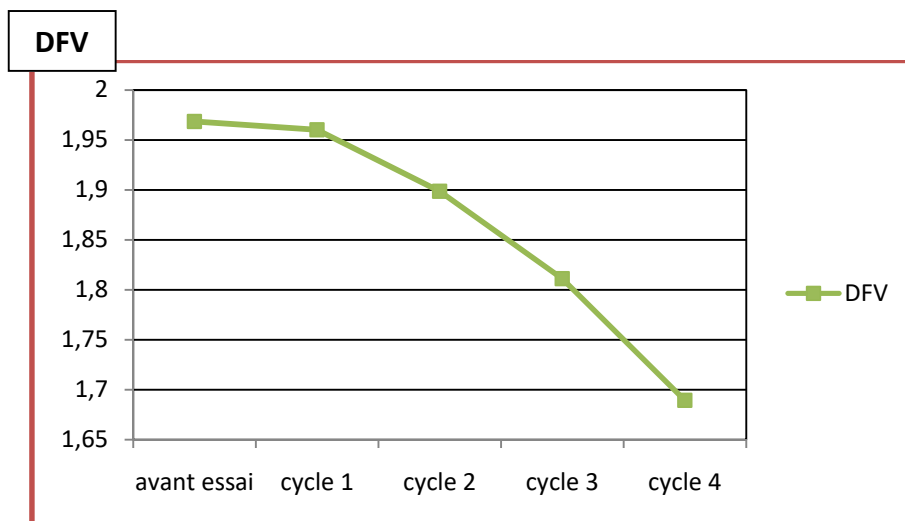


Figure VI-5 : Variation de la dimension fractale verticale de la marne DEM.

3-Marne Dely Ibrahim

Tableau VI-5 : Résultats de la dimension fractale horizontale de la marne Dely Ibrahim.

Marne	DFH Avant essai	DFH après 1 cycle	DFH après 2 cycles	DFH après 3 cycles	DFH après 4 cycles
Dely Ibrahim	1,9430	1,8694	1,8209	1,7792	1,6942

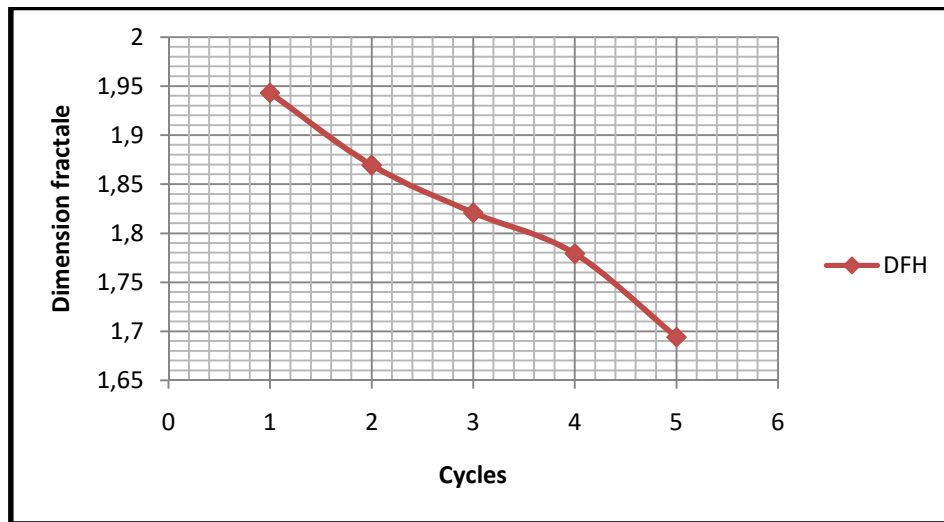


Figure VI-6 :Variation de la dimension fractale horizontale de la marne Dely Ibrahim.

Tableau VI-6 : Résultats de la dimension fractale verticale de la marne Dely Ibrahim.

Marne	DFV Avant essai	DFV après 1 cycle	DFV après 2 cycles	DFV après 3 cycles	DFV après 4 cycles
Dely Ibrahim	1,9354	1,8829	1,8157	1,7896	1,6998

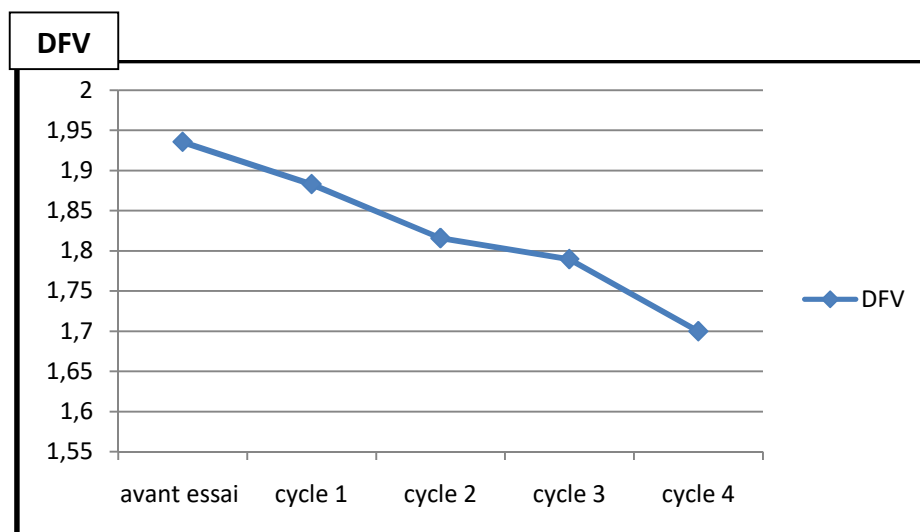
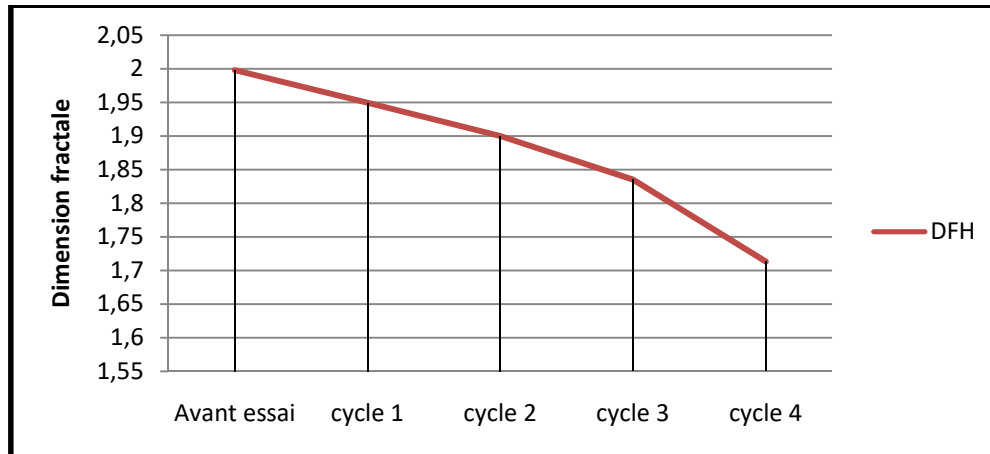


Figure VI-7 : Variation de la dimension fractale verticale de la marne Dely Ibrahim.

## Chapitre VI : Calcul de la dimension fractale par la méthode Box Counting

**Tableau VI-7 :** Résultats de la dimension fractale horizontale de la marne Les Chabane.

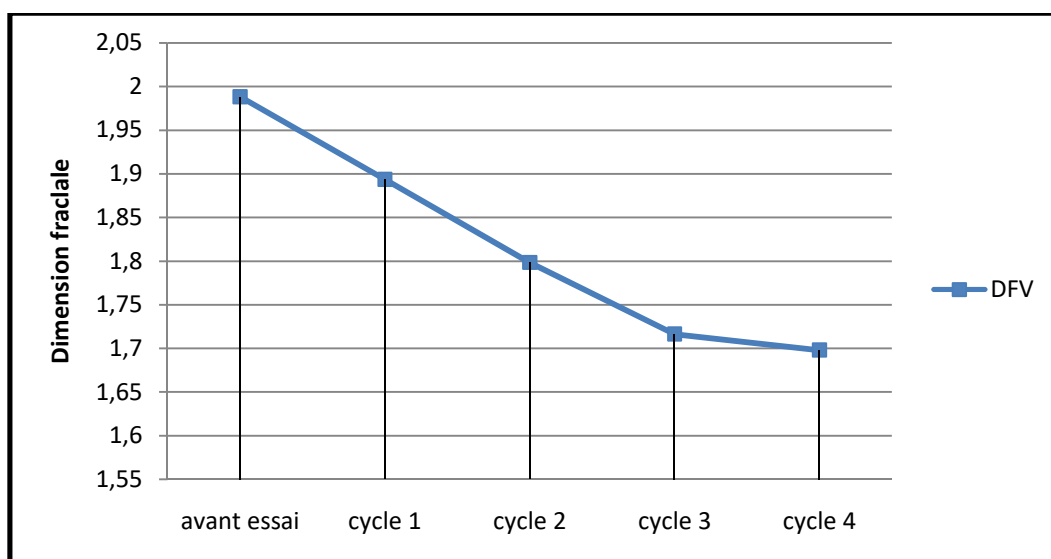
Marne	DFH Avant essai	DFH après 1 cycle	DFH après 2 cycles	DFH après 3 cycles	DFH après 3 cycles
Les Chabane	1,9981	1,9495	1,9001	1,8351	1,7134



**Figure VI-8 :** Variation de la dimension fractale horizontale de la marne Les Chabane.

**Tableau VI-8 :** 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 chabanes	1,9883	1,8937	1,7984	1,7164	1,6980



**Figure VI-9 :** Variation de la dimension fractale verticale de la marne Les Chabane.

VI-2-2) Essai de gel-dégel:

1- Marne Boghni

Tableau VI-9 : Résultats de la dimension fractale verticale et horizontale de l'échantillon témoin.

Sol Boghni témoin	DFH	DFV
Avant l'essai	1,9725	1,9625
10 <sup>ème</sup> cycle (à 48h)	1,9254	1,8722

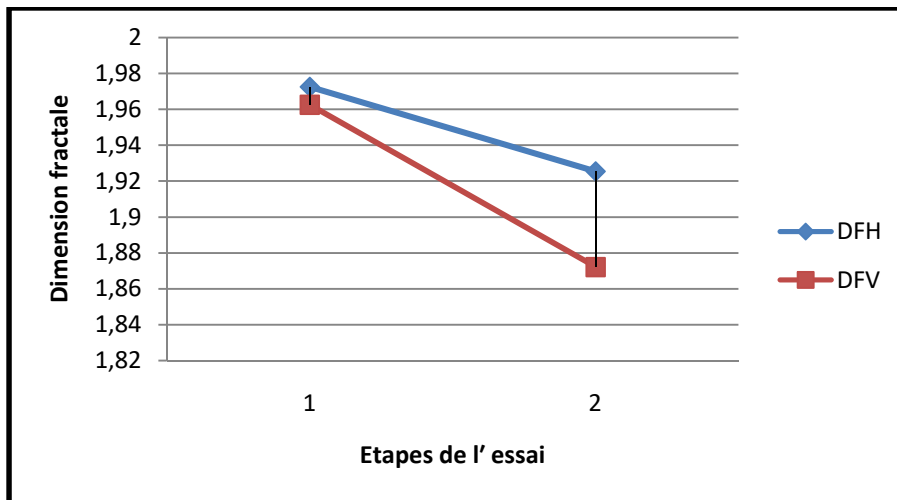


Figure VI-10 : Variation de la dimension fractale en fonction des Etapes de l'essai pour l'échantillon témoin.

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

Etapas de l'essai		Surface H	Surface V
1	Avant (naturel)	1,9775	1,8831
2	Après l'étuve	1,8466	1,8111
3	10 <sup>ème</sup> cycle (à 48h)	1,7871	1,7942

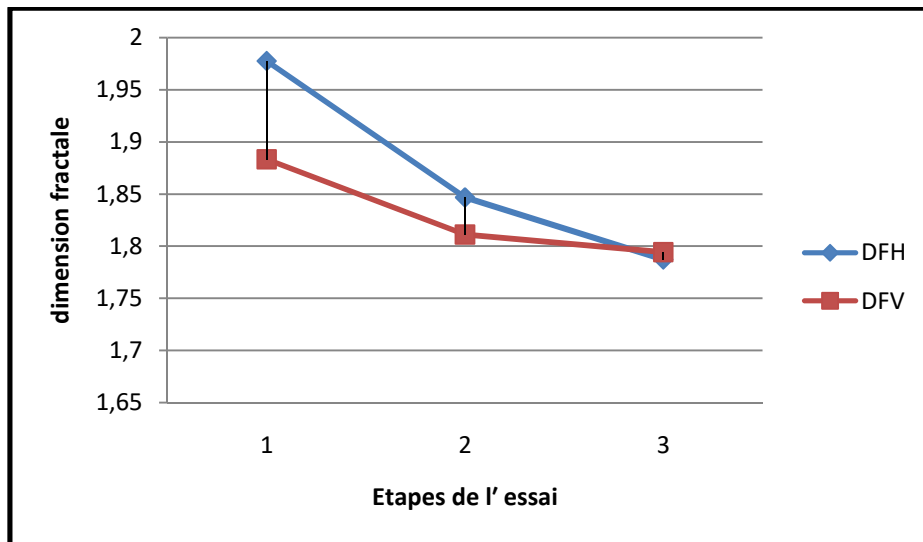


Figure VI-11 : Variation de la dimension fractale en fonction des Etapes de l'essai pour l'échantillon 1.

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

	Etapas de l'essai	Surface H	Surface V
1	Avant (naturel)	1,9076	1,8984
2	Après l'étuve	1,8666	1,7981
3	10 <sup>ème</sup> cycle (à 48h)	1,7971	1,7112

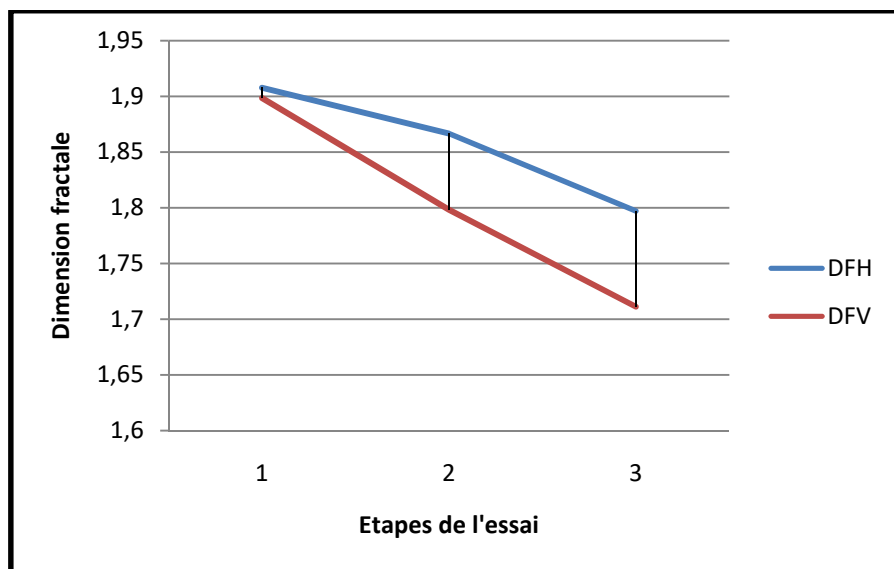
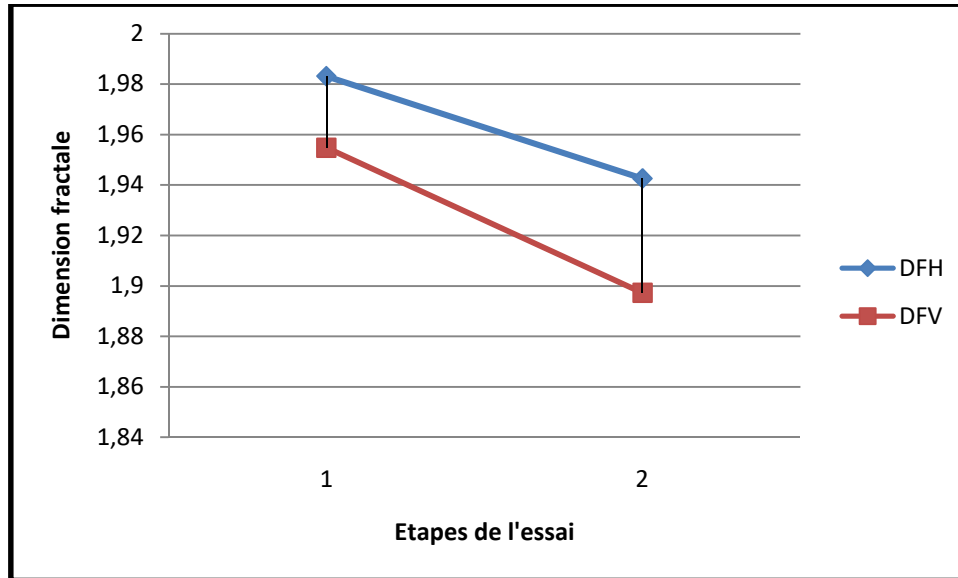


Figure VI-12 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon 2.

2-Marne Draa El Mizan

**Tableau VI-12** : Résultats de la dimension fractale verticale et horizontale de l'échantillon témoin.

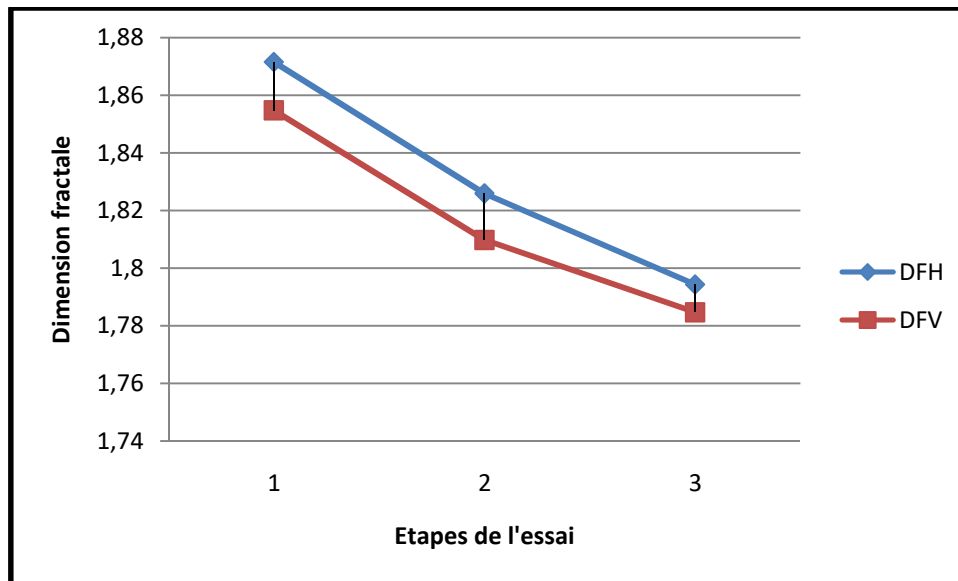
Sol DEM témoin	DFH	DFV
Avant l'essai	1,9831	1,9547
10 <sup>ème</sup> cycle (à 48h)	1,9426	1,8972



**Figure VI-13** : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon témoin.

**Tableau VI-13** : Résultats de la dimension fractale verticale et horizontale de l'échantillon 1.

Etapas de l'essai		Surface H	Surface V
1	Avant (naturel)	1,8715	1,8547
2	Après l'étuve	1,8259	1,8097
3	10 <sup>ème</sup> cycle (à 48h)	1,7943	1,7846



**Figure VI-14:** Variation de la dimension fractale en fonction des Etapes de l'essai pour l'échantillon 1.

**Tableau VI-14 :** Résultats de la dimension fractale verticale et horizontale de l'échantillon 2.

Etapas de l'essai		Surface H	Surface V
1	Avant (naturel)	1,9382	1,9297
2	Après l'étuve	1,8975	1,8698
3	10 <sup>ème</sup> cycle (à 48h)	1,8149	1,7925

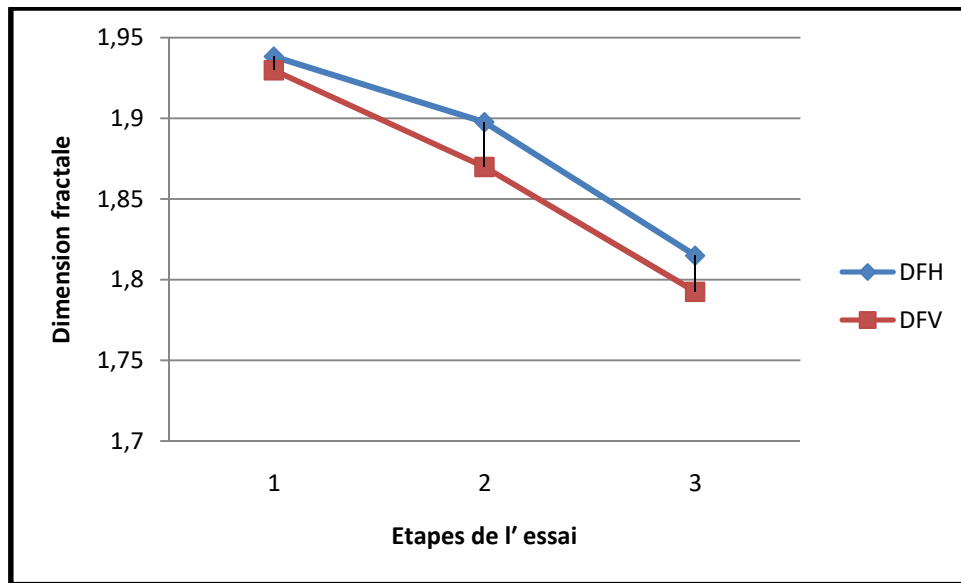


Figure VI-15 : Variation de la dimension fractale en fonction des étapes de l'essai pour l'échantillon 2.

### 3-Marne Dely Ibrahim

Tableau VI-15 : Résultats de la dimension fractale verticale et horizontale de l'échantillon témoin.

Sol Delly Ibrahim témoin	DFH	DFV
Avant l'essai	1,9381	1,8547
10 <sup>ème</sup> cycle (à 48h)	1,8755	1,8044

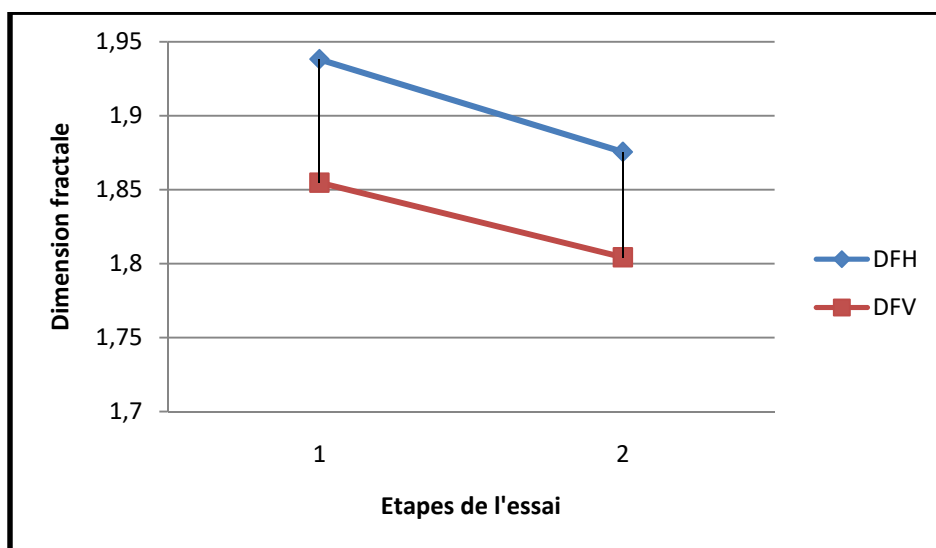
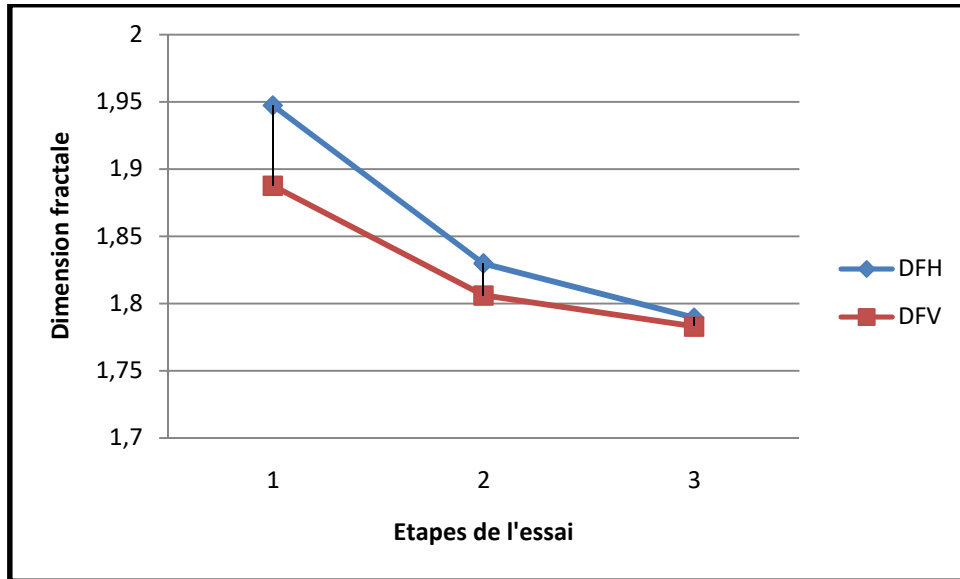


Figure VI-16 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon témoin.

**Tableau VI-16 :** Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 1.

Etapas de l'essai		Surface H	Surface V
1	Avant (naturel)	1,9472	1,8875
2	Après l'étuve	1,8297	1,8059
3	10 <sup>ème</sup> cycle (à 48h)	1,7894	1,7829



**Figure VI-17 :** Variation de la dimension fractale de l'échantillon 1.

**Tableau VI-16 :** Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 2.

Etapas de l'essai		Surface H	Surface V
1	Avant (naturel)	1,9370	1,9000
2	Après l'étuve	1,8408	1,8135
3	10 <sup>ème</sup> cycle (à 48h)	1,7948	1,7013

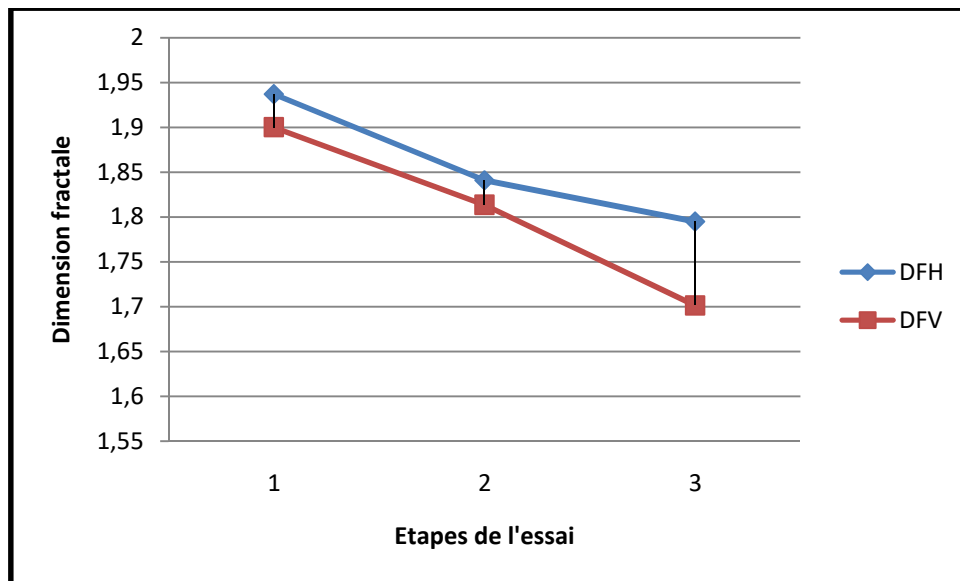


Figure VI-18 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon 2.

#### 4- Marne Les Chabane

Tableau VI-17 : Résultats de la dimension fractale verticale et horizontale de l'échantillon témoin.

Sol Les Chabane témoin	DFH	DFV
Avant l'essai	1,9891	1,9800
10 <sup>ème</sup> cycle (à 48h)	1,9195	1,9002

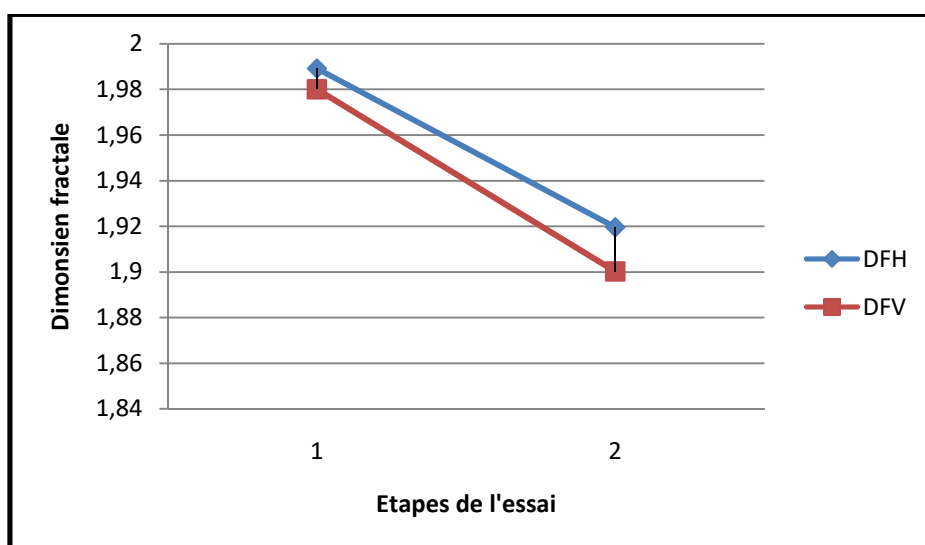
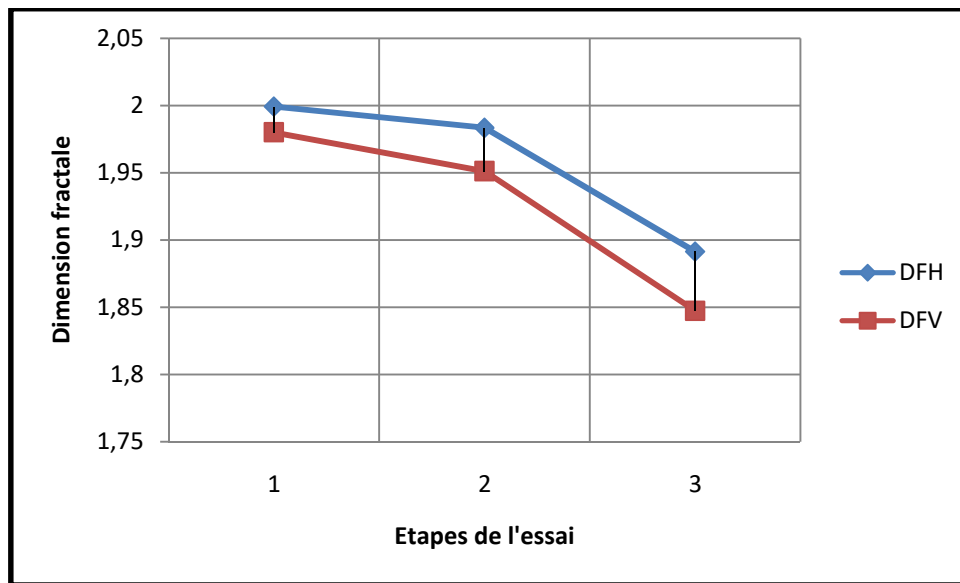


Figure VI-19 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon témoin.

**Tableau VI-18** : Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 1.

	Etapes de l'essai	Surface H	Surface V
1	Avant (naturel)	1,9991	1,9800
2	Après l'étuve	1,9833	1,9511
3	10 <sup>ème</sup> cycle (à 48h)	1,8914	1,8473



**Figure VI-20** : Variation de la dimension fractale de l'échantillon 1.

**Tableau VI-19** : Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 2.

	Etapes de l'essai	Surface H	Surface V
1	Avant (naturel)	1,9583	1,9495
2	Après l'étuve	1,8864	1,8799
3	10 <sup>ème</sup> cycle (à 48h)	1,8649	1,8533

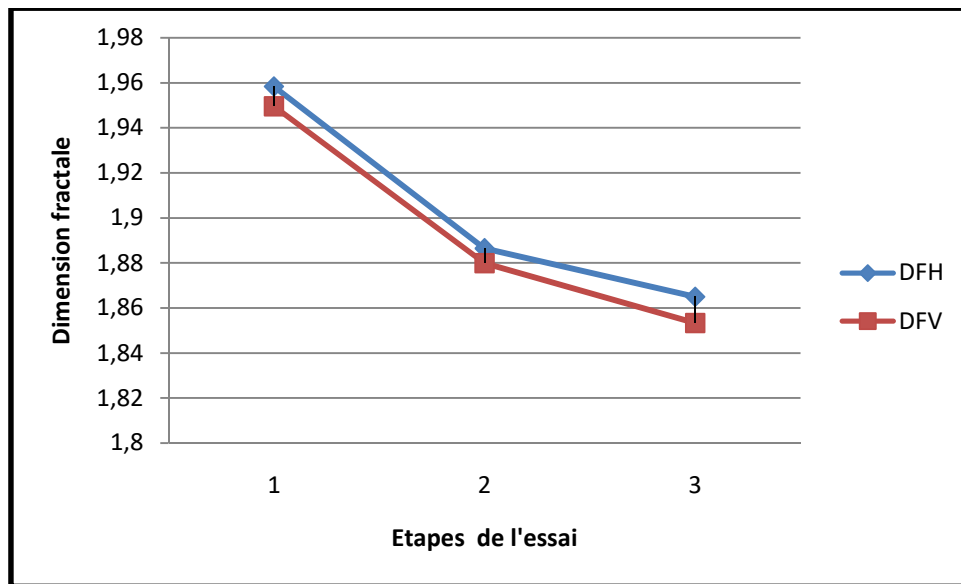


Figure VI-21 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon 2.

VI-2-3) Essai aux canicules

1-Marne Boghni

Tableau VI-20 : Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 2.

Etapas de l'essai		Surface H	Surface V
1	Avant (naturel)	1,8852	1,8722
2	Après l'étuve	1,8041	1,7800
3	10 <sup>ème</sup> cycle	1,7441	1,7005

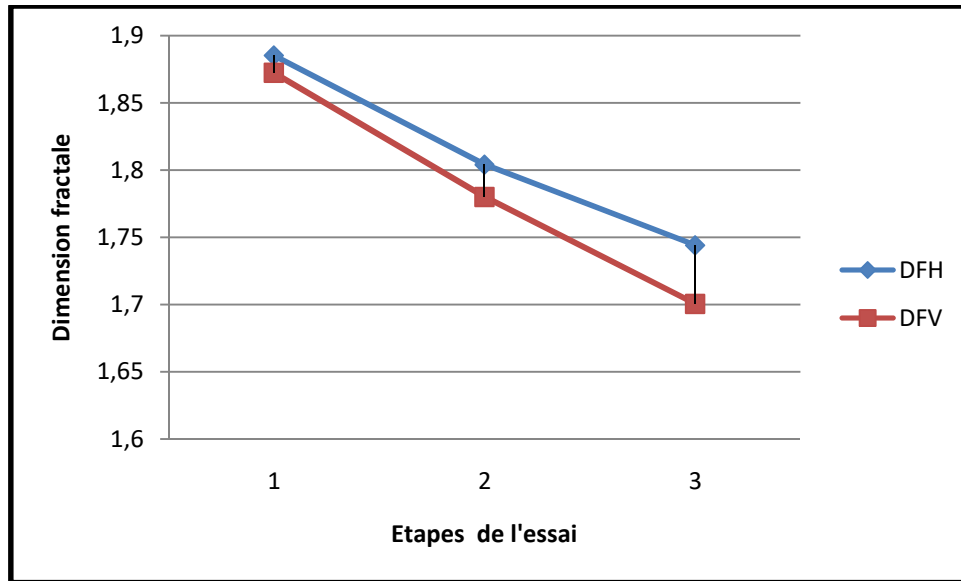


Figure VI-22 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon 1.

Tableau VI-21 : Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 2.

Etapas de l'essai		Surface H	Surface V
1	Avant (naturel)	1,9872	1,9181
2	Après l'étuve	1,8724	1,8600
3	10 <sup>ème</sup> cycle	1,7764	1,7201

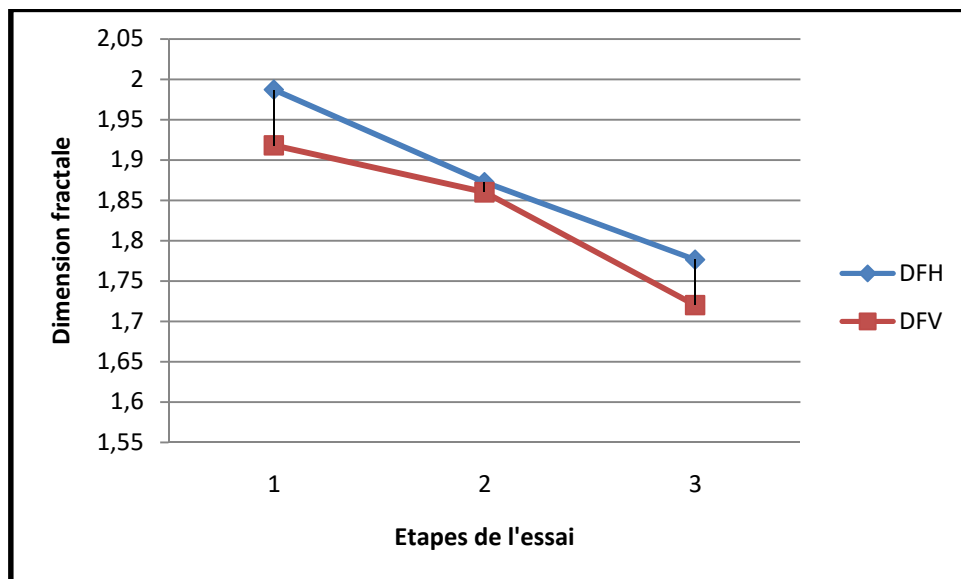


Figure VI-23 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon 2.

2-Marne de Draa El mizan

Tableau VI-22: Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 1.

	Etapes de l'essai	Surface H	Surface V
1	Avant (naturel)	1,9999	1,8471
2	Après l'étuve	1,7305	1,7200
3	10 <sup>ème</sup> cycle	1,7107	1,7009

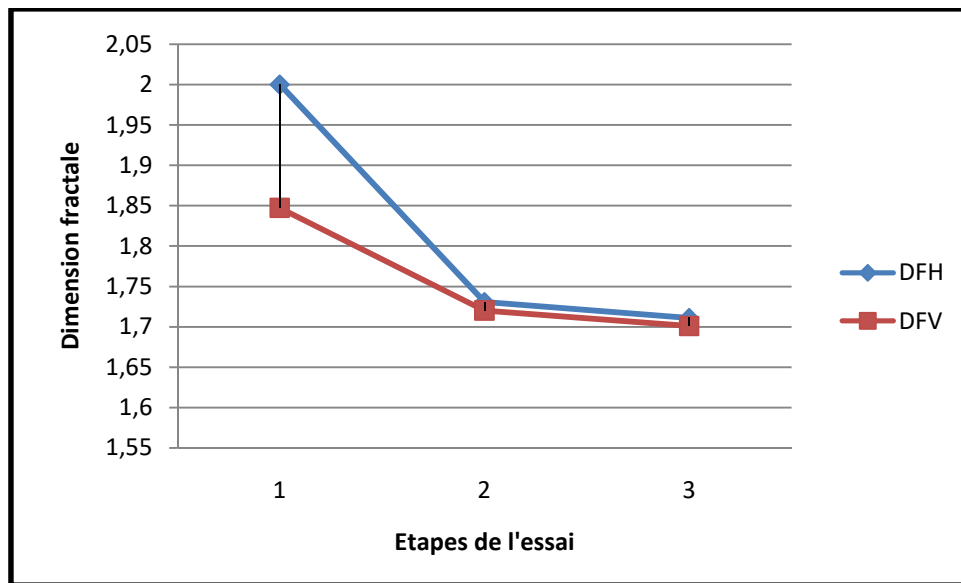


Figure VI-24 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon 1.

3-Site Dely Ibrahim

Tableau VI-23: Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 1.

	Etapes de l'essai	Surface H	Surface V
1	Avant (naturel)	1,9716	1,9589
2	Après l'étuve	1,9092	1,8481
3	10 <sup>ème</sup> cycle	1,8564	1,7337

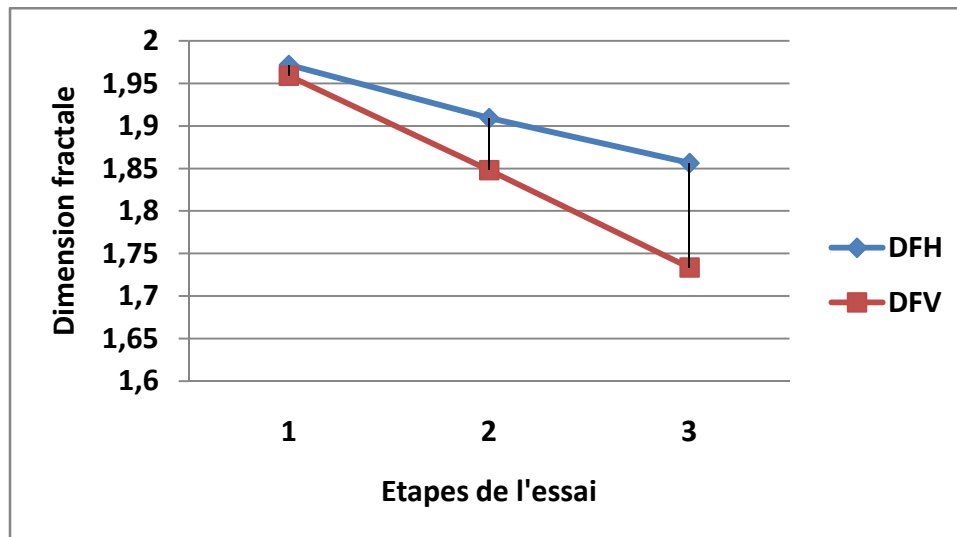


Figure VI-25 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon 1.

Tableau VI-24: Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 2.

Etapas de l'essai		Surface H	Surface V
1	Avant (naturel)	1,9789	1,9486
2	Après l'étuve	1,9000	1,8327
3	10 <sup>ème</sup> cycle	1,8324	1,7206

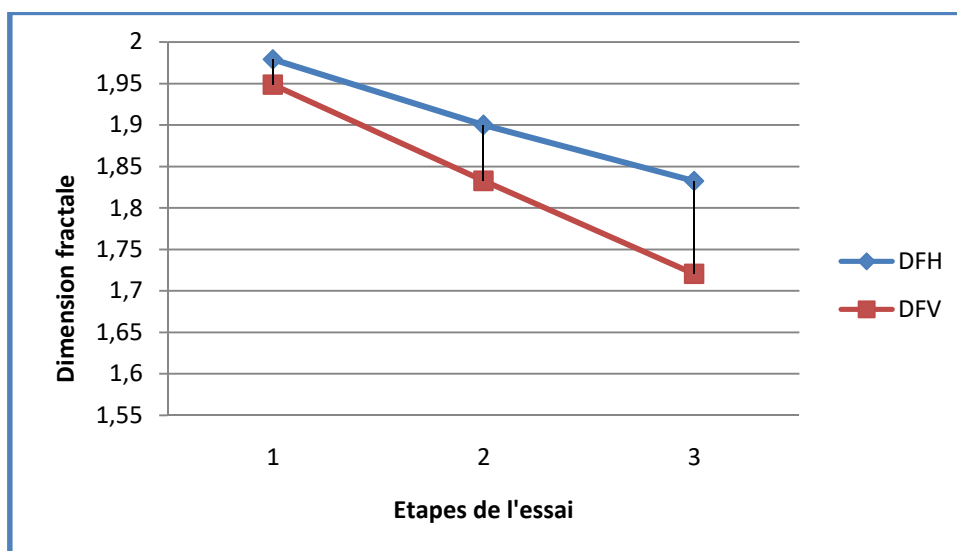


Figure VI-26 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon 2.

4-site Les Chabane

Tableau VI-25: Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 1.

	Etapes de l'essai	Surface H	Surface V
1	Avant (naturel)	1,9858	1,9528
2	Après l'étuve	1,9055	1,8438
3	10 <sup>ème</sup> cycle	1,8107	1,7056

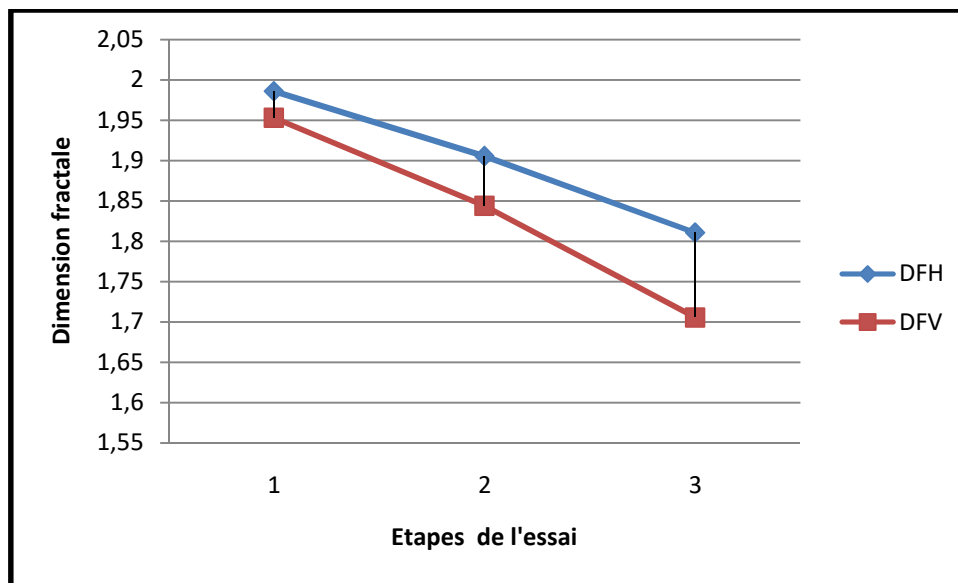


Figure VI-27 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon 1.

Tableau VI-26: Résultats de la dimension fractale de l'échantillon 2.

	Etapes de l'essai	Surface H	Surface V
1	Avant (naturel)	1,9736	1,9704
2	Après l'étuve	1,9122	1,8572
3	10 <sup>ème</sup> cycle	1,8796	1,7893

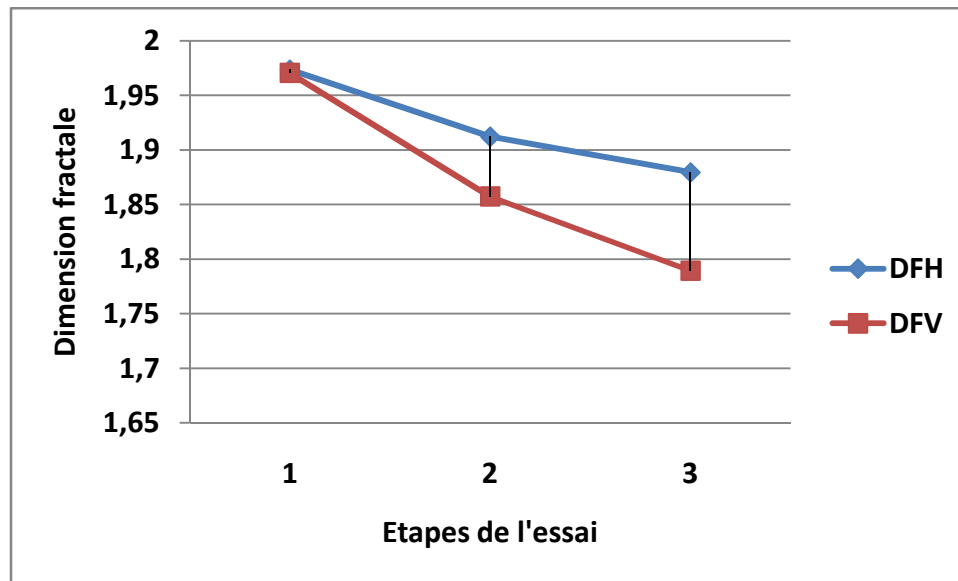


Figure VI-28 : Variation de la dimension fractale de l'échantillon 2.

- **Interprétation des résultats :**

Les figures 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.

Nous avons constaté que la valeur de DFR diminue avec l'augmentation du nombre de cycles appliqués, durant les trois essais réalisés. 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 DFR calculée. Il a été remarqué aussi que la façon de diminution de la DFR est différente d'un sol à un autre durant les trois essais. Dans l'essai aux canicules la marne de Les Chabane la DFH et DFV diminuent lentement et en simultanément, par contre la DFV de Dely Ibrahim diminue rapidement par rapport à la DFH. La marne de DEM c'est la DFH qui diminue plus rapidement que la DFV même constatation après l'essai de dégradabilité. La marne de Boghni c'est la DFH qui baisse rapidement que la DFV durant l'essai gel-dégel. 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 DFR. Sans oublier la présence des minéraux qui ont une sensibilité à l'eau.

### **Conclusion :**

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

Cette diminution de DFR peut s'expliquer par le changement de la texture, l'augmentation de la rugosité des échantillons et même la propagation de leurs fissures, qui ont un rôle principal dans la diminution de DFR, sans oublier la présence des minéraux, qui ont une sensibilité à l'eau.

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

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

# CONCLUSION GENERALE

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

Les essais ont été réalisés sur des échantillons intacts de nature marneuse, prélevés des sites différents situés à la wilaya de Tizi-Ouzou ; un à Boghni, un à Draa El Mizan et un autre à Les Chabane et le 4<sup>em</sup> d'Alger (Delly Ibrahim).

De cette étude on peut constater que :

- le climat a un rôle important sur le changement de la texture, du volume et même des paramètres physiques des sols, les marnes sont classées parmi les sols influencés par les changements climatiques.
- Les changements cycliques du climat provoquent plusieurs influences sur les sols fins, parmi ses influences le phénomène de retrait-gonflement et les fissurations qui sont apparus plus pour les marnes composées de l'argile (Boghni, DEM, et Dely Ibrahim) contrairement à la marne de Les Chabane qui est pure.
- la présence des minéraux sensibles à l'eau a une influence sur le changement de la structure du sol (gonflement-retrait).
- le cycle émerision-séchage a des brusques changements sur les échantillons, qui ont un potentiel de retrait-gonflement élevé et un comportement plastique.
- les changements cycliques du climat peuvent causer des dégâts importants dans les terrains constitués des sols argileux par rapport aux sols marneux (glissement, effondrement, tassement...).
- le calcul de la dimension fractal par le logiciel Matlab a montré que les sols se dégradent à chaque cycle des expériences réalisées.
- L'analyse de la dimension fractale d'une image semble être véritablement un outil puissant pour comparer les caractéristiques intrinsèques des sols liées à leur fragmentation et leur rugosité. Les algorithmes donnent donc une estimation satisfaisante de la dimension fractale.

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

## *Références bibliographiques*

---

**ATTERBERG. A (1919)** «Die plastizitat und BindigkeitlieferndenBestandteeile der Tone» Intern. Mitt.Fur Bodenkunde.

**ACHIR. M (2011)** «Caractérisation du phénomène d'écroulement par l'étude de la dimension fractale des grains » Mémoire de magister en génie civil option Géotechnique et Environnement, LGEA, Université mouloud Mammeri de Tizi- Ouzou.

- **AFNOR** : Norme française sol : reconnaissance et essais.
  - NF P 94-093\_Proctor\_Octobre (1999) : « Détermination des références du compactage d'un matériau. »
  - NFP 94- 041 (1995) : « Analyse granulométrique, méthode de tamisage par voie humide. »
  - NFP 94-050 (1995) : « Détermination de la teneur en l'eau pondérale des matériaux- Méthode par étuvage ».
  - NFP 94-051 (1993) : « Détermination des limites d'Atterberg la limite à la coupelle – limite de plasticité au rouleau ».
  - NFP 94- 053 (1991) : « Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire. Méthode de la trousse coupante, du moule et de l'immersion dans l'eau ».
  - NFP 94-057 (1992) : « Analyse granulométrique des sols par sédimentométrie ».
  - NFP 94-060-1 : « Détermination conventionnelle de la limite retrait sur le passant à 400µm d'un matériau ».
  - NFP 18-592 (1990) : « Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à tache ».
  - NFP 94- 067 (1992) : « Coefficient de dégradabilité des matériaux rocheux ».
  - NF EN 1367-1 (2000) : « Essais pour déterminer les propriétés thermiques et l'altérabilité des granulats, Partie 1: Détermination de la résistance au gel/dégel ».
  - NF EN 1367-4 (1998) : « Essais pour déterminer les propriétés thermiques et l'altérabilité des granulats, Partie 4 : Détermination du retrait au séchage ».

**BAHAR. R et KENAI. S (2002)** « Désordres dus à l'infiltration des eaux : cas de la

ville d,,El-Affroun. » Rev Fr de Géot 101: 91-103. Bahar R. & Kenai S. (2008). Etude de quelques problèmes de fondations et d,,ouvrages de soutènement dans les sols argileux. Actes du Symp Int Sécheresse et Constructions. Paris 2003.

**BAHLOUL. H et Djaned. M (1994)** «Résistance résiduelle des marnes en relation avec la minéralogie » Géologie de l'ingénieur appliquée de l'Université .U.S.T.H.B de l'Algérie.

## *Références bibliographiques*

---

- BENAISSA. A (1993)** « Elément de mécanique des sols » Office des publications Universitaires, de Ben-Aknoun (Alger).
- BERGA. A (2003-2004)** « Eléments de Mécanique des Sols » Centre Universitaire de Béchar.
- BERTHAUD. Y Buhan. P et Schmitt. N (2008)** « Aide-mémoire mécanique des sols » Edition DUNOD de Paris.
- BOUDLAL. O (2013)** « Etude expérimentale du comportement mécanique des fines dans la stabilité des talus et des fondations » Thèse de Doctorat de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
- BOUZEBODJA. A (2016)** « L'influence de la dimension fractale en 3D sur les caractéristiques mécaniques des matériaux granulaires. » Thèse de Doctorat en génie civil option Géotechnique et Environnement, LGEA, Université mouloud Mammeri de Tizi-ouzou.
- BRETTE. A (2002)** « Cours de laboratoire partie 6 - les sols » Lycée Pierre Caraminot 19300E
- BUFFALO. M (1989)** « L'érosion des terres noires dans la région de Buech » (Hautes-Alpes, France). Thèse de doctorat en géologie, Aix-Marseille III, 230 p.
- CALLAUD (2004)** « Cours de mécanique des sols » Tome I : propriétés des sols. Institut International d'Ingénieur de l'Eau et de l'Environnement, groupe EIER - ETSHER.
- CHEHEB.F (2016)** « Etude expérimentale et analytique de la perméabilité des argiles stratifiées » Thème de Master en génie civil option Géotechnique et Environnement, LGEA, Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- CHUICHA. K (2016)** « la dimension fractale et l'étendue granulaire comme paramètre d'identification des mélanges granulaire » (journal article) materials and structures, 2006, volume, 39 number 7.
- COLLINS. K MC COWN. A (1974)** « The Form and Function of Micro fabric Features In A Variety Of Natural Soils » Geotechnique 24, n°2.
- COSTET. J et Sanglerat. G (1981)** « Cours pratique de mécanique des sols, 1 plasticité et calcul des tassements » 3eme Edition, Dunod, Janvier 1981.
- DEGOUTTE. G et Royet. P (2009)** « Aide-mémoire de mécanique des sols » publication de l'ENGREF, France, pp 15 à 18.
- DELAGE. P et Cui Yu-Jun (2008)** « L'eau dans les sols non saturés » École nationale des ponts et chaussées (ENPC), Document c301, Technique de l'Ingénieur, l'expertise technique et scientifique de référence.
- DUBUC. B, QUINIOU. J.F, ROQUES-CARMES. C, TRICOT. C et ZUCKER. S.W (1989)** « Evaluating the fractal dimension of profiles. » Phys. Rev. A.

**DYSLI. M (1993)** « Compléments aux cours polycopiés de technologie et de mécanique des sols » 3e édition. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Paris.

**FREISSMUTH. H (2002)** « Influence de l'eau sur le comportement mécanique des roches argileuses » Thèse de doctorat, Ecole Des Mines De Paris. Journal of the Electrochemical Society, vol. 151, no 9.

**HABIB. P (1997)** « Génie géotechnique - Applications de la mécanique des sols et des roches » ELLIPSES, 222 p.

**HAMMAR. D et Mezini (1996)** « Identification et caractérisation mécanique de la marne de Tizi-Ouzou : Application au Domaine Routier » Mémoire d'ingénieur d'état en Génie Civil.

**HUANG. G.H et ZHAN. W.H (2002)** « Fractal property of soilparticle size distribution and its application. » ActePedologicaSinica, 39.

**JENNINGS, J.E.B & Burland, J.B., (1962)** «Limitations to the use of effective stresses concept in partly saturated soils» Géotechnique, vol. 12, pp. 125-144.

**JOSIANE. L (2006)** « La géométrie fractale. » Mémoire comme exigence partielle de la maîtrise en Mathématiques et Informatique Appliquées Université du QUEBEC A TROIS-RIVIERES.

**KELLER. J, KELLER. M, CROWNOVER. R.M et CHEN. R.Y (1987)** « Characteristics of Natural Scenes Related to the Fractal Dimension » IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence, Vol. PAMI-9, NO. 5.

**KELLER. J, CHEN. S et CROWNOVER. R (1989)** « Texture description and segmentation through fractal geometry. »Computer Vision Graphics and Image Processing, vol. 45, pp.150-166.

**LAMBE.A.T.W et WHITMAN.R.V (1969)** «Soil Mechanics, series in soil engineering». New York.

**LARKE.K. C (1986)** « Computation of the Fractal Dimension of Topographical Surfaces Using the Triangular Prism Surface Area Method » Computer. Geosciences.

**LEHAMEL. M (2011)** « Segmentation d'images texturées à partir des attributs fractals. » Mémoire de magister en Génie Electrique et Informatique Département Automatique option Traitement d'image et reconnaissance de formes, Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

**LÊ ThịNgọcHà (2009)** «comportement des sols fins ».

**MADJNOUN. A (2014)** « Analyse, caractérisation, prévision et modélisation du comportement des argiles gonflantes » Thèse de Doctorat en génie civil option Géotechnique et Environnement, LGEA, Université mouloud Mammeri de Tizi- Ouzou.

**MANDELBROT. B (1967)** « How long is the coastline of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. » Science, 155: 636 – 638.

- MANDELBROT. B.B et VAN NESS. J.W (1968)** « Fractional Brownian motion, fractional noise and applications » SIAM Review, vol. 10. pp. 422-437.
- MANDELBROT. B.B (1975)** « Les objets fractals, forme, hasard et dimension. » 190 pp. Editions Flammarion, Paris.
- MANDELBROT.B (1982)** « The Fractal Geometry of Nature. » New York: Freeman.
- MANDELBROT.B (1983)** « The fractal geometry of nature. » Edition W.II. Freeman, San Francisco, 461 pp.
- MOUROUX,P et MARGON, P et PINTE, J-C(1988)**«la construction économique sur les sols gonflants»;Mannels et méthodes, 14, BRGM, France.
- OUAZ. O (2014)** « Etude de la dégradation des grains sous les conditions climatiques : calcul de leur dimension fractale. » Mémoire de master en génie civil option Géotechnique et Environnement, LGEA, Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- 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.
- OUTAYEB.S (2016)** « Evaluation de la dégradation chimique des grains de schiste à l'aide de la notion de la dimension fractale. » Mémoire de Master académique en génie civil option Géotechnique et Environnement, LGEA, Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- PUISSANT.J (2015)** « Effets des changements climatiques sur la dynamique de décomposition microbienne du carbone organique du sol en prairie subalpine calcaire. » Thèse de Doctorat en Biodiversité et Ecologie, Université Grenoble Alpes.
- ROBERT. M, VENEAU. G et ABREU M. M (1987)** « Etudes microscopiques d'associations aluminium argiles ou fer-argiles » Micromorphologie des sols – soil Micromorphology, Proc. VII Int. Work. Meet. On Soil Micromorphology. N. Fedoroff and M. A. Courty, ed., France, A.F.E.S. 467- 474 (1987).
- ROBITAILLE. V et TREMBLAY. D (1997)** « Mécanique des sols, théorie et pratique » Edition Modulo, 1997, Canada.
- SECRIERU.C (2009)** « applications de l'analyse fractale dans le cas de ruptures dynamiques. » Thèse de Doctorat de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Spécialité "Mécanique et matériaux" en France.
- SERGEYRV.Y.M, OSIPOV.V.I, SOKOLOV.N, GRABOWSKA-OLZEWSKA (1978)** «types of microstructure of clayey soils.proc.3rd inter. cong. inter. assoc. of engineer. Geology, 1, section II.

**SOILLE. P et RIVEST. J-F (1996)** « On the validity of fractal dimension measurements in image analysis. » *Journal of Visual Communication and Image Representation*, vol. 7, p. 217–229.

**SUN. W, XU. G, GONG. P et LIANG. S (2006)** « Fractal analysis of remotely sensed images: A review of methods and applications » *International Journal of Remote Sensing*, vol. 27, no. 22, pp. 4963- 4990.

**TESSIER. D (1984)** « Étude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux: hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation » Thèse de doctorat, Institut national de la recherche agronomique, France.

**TOURET.R.O (1988)** «Structures des Argiles Hydratées, Thermodynamique de la Déshydratation et de la Compaction des Smectites ». Strasbourg, Université Louis Pasteur.

**TAYLOR R.k, Smith T.J.,(1986)** «The engineering geology of clay minerals: swelling shrinking and mudrock break down. *Clay minerals*, pp. 235-260.

**TECHOUANI NANA. J.M (1999)** « Cours de mécanique des sols. Tome 1, Propriété des sols » Institut Internationl d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement. Groupe EIER-ETSHER. **Terzaghi K.,(1926)**. The mechanics of adsorption and of the swelling of gels. Colloid symposium monograph, pp. 58-78, New York: Chemical Catalog Co.

**TERZIGHI K, PECK R.B., (1948)** «Soil mechanics in engineering practice» Wiley (New York).

**VAN OLPHEN.H, et KAROL, MYSELS.J** «Physical chemistry: enriching topics from colloid and surface science: a resources book for students and teachers of undergraduate courses in physical chemistry »International Union of Pure and Applied Chemistry. Commission I.6: Colloid and Surface Chemistry.

**VINCENT.M, COJEAN.R, FLEUREAU.J.M, CUI.Y.J et al. (2009)** « Rapport desynthèse final du projet ARGIC (Analyse du retrait/gonflement et de ses Incidences sur les Constructions) » R Projet ANR-05-PRGCU- 005. Rapport BRGM/RP- 57011- FR en partenariat entre le Centre de Géosciences, le BRGM, le LMSSMat, leCERMES, Fondasol, l'INERIS, le LAEGO, l'INRA, le LGCIE, le LCPC, Météo- France, le GHYMAC et l'Université de Poitiers.

**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.

**YAHIA-AISSA. M (1999)** « Comportement hydromécanique d'une argile gonflante fortement compactée. » Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts etChaussées, CERMES, Paris.

**YEZLI. S (2011)** « influence de la dimension fractale sur les caractéristiques mécaniques des matériaux. » Mémoire de magister en génie civil option Géotechnique et Environnement, LGEA, Université mouloud Mammeri de Tizi- Ouzou.

**Les sites d'internet utilisés :**

[http://www.andi.dz/PDF/monographies/Tizi\\_ouzou.pdf](http://www.andi.dz/PDF/monographies/Tizi_ouzou.pdf)

[http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers15-04/16383.pdf](http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers15-04/16383.pdf)

[http://laurie.bougeois.free.fr/cours/Mineraux\\_argileux.pdf](http://laurie.bougeois.free.fr/cours/Mineraux_argileux.pdf)

<https://www.scribd.com/document/273429801/Gonflement-Libre>

<http://macsancho.wordpress.com/>

<http://www.mathcurve.com/courbes2d/tautochrone/tautochrone.shtml>

<http://www.dmae.upm.es/cursofractales/capitulo1/3.html>

<http://www.gride.no/publication>