

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMÉRI DE TIZI-OUZOU

FACULTÉ DE GÉNIE DE LA CONSTRUCTION

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

Laboratoire Géo matériaux, Environnement et Aménagement (*LGEA*)



*MÉMOIRE DE MASTER 2 RECHERCHE*

*Spécialité : Génie Civil*

*Option : Géotechnique et Environnement*

*Thème*

*Etude de la fissuration des marnes sous  
conditions climatiques par la notion de  
dimension fractale*

Réalisé par :

*Mr OUAKIF TOUFIK*

Encadré par

*Mme BOUZEBODJA .A*

Promotion LMD : 2016/2017

## ***REMERCIEMENTS***

Au premier lieu, je remercie le bon Dieu qui m'a donné la force de poursuivre ce travail et de surmonter les difficultés rencontrées.

Mes remerciements les plus sincères pour mon promotrice M<sup>m</sup> BOUZBOUDJA .A enseignante à l'Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, pour avoir bien voulu accepter de m'encadrer, et pour ses orientations.

Je tiens également à remercier Mr BENAZZOUG Mouloud, Maître de Conférences (B) à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (U.M.M.T.O), qui m'a honoré d'avoir accepté de présider le jury de soutenance du présent mémoire

J'adresse mes plus vifs remerciements à Melle BOUBRIT Hassiba, Maître Assistante A à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (U.M.M.T.O) d'avoir accepté de juger mon travail.

Toutes mes considérations pour les membres du laboratoire LGEA et à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation ainsi tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

Mes vifs remerciements à Mr LACHEBI Kamel, responsable du laboratoire de recherche (LGEA) et mon camarade ZETTA Madani, pour leur disponibilité et leur aide durant la partie expérimentale de ce travail.

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mon père Mohammed ;*

*Ma mère Fatima ;*

*Ma grand-mère Ouardia ;*

*Mes frères, Abdenour, Abderrahmane ;*

*Ma sœur, Nadjia et ma nièce nada ;*

*Mon cher ami Mamou ;*

*A toute ma Famille :*

# Sommaire

**Remercîment**

**Dédicace**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Liste des symboles et notations**

**Référence bibliographique**

Introduction générale.....1

## Chapitre I : fractal et la dimension fractale

I-	INTRODUCTION .....	3
II-	L'ORIGINE DES FRACTALES .....	3
III-	DEFINITION D'UNE FRACTALE.....	4
IV-	CARACTÉRISTIQUE D'UN OBJET FRACTAL .....	4
v-	LES FRACTALES DANS LA NATURE.....	5
V-1	les fractales en biologie végétale.....	5
V-2	les fractales en morphologie animale.....	7
V-3	Les fractales en anatomie.....	8
V-4	Les fractales se retrouvent également en géologie.....	9
VI-	NOTION DE DIMENSION .....	11
VI-1	Dimension fractale .....	11
VI-2	Dimension euclidienne ou topologique .....	12
VI-3	Définition mathématique de la dimension fractale .....	13
VI-4	Vérification avec la dimension classique.....	14
VII-	CONCLUSION .....	14

## Chapitre II : les méthodes de calcul de la dimension fractale

I-	INTRODUCTION.....	15
II-	METHODES UTILISEES POUR LE CALCUL DE LA DIMENSION FRACTALE D'UN GRAIN DE SOL .....	16
II-1	Méthode de comptage des Boites (Box Counting) .....	16

II-2	Line Divider (méthode du diviseur)	18
II-3	Surface-Périmètre (Area-Perimeter)	20
II-4	méthode des lignes parallèles (Kévin. P. Hammer., 2005)	22
II-5	méthode des masses	23
III-	CONCLUSION	24

### Chapitre III : Généralité sur les sols et leurs problèmes

I-	INTRODUCTION	25
II-	ORIGINE DES SOLS	25
III-	LES MECANISMES DE LA METEORISATION	25
IV-	TRANSPORT ET DEPOTS	25
V-	PROPRIETES PHYSIQUES DES SOLS	26
V-1	Définition des sols	26
V-2	Éléments constitutifs d'un sol	26
VI-	LES DESORDRES DANS LES SOLS	27
VII-	GENERALITES SUR LES ARGILES	29
VII-1	Structure des argiles	29
VII-2	Les minéraux argileux	30
VII-3	Famille minéralogique	30
VII-4	Identification des minéraux argileux dans un sol	31
VIII	GENERALITES SUR LES MARNES	32
VIII-1	Origine	32
VIII-2	Définition des marnes	33
VIII-3	Les différents types de marnes	33
VIII-4	Genèse des marnes	35
VIII-5	Caractéristiques des marnes	35
VIII-6	L'altération des marnes	37
IX-	CONCLUSION	37

## Chapitre IV : Essais d'identification

I-	INTRODUCTION .....	38
II-	SITES DE PRELEVEMENT DES MATERIAUX ETUDIES .....	38
III-	CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET MINERALOGIQUES .....	39
III-1	Teneur en eau naturelle W % (NF P 94 – 050) – Méthode par étuvage .....	39
III-2	Masse volumique des grains solides des sols $q_{s\text{selon}}$ (NF P 94 – 054) – Méthode au pycnomètre .....	40
III-3	Limites d'Atterberg (NF P 94 – 051).....	41
III-4	Valeur au bleu de méthylène (VBS) (NF P 94 – 068) – Essai à la tâche.....	46
III-5	Analyse granulométrique par sédimentométrie .....	48
III-6	L'activité AC.....	52
III-7	Mesure du potentiel de gonflement .....	53
III-8	Mesure du potentiel de retrait .....	54
III-9	Analyse minéralogique .....	56
IV-	CONCLUSION.....	57

## Chapitre V : Etude des effets climatiques au laboratoire

I-	INTRODUCTION .....	58
II-	PREPARATION DES ECHANTILLONS .....	58
III-	ESSAI GEL/DEGEL (norme NF-EN 1367-1) .....	59
III-1	La gélifraction.....	59
III-2	Principe de l'essai.....	59
III-3	Appareillage .....	60
III-4	Déroulement d'essai .....	60
III-5	Les images échantillons durs tout l'essai .....	61
III-6	Interprétation des résultats.....	66
IV-	ESSAI DE DEGRADABILITE (norme NF P 94-067) .....	66
IV-1	But d'essai.....	66
IV-2	Appareillage et matériel d'essai .....	66

IV-3 Déroulement d`essai.....	66
IV-4 Les déférentes figures obtenus ou coures de cet assai.....	68
IV-5 Interprétations des résultantes .....	76
V- CONCLUSION.....	76

## Chapitre VI : calcul de la dimension fractale

I- INTRODUCTIO .....	77
II- DETERMINATION DE LA DIMENSION FRACTALE PAR LA METHODE DE BOX COUNTING .....	77
III- LES RESULTATS DE LA DIMENSION FRACTALE	78
III-1 Gel-dégel .....	78
III-2 Dégradabilité .....	80
IV- CONCLUSION.....	83
CONCLUSION GENERALE .....	84

# Listes des figures

## Chapitre I :

Figure I-1: les branches d'un arbre.....	5
Figure I-2: l'inflorescence.....	6
Figure I-3: les nervures des feuilles.....	6
Figure I-4: coquillage.....	7
Figure I-5 : triangles de Sierpinsky.....	7
Figure I-6: éponge de mer.....	7
Figure I-7 a : les poumons.....	8
Figure I-7 b: l'intestin grêle.....	8
Figure I-8 : les côtes des pays.....	9
Figure I-9 : les montagnes.....	9
Figure I-10: flocon de neige.....	10
Figure I-11: les fleuves.....	10
Figure I-12: Pavages des lignes, surfaces ou volumes.....	11
Figure I-13: Illustration du rapport entre dimensions fractale et euclidienne.....	11
Figure I-14: Mesure par comptage des boîtes dans un espace euclidien.....	12
Figure I-15 : les 3 dimensions entières.....	13

## Chapitre II :

Figure II-1 : a) un exemple d'un grain de sable photographié d'une surface de 31.06 mm <sup>2</sup> b) l'image binaire est obtenue après l'analyse d'image.....	15
Figure II-2 : Application de la dimension fractale par (box-counting).....	17
Figure II-3 : Droite de la dimension fractale par la méthode des boites.....	17
Figure II-4 : Différentes étapes de maillage de l'image du grain.....	17
(Illustration de la méthode de Box Counting).	

Figure II-5:(a) le grain de sable après l'analyse de l'image. Le reste des figures contient les polygones tracés sur grains avec une taille de mesure (b) 2 mm. (c) 1 mm et (d) 0.25mm.....	19
Figure II-6:calcul de la dimension fractale (a) Totale (b) Texturale (D1) et structurale (D2).....	20
Figure II-7: Calcul du périmètre et de la surface d'un grain ( $\Phi= 6.3$ mm) à l'aide de logiciel Auto-CAD 2009. (BouzboudjaAldjia 2016).....	20
Figure II-8: Application de la méthode de area –Perimeter d'un gros grain de sable d'origine d'une pierre calcaire.....	22
Figure II-9 : Schéma représentant la méthode des parallèles.....	23
Figure II-10 :Courbe de la dimension fractale de la méthode des lignes parallèle.....	23
Figure II-11 : détermination de la dimension fractale DFr par la méthode des masses..	24

### **Chapitre III :**

Figure III-1 : Risque à prendre en compte lors de la construction (Freeah 2006).....	28
Figure III-2: Cisaillement au niveau des nœuds ( <i>DerricheZet al.2002</i> ).....	28
Figure III-3 : Dégradation des routes et des chaussées d'après (Freeah, 2006 et Jennings, 1962).....	29
Figure III-4 : Abaque de plasticité de Casagrande et position des minéraux argileux les plus connus.....	32
Figure III-5 : la marne bleue.....	34
Figure III-6 : marne gréseuse vin Trias-Neffies.....	34
Figure III-7 : marnes noires (grise souris) l'Oxfordien.....	34
Figure III-8 : la marne grise de M'douha.....	34

### **Chapitre IV :**

Figure IV-1 : centre ville de Tizi-Ouzou.....	38
Figure IV-2 : Lieu de prélèvement de marne 1.....	39
Figure IV-3 : Lieu de prélèvement de marne2.....	39

Figure IV-4: Les étapes de l'essai au pycnomètre.....	40
Figure IV-5:Coupelle de casagrande.....	41
Figure IV-6: Détermination de la limite de liquidité.....	42
Figure IV -7 : graphe de limite de liquidité de la marne 1.....	43
Figure IV -8 : graphe de limite de liquidité de la marne 2.....	43
Figure IV -9 : graphe de limite de liquidité des deux marnes étudiées.....	44
Figure IV-10: Etape de la limite de plasticité.....	44
Figure IV-11: Matériel d'essai au bleu de méthylène –Essai à la tâche.....	46
Figure IV-12 : teste au bleu négatif.....	47
Figure IV-13 : test au bleu positif.....	47
Figure IV-14 : déroulement de l'essai au bleu de méthylène.....	47
Figure IV-15: Résultats de l'essai à la tâche sur les différents sites étudiés.....	47
Figure IV-16 : étapes préparation de la prise d'essai pour la sédimentométrie.....	50
Figure IV -17 : courbe d'analyse granulair de la marne 1.....	51
Figure IV -18: courbe d'analyse granulair de la marne 2.....	51
Figure IV -19 : courbe d'analyse granulair des deux marnes.....	52
Figure IV-20: potentiel de retrait d'après Building Research Establishment.....	55
Figure IV-21 :Diffractogramme aux rayons X de l'échantillon M1.....	56
Figure IV-22 :Diffractogramme aux rayons X de l'échantillon M2.....	57

## **Chapitre V :**

Figure V-1 : préparations des échantillons.....	58
Figure V-2 : l'effet de gel dans la nature.....	59
Figure V-3 : enceinte climatique.....	60
Figure V-4 : échantillon 1 de la marne 1 avant l'étuvage.....	61
Figure V-5 : échantillon 2 de la marne 1 avant l'étuvage.....	61
Figure V-6 : échantillon 1 de la marne 1 après l'étuvage.....	61
Figure V-7 : échantillon 2 de la marne 1 après l'étuvage.....	62

Figure V-8 :échantillon 1de la marne 2 apprit l'étuvage.....	62
Figure V-9: échantillon 2 de la marne 2 apprit l'étuvage.....	62
Figure V-10 : marne 2 après 5 cycles de gel/dégel.....	63
Figure V-11 : marne 1 après 5 cycles de gel/dégel.....	63
Figure V-12 : échantillon 1 de la marne 1 a la fin de l'essai gel/dégel.....	63
Figure V-13 : échantillon 2 de la marne 1 a la fin de l'essai gel/dégel.....	64
Figure V-14 : échantillon 1 de la marne 2 a la fin de l'essai gel/dégel.....	64
Figure V-15 : échantillon 2 de la marne 2 a la fin de l'essai gel/dégel.....	64
Figure V-16 :Variation des masses des échantillons durant l'essai de Gel/Dégel.....	65
Figure V-17 : mouillage des échantillons a l'aide d'une Seraing.....	67
Figure V-18 : echantillon 1 marne 1 avant essai.....	68
Figure V-19 : echantillon 2 marne 1 avant essai.....	68
Figure V-20 : echantillon 1 marne 2 avant essai.....	68
Figure V-21 : echantillon 2 marne 2 avant essai.....	69
Figure V-22 : echantillon 1 marne 1 après 1 <sup>er</sup> cycle.....	69
Figure V-23 : echantillon 2 marne 1 près 1 <sup>er</sup> cycle.....	69
Figure V-24: echantillon 1 marne 2 après 1 <sup>er</sup> cycle. ....	70
Figure V-25 : echantillon 2 marne 2 après 1 <sup>er</sup> cycle. ....	70
Figure V-26 : echantillon 1 marne 1 après 2 <sup>em</sup> cycle.....	70
Figure V-27 : echantillon 2 marne 1 après 2 <sup>em</sup> cycle.....	71
Figure V-28: echantillon 1 marne 2 après 2 <sup>em</sup> cycle.....	71
Figure V-29 : echantillon 2 marne 2 après 2 <sup>em</sup> cycle.....	71
Figure V-30 : echantillon 1 marne 1 après 3 <sup>em</sup> cycle.....	72
Figure V-31 : echantillon 2 marne 1 après 3 <sup>em</sup> cycle.....	72
Figure V-32 : echantillon 1 marne 2 après 3 <sup>em</sup> cycle.....	72

Figure V-33 : échantillon 2 marne 2 après 3 <sup>em</sup> cycle.....	73
Figure V-34 : échantillon 1 marne 1 après 4 <sup>em</sup> cycle.....	73
Figure V-35 : échantillon 2 marne 1 après 4 <sup>em</sup> cycle.....	73
Figure V-36 : échantillon 1 marne 2 après 4 <sup>em</sup> cycle.....	74
Figure V-37 : échantillon 2 marne 2 après 4 <sup>em</sup> cycle.....	74
Figure V-38 :Variations des masses des échantillons en fonction des cycles.....	75

## **Chapitre VI :**

Figure VI-1 : Les différentes étapes de calcul de la dimension fractale par le logiciel MATLAB.....	77
Figure VI-2 : histogramme desresultats de la dimension fractal de marne 1 avant l’essai..	78
Figure VI-3 : histogramme desresultats de la dimension fractal de marne 1 après l’essai..	79
Figure VI-4 : Histogramme des resultats de la dimension fractal de marne 2 avant l’essai..	79
Figure VI-5 : histogramme des resultats de la dimension fractale de marne 2.....	80
Figure VI-6 : histogramme desresultats de la dimension fractal horizontal de marne 1.....	81
Figure VI-7 : histogramme desresultats de la dimension fractal Vertical de marne 1.....	81
Figure VI-8 : histogramme desresultats de la dimension fractal horizontal de marne 2.....	82
Figure VI-9 : histogramme desresultats de la dimension fractal Vertical de marne 2.....	83

## Liste des tableaux

### Chapitre III :

Tableau III-1: Classification courante des roches selon la teneur en carbonate et en argile.36

### Chapitre IV :

Tableau IV-1 : caractéristique des carottages des matériaux étudiés. ....	39
Tableau IV-2 : Détermination de la teneur en eau naturelle.....	40
Tableau IV-3: Masse volumique des grains solides.....	41
Tableau IV-4 : limite de liquidité moyenne de la marne étudiée.....	42
Tableau IV-5 : Limites de plasticité des marnes étudiées.....	44
Tableau IV-6: classification selon l'indice de plasticité.....	45
Tableau IV-7: l'indice de plasticité des marnes étudiées.....	45
Tableau IV-8 : Etat de consistance référentielle d'un sol.....	46
Tableau IV-9 : Indice de consistance pour les 2 marnes.....	46
Tableau IV-10: Désignation du sol en fonction de son VBS.....	48
Tableau IV-11 : Résultats des valeurs au bleu de méthylène.....	48
Tableau IV-12 : résultat de l'analyse granulométrique de marne 1.....	50
Tableau IV-13 : résultat de l'analyse granulométrique de marne 2.....	51
Tableau IV-14: Activité de Kempton pour les 2 sites.....	52
Tableau IV-15 :Evaluation du potentiel de gonflement à partir de l'indice de plasticité (D'après Mouroux et al ,1988).....	53
Tableau IV-16 :Résultats du potentiel de gonflement à partir de l'indice de plasticité (D'après Mouroux et al ,1988).....	53
Tableau IV-17 :Degré d'expansion en fonction de limite de liquidité et l'indice de plasticité (D'après Snethen et al ,1977).....	54

Tableau IV-18 :Résultats de Degré d'expansion en fonction de limite de liquidité et l'indice de plasticité (D'après Snethen et al ,1977).....	54
Tableau IV-19 :Evaluation du potentiel de retrait à partir de l'indice de plasticité.....	55
Tableau IV-20 : resultats finales pour les caractéristiques physiques.....	55

## **Chapitre V :**

Tableau V-1 : les masses des échantillons durent l'essai de gel/dégel.....	65
Tableau V-2 :Procédure de mouillage des échantillons. ....	67
<i>Tableau V-2</i> : Les masses des échantillons avant et après l'essai.....	74

## **Chapitre VI :**

Tableau VI-1 : resultats de la dimension fractal de marne 1 avant l'essai.....	78
Tableau VI-2 : resultats de la dimension fractal de marne 1 après l'essai.....	78
Tableau VI-3 : resultats de la dimension fractal de marne 2 avant l'essai.....	79
Tableau VI-4 : resultats de la dimension fractal de marne 2 après l'essai.....	79
Tableau V-5 : resultats de la dimension horizontal fractal de marne 1.....	80
Tableau V-6 : resultats de la dimension vertical fractal de marne 1.....	81
Tableau VI-7 : resultats de la dimension horizontal fractal de mar2.....	82
Tableau VI-8 : resultats de la dimension vertical fractal de marne .....	2.82

## **LISTE DES SYMBOLES ET NOTATIONS**

<i>Notation</i>	<i>Définition</i>
<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>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>w</sub></b>	Volume de l'eau (cm <sup>3</sup> ).
<b>R</b>	Lecture sur le pycnomètre.
<b>R'</b>	Lecture corrigée.
<b>D</b>	Diamètre des grains (mm).
<b>T</b>	Température de burette (°C).
<b>T'</b>	Température de la burette ambiante (°C).
<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>VB</b>	La valeur de bleu de sol.
<b>S</b>	
<b>Ms</b>	Masse sèche de la prise d'essai (g).

<b>M<sub>b</sub></b>	La masse de bleu permettant la saturation par adsorption (g).
<b>F2</b>	Proportion d'argile F2 % < 2 μm.
<b>Ac</b>	Activité de Skempton.
<b>DF<sub>R</sub></b>	Dimension fractale de rugosité.
<b>DF</b>	Dimension fractale.
<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>	Périmètre polygone (mm).
<b>D<sub>tot</sub></b>	Dimension totale de fractale.
<b>N<sub>r</sub> (F)</b>	le nombre de case couvrant l'objet fractal
<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>P(ε)</b>	nombre d'éléments de longueur ε, nécessaires pour diviser le segment de longueur ε <sub>0</sub> .
<b>ε<sub>0</sub></b>	longueur total de l'élément.
<b>ε</b>	longueur de l'élément divisé.
<b>D</b>	dimension du support de l'espace dans lequel est inscrit l'élément de taille ε <sub>0</sub> .
<b>M1</b>	Marne prélevé d'Avenue Abane Ramdane (l'OPGI Bloc 17)
<b>M2</b>	Marne prélevé de Rue Lamali Ahmed (CHU Nedir Mohamed)

# INTRODUCTION GENERALE

L'essentiel des matériaux exploités en génie civil sont d'origine alluvionnaire qui sont des ressources limitées, dans le but de mettre en place des solutions de remplacement en diversifiant les origines et de s'orienter vers les gisements de roches massives (roches magmatiques ou métamorphiques) qui existent en Algérie à grande échelle surtout dans la région de Tizi-Ouzou. Parmi eux les marnes ; qui sont universellement répandues dans la nature et entrent dans de nombreux domaines de l'activité humaine, elles sont omniprésentes sous bien des formes et des natures différentes dans notre environnement.

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. Pour cela, il faut tenir compte de plusieurs facteurs à savoir : les conditions climatiques et leurs changements cycliques, etc.

L'altération des roches est un processus géologique majeur introduit par la nature avec ses changements cycliques. Le but de notre étude est de montrer l'influence de cette dernière sur la dégradation des roches en effectuant une série d'essai (Gel/dégel et Dégradabilité).

Les résultats de notre recherche seront basés sur le calcul de la dimension fractale qui est une notion généralisée de la dimension euclidienne qui permet d'évaluer la forme, la nature, et la taille des grains.

Le mémoire est subdivisé en six chapitres :

**Le chapitre I** est consacré aux généralités sur les caractéristiques d'un objet fractal et la définition de la dimension fractale.

**Le chapitre II** regroupe quelques méthodes de calcul de la dimension fractale appliquées en Génie Civil et celle utilisée dans ce travail.

**Le chapitre III** regroupe les généralités sur le matériau utilisé (la marne).

**Le chapitre IV** est consacré à l'identification des matériaux utilisés, les différents essais réalisés au laboratoire, leurs modes opératoires et leur importance.

**Le chapitre V** est consacré à l'étude de l'influence des effets climatiques sur la marne en interprétant les images des échantillons avant et après les essais de gel-dégel et de dégradabilité.

Le dernier **Chapitre VI** est consacré au calcul de la dimension fractale en utilisant la méthode de Box Counting et à l'interprétation des résultats obtenus.

***Chapitre I :***

***Fractal est la dimension fractale***

## I- INTRODUCTION

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.

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 ».

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 XIX<sup>e</sup> siècle par des mathématiciens comme Cantor, Peano et les autres. 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 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, ni les montagnes des cônes, ni les îles des cercles et leur description nécessite une géométrisation adaptée.

## II-L'ORIGINE DES FRACTALES

Apparues au XIX<sup>e</sup> siècle, les fractales sont considérées comme des « curiosités » mathématiques jusqu'au milieu du XX<sup>e</sup> siècle. Elles n'acquièrent un statut à part entière que dans les années 1970, grâce au mathématicien français Benoît Mandelbrot, qui en fait l'objet d'une nouvelle discipline mathématique : la géométrie fractale, rendue populaire par son ouvrage *les Objets fractals : forme, hasard et dimension* (1975).

### III- DÉFINITION D'UNE FRACTALE

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

Une fractale peut être une forme géométrique, un objet, une réalité observable dans la nature comme les surfaces de rupture, le relief d'une montagne, un caillou ou la morphologie d'une plante (Mandelbrot, 1983), un model mathématique, tout ce la à la fois, etc. On peut utiliser le mot «fractale» comme l'adjectif pour qualifier une «réalité» ayant certaines ou toutes les propriétés des fractales.

L'extension de ce terme est très vaste mais il existe une caractéristique à la quelle toute les fractales se soumettent. Ce sont des réalités qui présentent une autosimilarité intrinsèque infinie. C'est-à-dire que peu importe l'échelle selon la quelle on les observe, elles présentent toujours un patron similaire à celui observé à plus grande et plus petite échelle. Autrement dit 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. Cette propriété est appelée aussi par les mathématiciens homothétie interne.

Généralement, on peut définir une fractale comme un objet géométrique composé de plusieurs sous-objets, c'est-à-dire, on peut le couper en petits bouts. Tel que la caractéristique globale de cet objet est similaire à la caractéristique locale de chacun des sous-objets (bouts). Un bon exemple qui présente cette définition c'est le chou-fleur qui est une très jolie fractale naturelle, chaque morceau que vous détachez présente la même structure que le tout et ainsi de suite.

### IV- CARACTÉRISTIQUES D'UN OBJET FRACTAL

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

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

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

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

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

## V- 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.

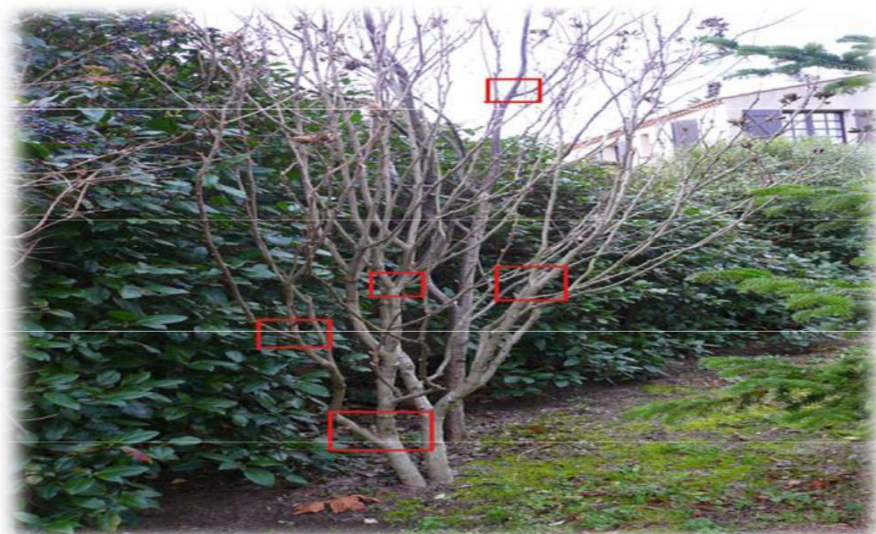
### V-1 LES FRACTALES EN BIOLOGIE VÉGÉTALE

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 :

#### Les ramifications des branches

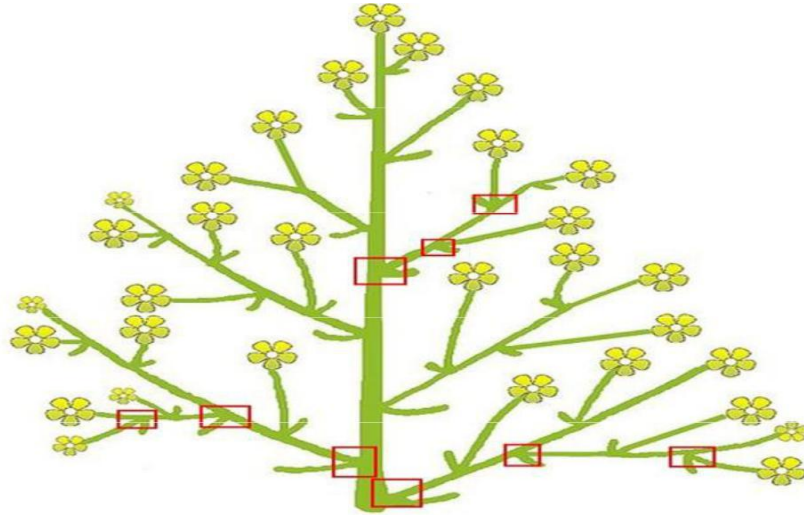
En regardant avec plus d'attention les branches d'un arbre, on peut discerner un schéma qui semble se répéter, même principe que l'autosimilarité pour les fractales.



**Figure I-1:** Les branches d'un arbre (OUTAYEB, S.2015).

### L'inflorescence

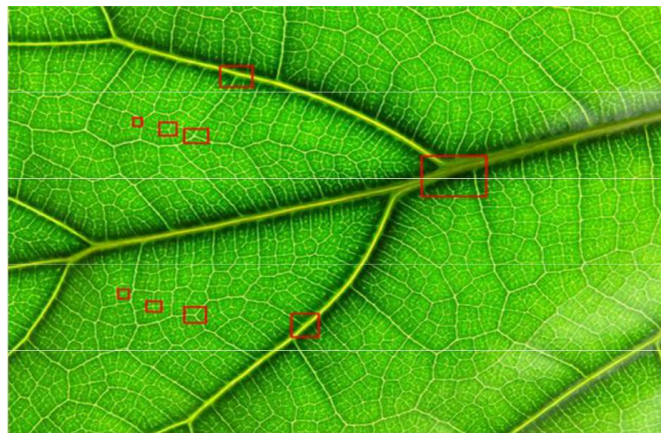
L'inflorescence est la disposition des fleurs sur la tige d'une plante à fleur. Le motif de disposition s'apparente à nouveau à celui d'une fractale.



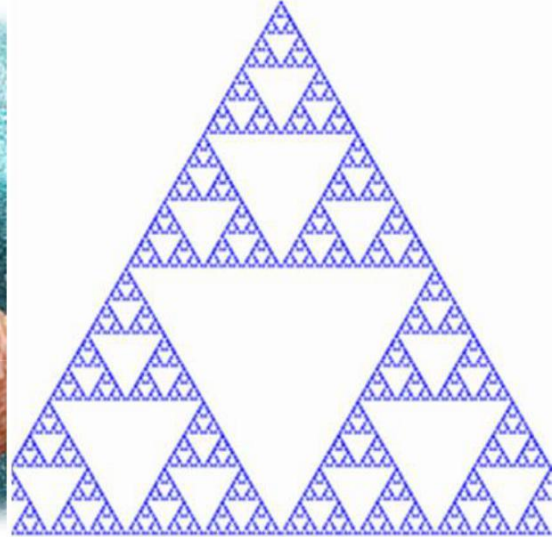
**Figure I-2:** L'inflorescence (OUTAYEB, S.2015).

### Les nervures des feuilles

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



**Figure I-3:** Les nervures des feuilles (OUTAYEB, S.2015).

**V-2 Les fractales en morphologie animale****Les coquilles****Figure I-4 : Coquillage****Figure I-5 : Triangles de Sierpinsky**

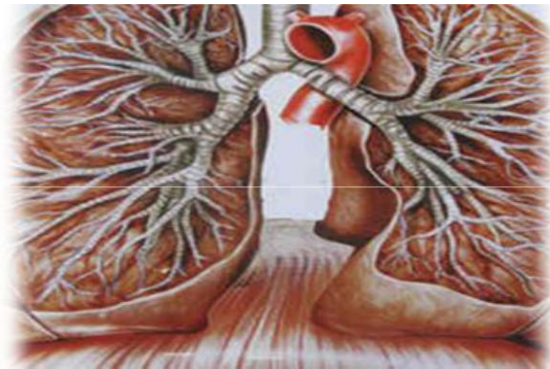
Ne trouvez-vous pas que les motifs sur le coquillage ressemblent aux triangles de Sierpinsky? Ce phénomène serait dû à deux types de molécules interviennent lors de la formation de ce coquillage. Ces motifs servent tout simplement de camouflage pour le coquillage.

**Les éponges de mer****Figure I-6: Éponge 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.

### V-3 Les fractales en anatomie

#### Les vaisseaux sanguins - exemple des poumons



**Figure I-7 a :** Les poumons (OUAAZ, O.2014).

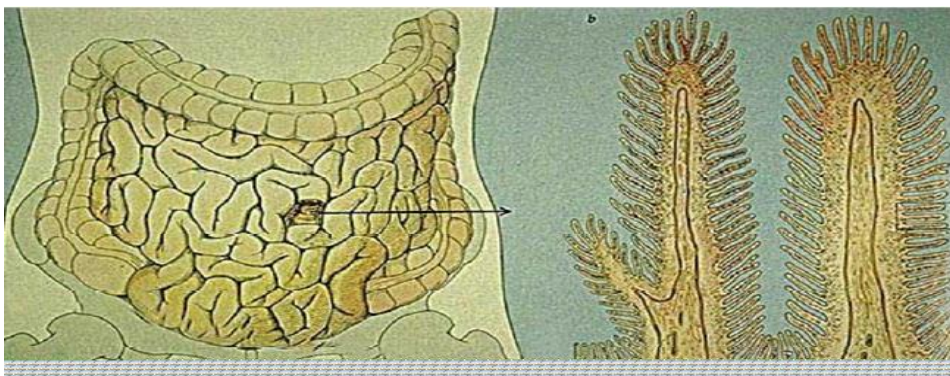
Les poumons sont basés sur le même schéma comme le montre la (figure I-7 a).

Cette structure arborescente peut à première vue nous faire penser à un objet fractal, observons un peu mieux, à 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 18 mm de diamètre à de petites ramifications de 0,5mm de diamètre.

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

#### 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-7 b:** L'intestin grêle (OUAAZ, O.2014).

#### V-4 Les fractales se retrouvent également en géologie

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

##### Les côtes des pays



Figure I-8 : Les côtes des pays.

##### Les Montagnes



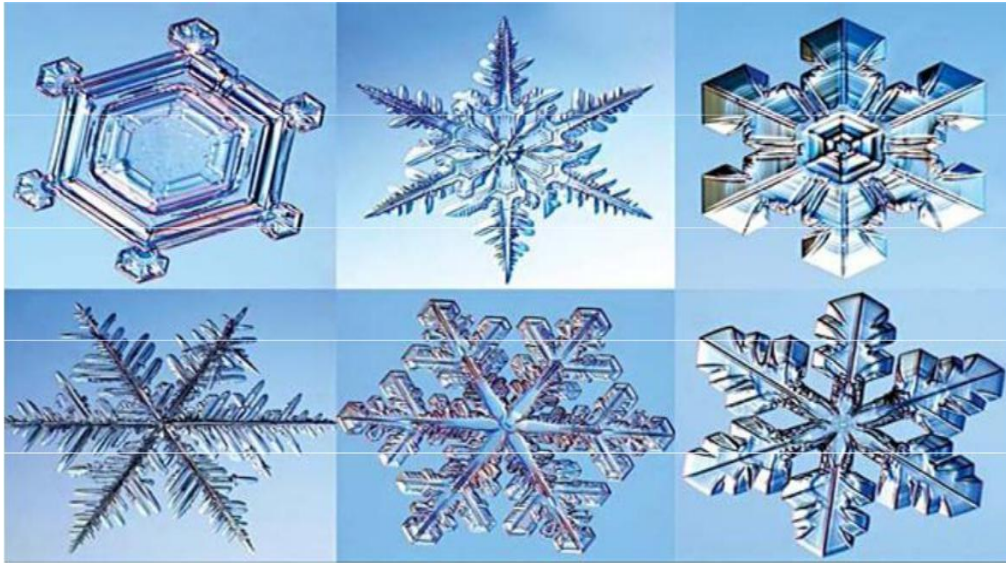
Figure I-9 : Les montagnes.

##### 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'agencent en formant une figure de symétrie d'ordre 6, du fait que les atomes de la molécule 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 fractal.



**Figure I-10:** Flocon de neige.

### **Les fleuves et cours d'eau**

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 et due a l'écoulement de l'eau, qui se fraye un chemin dans le paysage minéral de manière fractale. Ainsi un fleuve et ses affluents sont un exemple de la fractalité du monde géologique.

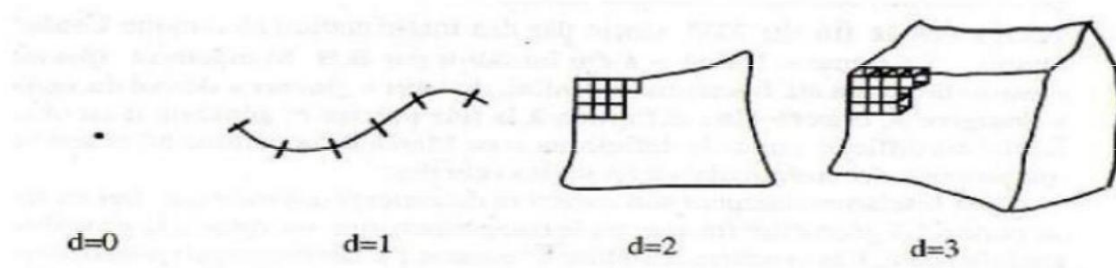
De plus, les tracés réalisés par les réseaux hydrographiques ont des formes de fractales.



**Figure I-11:** Les fleuves.

## VI- 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.

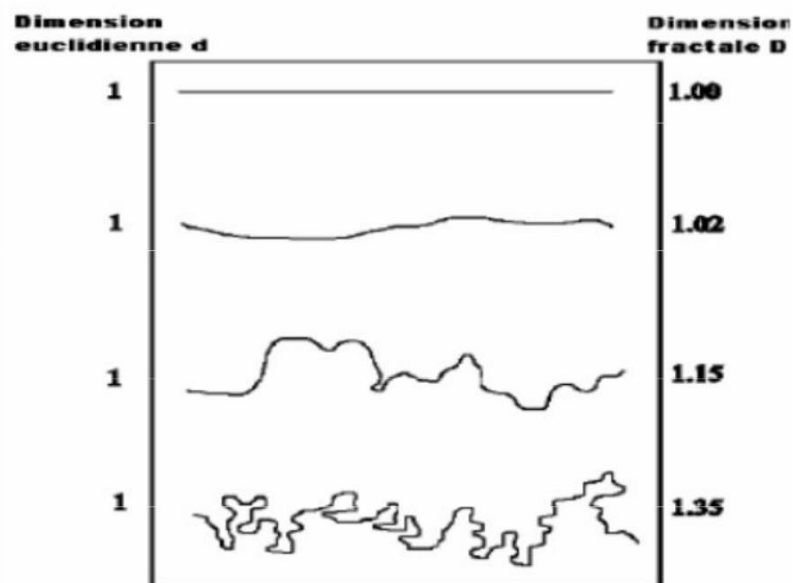


**Figure I-12:** Pavages des lignes, surfaces ou volumes

### VI-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-13:** Illustration du rapport entre dimensions fractale et euclidienne (Achir, M ,2011).

## VI-2 Dimension euclidienne ou topologique

En géométrie euclidienne, on travaille avec des dimensions entières 0, 1, 2, 3,...

Exemple : La dimension d'un point est zéro (0), une ligne droite a pour support un espace de dimension un (1), un plan est un espace de dimension deux (2), un volume est inscrit dans un espace de dimension trois (3).

On remarque qu'il existe un lien direct entre la dimension de l'objet étudié et son unité de mesure. Un objet de dimension deux se mesure en m<sup>2</sup> et un objet de dimension trois en m<sup>3</sup> 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 :

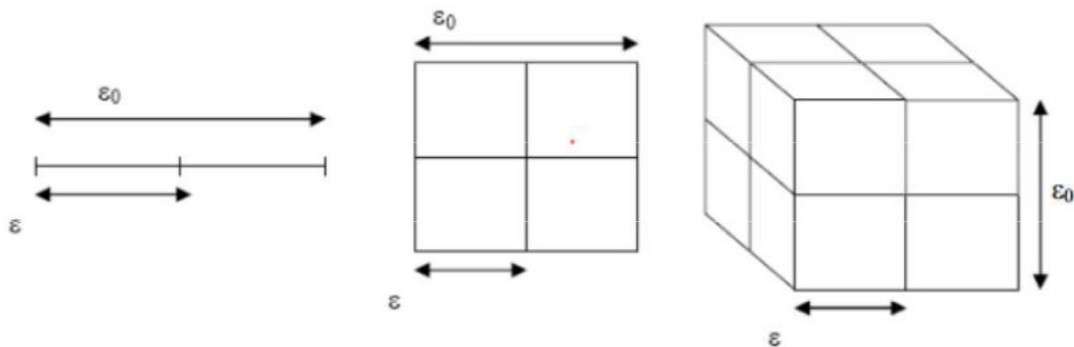
$$P(\varepsilon) = \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon}\right)^D \quad (\text{I. 1})$$

$p(\varepsilon)$  : 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-14:** 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  $\varepsilon_0$ .

$$a- D = 1 ; p(\varepsilon) = \left( \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \right)^1 = 2$$

$$b- D = 2 ; p(\varepsilon) = \left( \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \right)^2 = 4$$

$$c- D = 3 ; p(\varepsilon) = \left( \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \right)^3 = 8$$

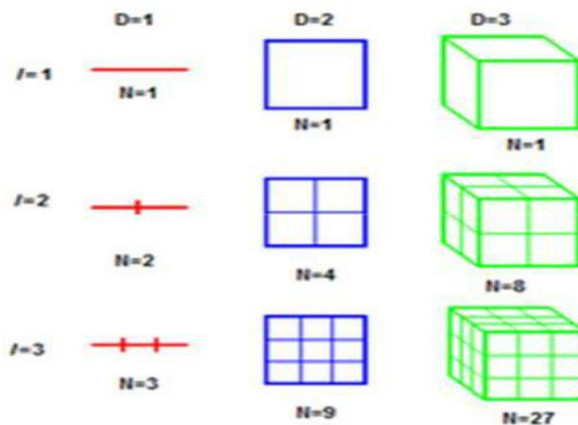


Figure I-15 : les 3 dimensions entières.

### VI-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 :

$$L(l) = \left( \frac{AB}{l} \right)^D \quad (\text{I.2})$$

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

$$n = \left( \frac{L}{l} \right)^D \quad (\text{I.3})$$

D'où

$$D = \frac{\ln L}{\ln \frac{1}{l}} \quad (I.4)$$

#### VI-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 :

$$n = \frac{c^2}{\left(\frac{c}{2}\right)^2} = 4 \quad (I.5)$$

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

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.

On retrouve bel et bien la dimension classique définie par Euclide.

#### VII- 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 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 est positif caractérisant la manière dont la masse ou la forme de l'objet est répartie dans l'espace.

Généralement plus la dimension fractale d'un objet est élevée, plus l'objet est irrégulier.

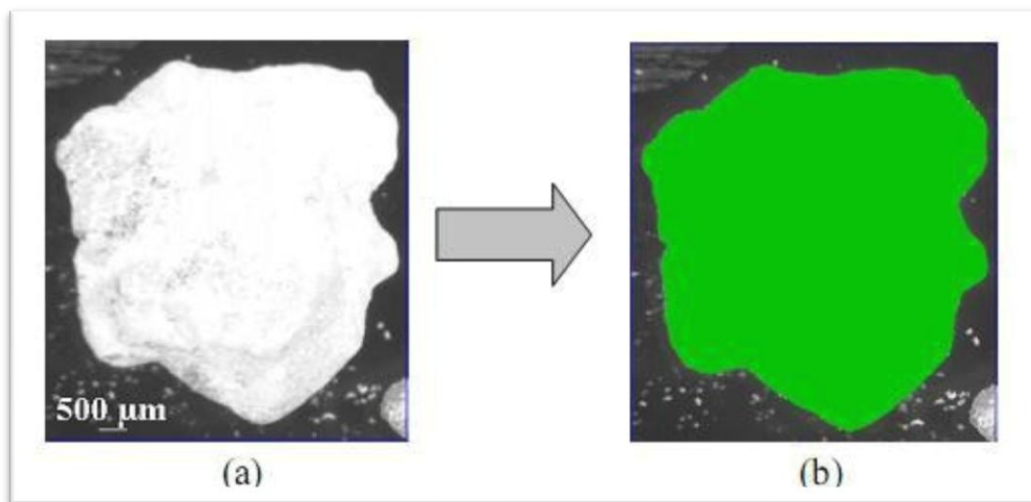
***Chapitre II :***

***Les méthodes de calcul de la dimension fractale***

## I-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 le calcul de la dimension fractale, il est nécessaire de déterminer le périmètre et la surface des grains. Pour cela des techniques d'analyse d'image sont utilisées après l'utilisation d'un microscope Lieca MZ-16 pour photographier les grains.

La technique d'analyse est simple, elle consiste à réaliser un seuillage de l'image grise jusqu'à un niveau raisonnable à fin d'extraire la surface du grain à partir du fond de l'image. Puis, appliquant un certain nombre d'opérations comprenant l'ouverture, fermeture, et remplissage en blancs, l'image binaire est obtenue comme une couche au-dessus de l'image grise (fig. II-1b). Cette image binaire est utilisée pour calculer la surface du grain.



**Figure II-1 :** a) Un exemple d'un grain de sable photographié d'une surface de  $31.06 \text{ mm}^2$   
b) l'image binaire est obtenue après l'analyse d'image.

## **II-METHODES UTILISEES POUR LE CALCUL DE LA DIMENSION FRACTALE D'UN GRAIN DE SOL**

### **II-1 Méthode de comptage des Boîtes (Box Counting)**

La méthode de comptage des boîtes est une méthode qui consiste à diviser l'image d'un grain en petit carré et de dimension identique (faire un maillage), ainsi le contour du grain qui passe par ces boîtes est compté, et on refait la même opération mais cette fois avec des boites de tailles décroissantes et ainsi de suite...

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

$$N(X > x) = Kx^{-DF} \quad (II.1)$$

$x$ : dimension des boîtes,  $N(X > x)$ : nombre de boites,  $k$  : constante et  $DF$  : dimension fractale (Huang et Zhan, 2002; Wang et Li, 2006)

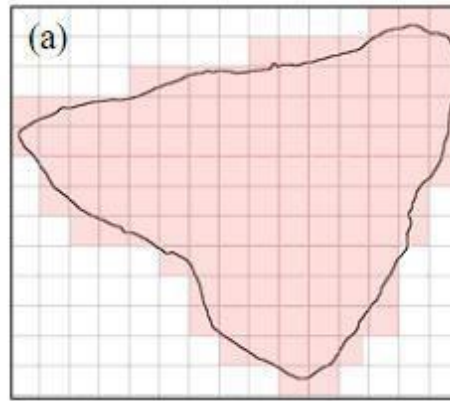
En traçant ces valeurs ; la taille des boîtes en fonction du nombre de boîtes dans un graphe logarithmique, la dimension fractale est obtenue suivant la pente la mieux adaptée à la ligne et peut être calculée par l'équation suivante :

$$DF = -m \quad (II.2)$$

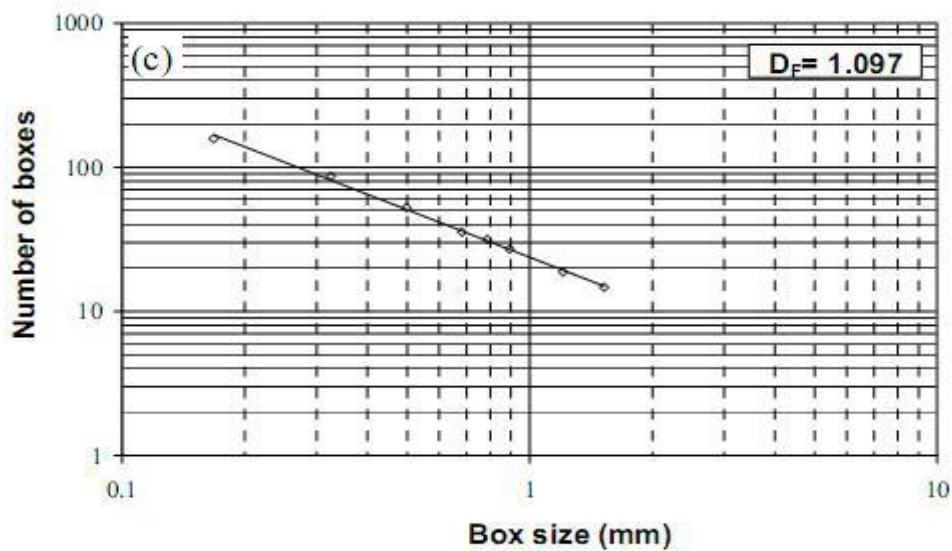
$m$ : l'exposant de la droite la mieux adaptée au nuage de points.

#### **❖ Exemple d'application**

Un exemple pour le même grain dans le paragraphe précédent est donné sur le schéma. Après la prise d'une photo du grain, on la couvre par une grille de longueur  $l$  prédéterminée. On calcule le nombre de carré entourant le périmètre du grain, et le nombre de carrés tracés en fonction de la longueur  $l$ . Ce processus sera répété pour un certain nombre de grain. La dimension fractale sera donc calculée pour chaque grain par le calcul de la pente dans un graphique logarithmique.



**Figure II-2 :** Application de la dimension fractale par (Box-Counting).



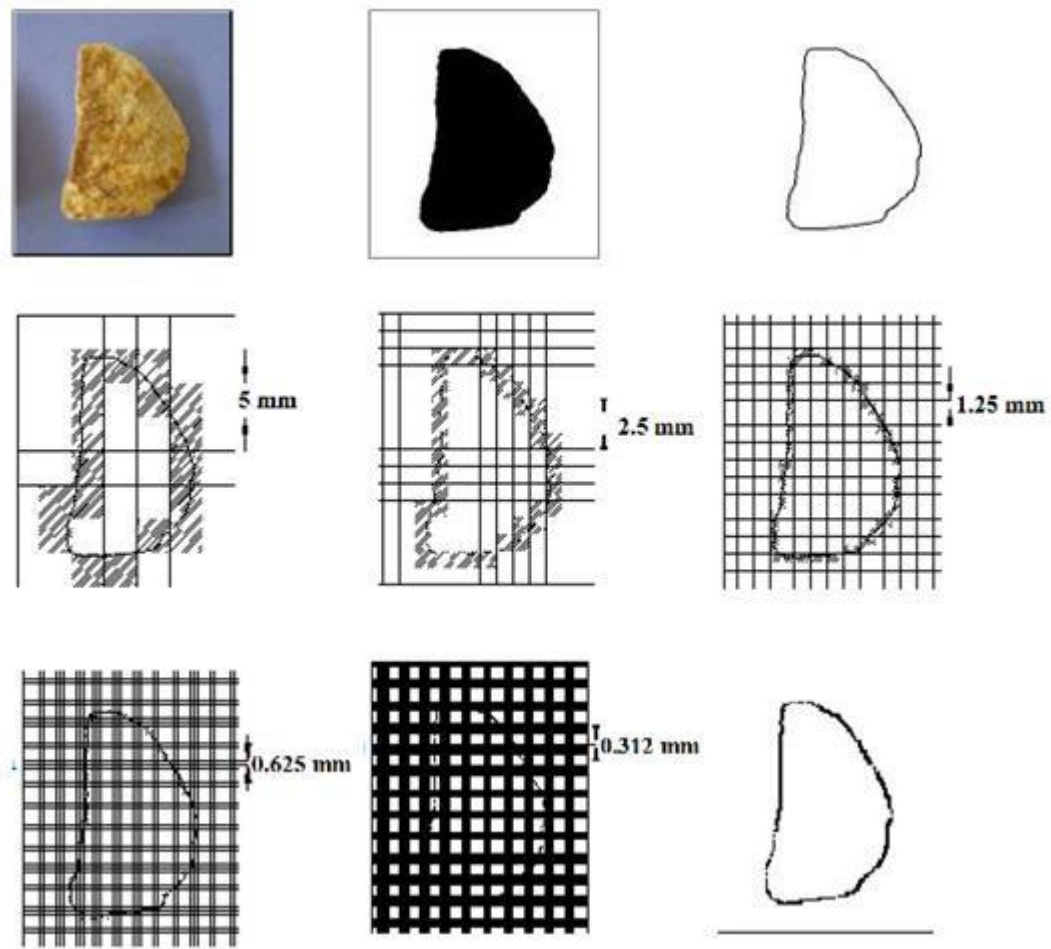
**Figure II-3 :** Droite de la dimension fractale par la méthode des boîtes.

La méthode de Box Counting (comptage des boîtes) peut être utilisée aussi de cette manière : En traçant des grilles avec une certaine longueur bien déterminée en dessus de notre objet fractal. La dimension fractale (DF) sera calculée ensuite en utilisant l'équation suivante:

$$DF = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\log Nr(F)}{-\log r} \quad (II.3)$$

Nr (F) est le nombre de case couvrant l'objet fractal et r est la longueur d'un côté de la case. Répétant le processus de Nr (F), en changeant à chaque fois la longueur de du côté de la case (r), donc r se rapproche de zéro. Les valeurs de Nr (F) et r seront tracées sur un graphe logarithmique pour dériver la dimension fractale, (Tricot, 1996).

❖ *Différentes étapes de maillage de l'image du grain (illustration de la méthode de Box Counting)*



**Figure II-4 :** Différentes étapes de maillage de l'image du grain (Illustration de la méthode de Box Counting).

**II-2 Line Divider (méthode du diviseur)**

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

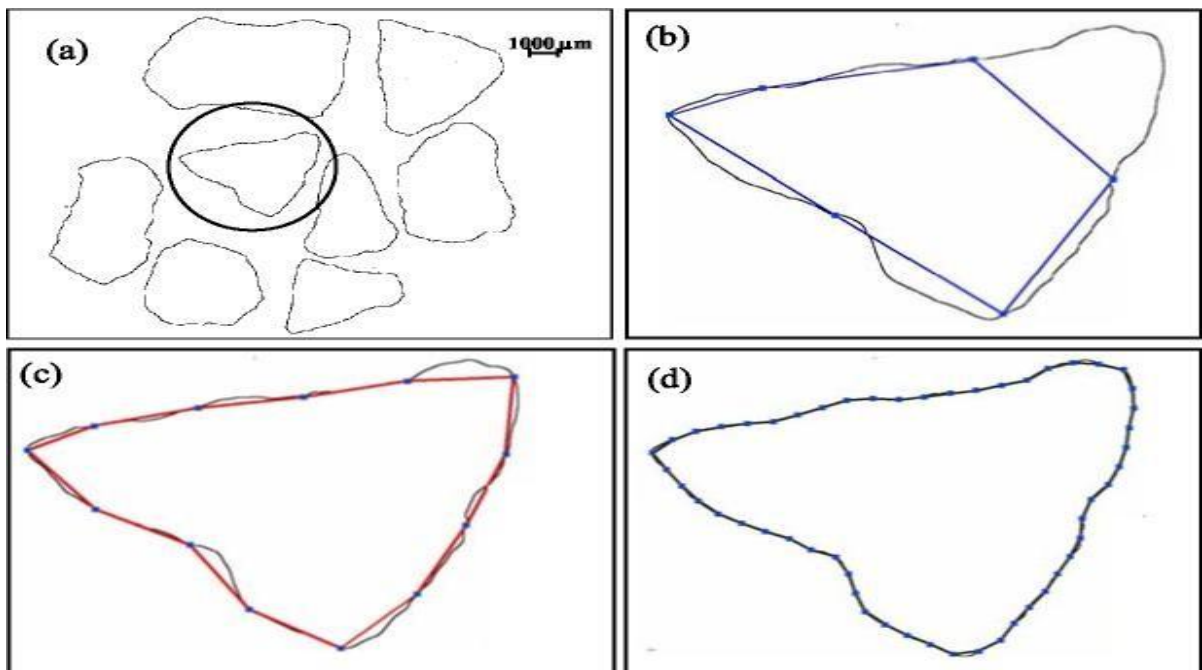
$$P(l) = nl^{1-D_R} \quad (II.4)$$

Dans cette équation,  $P(l)$  est le périmètre polygone,  $D_R$  est la dimension fractale du grain. On trace à l'aide du logiciel Excel le périmètre du polygone obtenu en fonction de l'unité de mesure ( $l$ ), la dimension fractale est alors liée à la pente  $m$ , de la meilleure ligne obtenue en utilisant les données de l'équation (II.4) et sera calculée

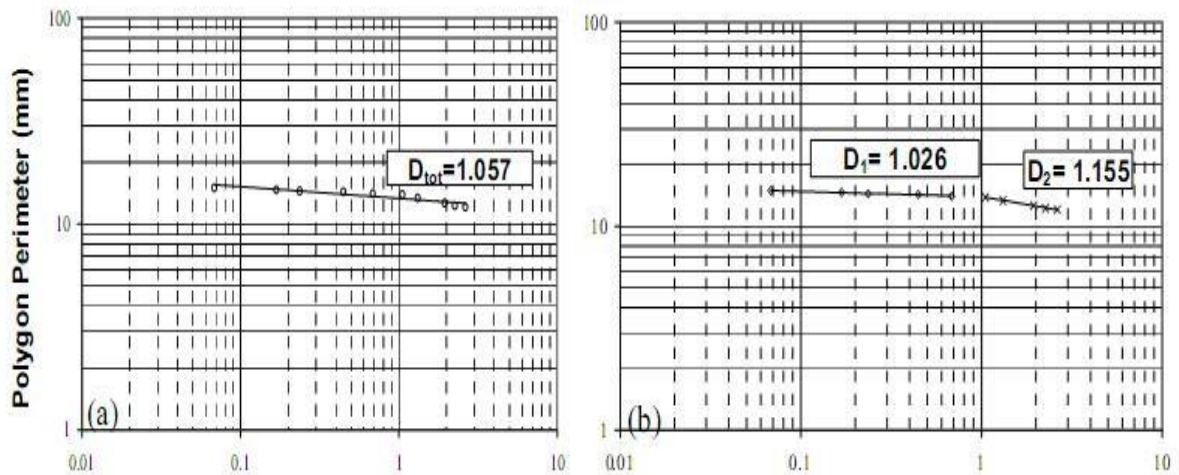
comme suit :

$$D_R = 1 - m \quad (II.5)$$

A partir de cette méthode, trois types de dimension fractale peuvent d'être déduits. La courbe P(l)-P(l) possède habituellement deux lignes de l'ajustement normal : Tandis que les polygones de plus petites tailles de mesure représentent la dimension « de texture » de fractale ( $D_1$ ), la ligne à la droite du point d'arrêt représente la dimension « structurale » de fractale ( $D_2$ ). La dimension totale de fractale ( $D_{tot}$ ) représente la ligne de l'ajustement normal aux points de repères entiers, qui ne concernent pas le point d'arrêt des tendances structurales et de textures. Voila un exemple d'application de cette méthode, prenant un grain simple donné dans la (Fig. II-5a), des polygones de mesures de différentes tailles sont tracer à l'intérieur du grain (Fig. II-5b, c, d). Tout le périmètre du grain obtenu est tracé en fonction de l'unité de mesure, afin de calculer les dimensions fractales.



**Figure II-5:**(a) Le grain de sable après l'analyse de l'image, le reste des figures contient les polygones tracés sur le grain avec une taille de mesure : (b) 2 mm, (c) 1mm et (d) 0.25mm.

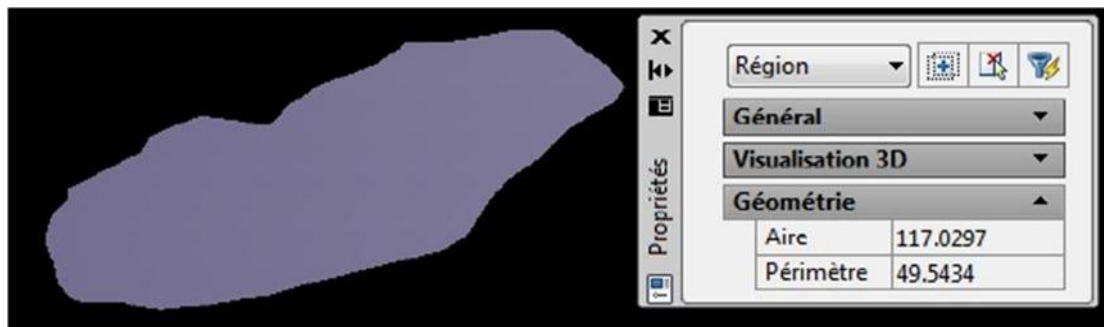


**Figure II-6:** Calcul de la dimension fractale (a) Totale (b) Texturale ( $D_1$ ) et structurale ( $D_2$ ).

### II-3 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-7:** Calcul du périmètre et de la surface d'un grain ( $\Phi = 6.3$  mm) à l'aide de logiciel Auto-CAD 2009 (Bouzeboudja. A, 2016).

## Chapitre II : les méthodes de calcul la dimension fractale

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 employée (Mandelbrot, 1983) :

$$c = \frac{P^{1/DF_R}}{A^{0,5}} \quad (\text{II. 6})$$

Dans cette équation :

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

P : est le périmètre du grain.

A : la surface du grain.

$DF_R$  : 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 cotes dans l'équation, on peut obtenir l'expression suivante :

$$\frac{1}{DF_R} \log P = \log (c\sqrt{A}) \quad (\text{II. 7})$$

D'où l'on tire  $\log P$  par l'expression :

$$\log P = \frac{DF_R}{2} (\log c^2 + \log A) \quad (\text{II. 8})$$

En posant  $K = 18 \log C$ , l'équation suivante est obtenue :

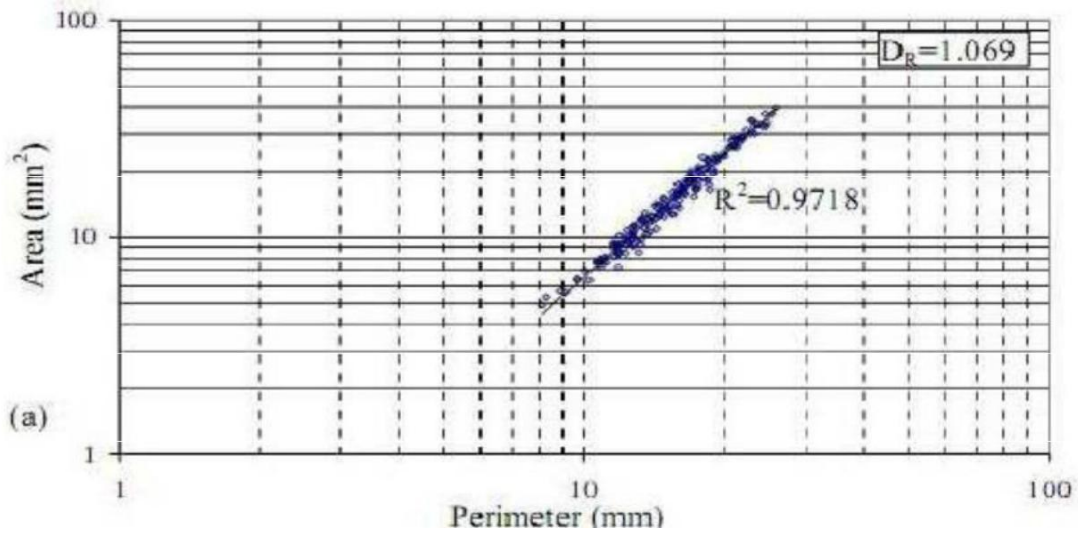
$$\log P = K + \frac{DF_R}{2} (\log A) \quad (\text{II. 9})$$

Dans l'équation, la pente de la ligne d'ajustement normal d'Area-Perimeter est égale à  $2/DF_R$ , la dimension fractale ( $DFR$ ) est ensuite calculée par le rapport :

$$DF_R = 2/m \quad (\text{II.10})$$

Cependant, ce modèle ne peut pas déterminer la dimension fractale pour les grains de sol séparément.

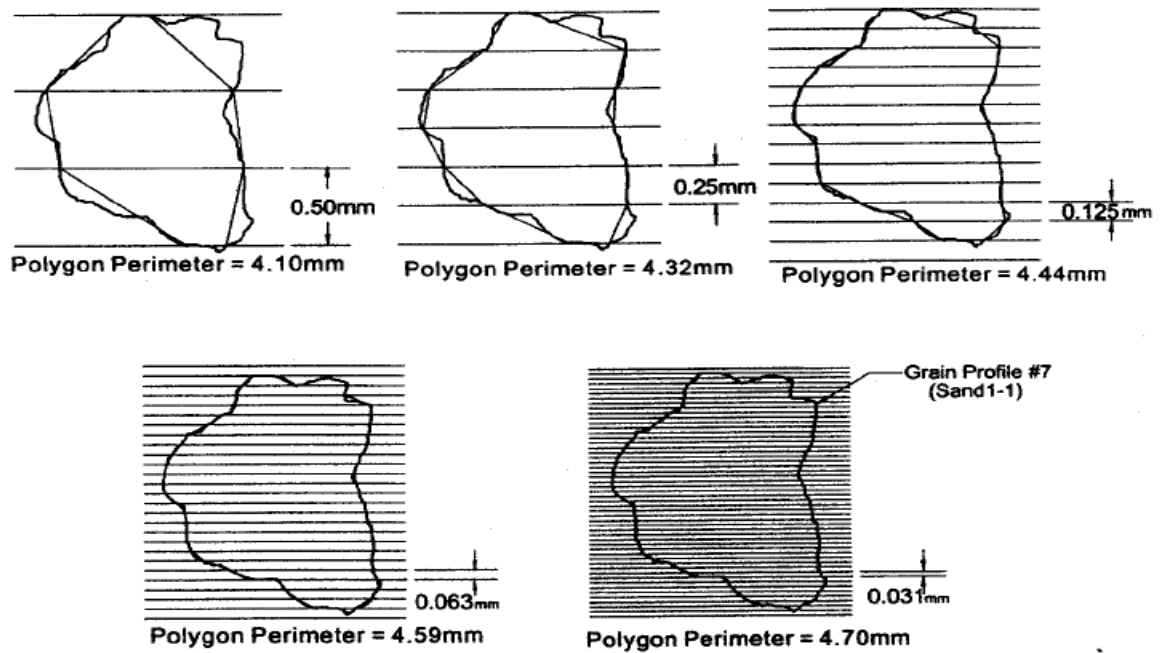
Essentiellement, la dimension fractale déterminée par la méthode d'Area-Perimeter est une valeur "commune" pour les grains. Par conséquent, la méthode de line Divider semble être une approche plus raisonnable concernant la détermination de la dimension fractale.



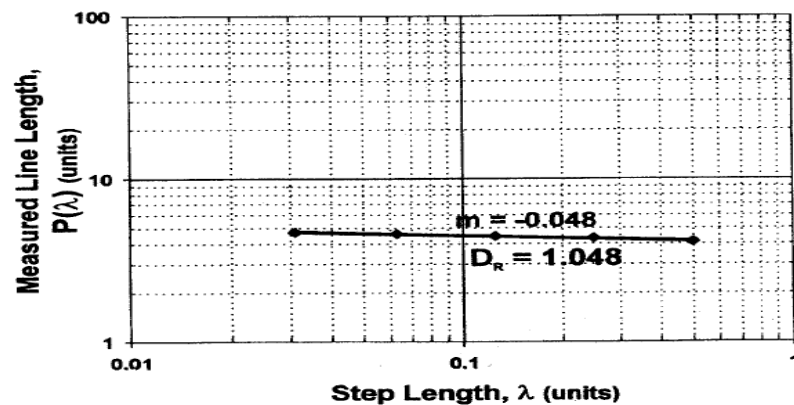
**Figure II-8:** Application de la méthode d'Area-Perimeter d'un gros grain de sable d'origine d'une pierre calcaire.

#### **II-4 Méthode des lignes parallèles (Kévin. P. Hammer., 2005)**

La mesure de la rugosité par la méthode des lignes parallèles, ressemble à la méthode précédente. Traçant tout d'abord des lignes parallèles, puis en employant une unité de longueur de la mesure en fonction de toute la longueur du périmètre des particules (Vallejo .L et hyslip .J, 1997) voir l'exemple suivant :



*Figure II-9* : Schéma représentant la méthode des lignes parallèles.



*Figure II-10* : Courbe de la dimension fractale de la méthode des lignes parallèles.

### II-5 Méthode des masses

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

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

Tyler et wheatcraft (1992) ont développé une formule en utilisant l'analyse granulométrique pour le calcul de la dimension fractale de fragmentation  $DF_R$ . Cette méthode de calcul

emploie lamasse retenue en passoire et son diamètre correspondant. Cette équation est définie comme suit :

$$\frac{M(R < r)}{M_T} = \left(\frac{r}{r_L}\right)^{3-DF_{FR}} \quad (II.12)$$

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

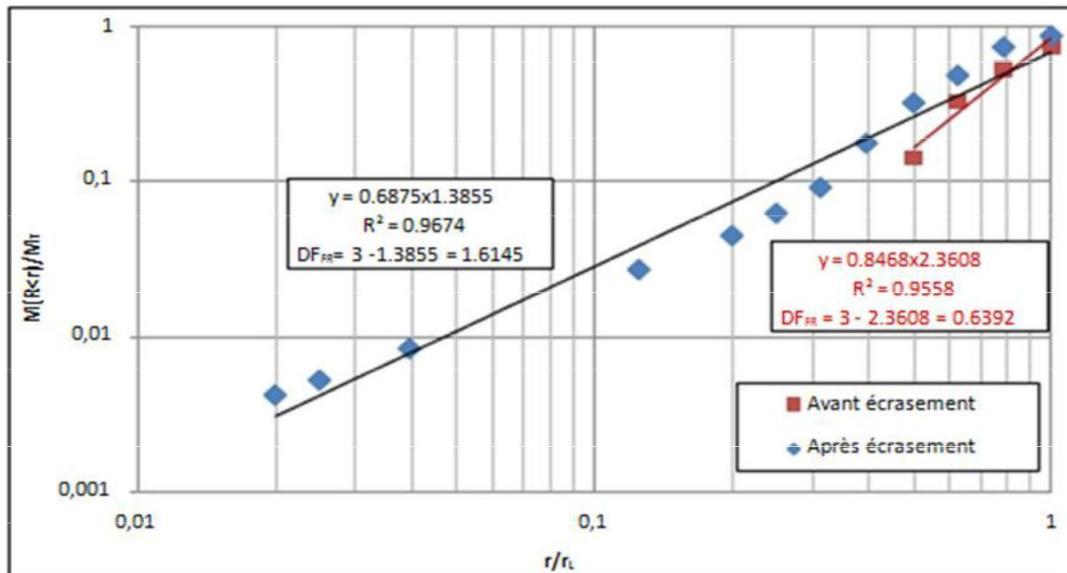
$M_T$  : masse totale des particules.  $r$ =taille de l'ouverture des passoires.

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

$DF_{FR}$  : dimension fractale de fragmentation.

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

$$DF_F = 3 - m \quad (II.13)$$



**Figure II-11** : Détermination de la dimension fractale  $DF_{FR}$  par la méthode des masses (Bouzboudja, A, 2016).

### III- CONCLUSION

Il existe plusieurs méthodes de calcul de la dimension fractale pour la détermination de l'irrégularité de la forme et de la texture des grains de sol. Ce chapitre nous a permis de constater que les approches basées sur le calcul de cette dimension sont faciles à développer. Dans cette étude la méthode choisie pour le calcul de la dimension fractale des échantillons est celle de comptage des boîtes (Box Counting).

***Chapitre III :***

***Génialités sur les sols et leurs problèmes***

## **I-INTRODUCTION**

En général, les sols sont utilisés dans tous les travaux de Génie Civil. En fonction de leur nature, ils sont employés soit dans la construction d'ouvrages en terre (couches de chaussées, barrages, digues, barrières étanches...), ou encore comme support de fondations de différents ouvrages (bâtiments, ponts,...).

Dans ce chapitre des généralités sur les sols fins sont présentées ; comme la définition des sols, leurs origines, leurs caractéristiques, leur classification et leur comportement, ainsi que l'eau dans le sol et son influence sur les sols fins en générale et plus particulièrement sur la marne ; qui est le sol étudié dans cette recherche.

## **II-ORIGINE DES SOLS**

L'étude de la provenance des sols appartient à la géodynamique externe, un domaine de la géologie qui traite des processus de modification du relief des continents et des fonds océaniques. Du point de vue de la géologie, la formation des roches sédimentaires n'est qu'une des étapes menant à la formation des sols. Elle est associée à deux phases d'érosion : la météorisation de la roche superficielle et le transport des débris (Robitaille et Tremblay, 1997).

## **III-LES MECANISMES DE LA METEORISATION**

La météorisation comprend deux processus :

- Un processus mécanique de désagrégation physique de la roche ;
- Un processus chimique d'altération de la roche.

Les mécanismes de désagrégation physique ne modifient pas la structure des minéraux ; ils fragmentent les roches en une quantité de débris plus petits. Par contre, les mécanismes d'altération chimique modifient et parfois même détruisent la structure minérale des roches.

## **IV-TRANSPORT ET DEPOTS**

Comme nous venons de le voir, les débris minéraux résultant de la désagrégation physique de la roche et les produits de l'altération chimique peuvent évoluer sur le site même de la météorisation pour former des horizons distincts. Le plus souvent, les débris solides et les produits d'altération en solution sont emportés par les agents de transports (le vent, le ruissellement, les courants marins et glaciers) et se déposent dans des bassins de

sédimentation. L'agent de transport et les mécanismes de dépôt déterminent toutes les caractéristiques et les propriétés des dépôts de sol.

❖ **Les principaux types de dépôts sont:**

- ✓ Les dépôts alluvionnaires ;
- ✓ Les dépôts lacustres ;
- ✓ Les dépôts marins ;
- ✓ Les dépôts glaciaires ;
- ✓ Les dépôts éoliens.

## V-PROPRIETES PHYSIQUES DES SOLS

### V-1 Définition des sols

Dans les études géotechniques les matériaux existant à la surface de l'écorce terrestre sont classés en deux catégories :

➤ **Les roches** : agglomérats de grains minéraux liés par des forces de cohésion fortes et permanentes, même après immersion prolongée dans l'eau c'est la mécanique des roches.

➤ **Les sols** : agrégats de grains minéraux pouvant être séparés sous l'effet d'actions mécaniques relativement faibles c'est la mécanique des sols (*Léreau, 2006*).

Les sols sont des matériaux meubles, poreux, hétérogènes et souvent anisotropes. Les matériaux, minéraux ou organiques, sont généralement à l'état de grains ou de particules dont les formes et les dimensions sont essentiellement variables (*Brette, 2002*).

### V-2 Éléments constitutifs d'un sol

Un sol est un mélange d'éléments solides constituant le squelette solide, d'eau pouvant circuler ou non entre les particules et d'air ou de gaz.

➤ **Il est donc, en général, constitué de trois phases:**

- Une phase solide dont les grains solides, dans leur arrangement naturel constituent le squelette ;
- Une phase liquide (eau) ;
- Une phase gazeuse (en général de l'air).

**a) Phase solide**

Les grains solides proviennent de l'altération de la roche mère. Ces grains ont des dimensions supérieures à 2  $\mu\text{m}$ . Les particules les plus fines ( $d < 2 \mu\text{m}$ ) sont issues d'une désagrégation mécanique de la roche mère puis, après dissolution sous l'action de l'eau, sont le résultat d'une altération chimique.

Ces grains constituent l'élément fondamental de l'analyse des sols. Leur taille, leur forme, leur enchevêtrement sont capitales pour le comportement du sol.

**b) Phase liquide**

L'eau existe sous différentes formes dans les sols :

- **Eau de constitution** : elle fait partie du réseau cristallin et est difficilement déplaçable ;
- **Eau liée** : elle est maintenue à la surface des grains par des forces d'attractions moléculaires. Epaisseur moyenne: 1 à 5  $\mu\text{m}$ . Ce phénomène n'est important que pour les grains fins ;
- **Eau capillaire** : retenue par les pores du sol par les forces de capillarité ;
- **Eau libre** : cette eau remplit l'espace resté libre des pores et interstices. Elle s'écoule dans le sol et obéit aux lois de l'hydraulique.

**c) Phase gazeuse**

Lorsque le sol n'est pas saturé, la phase gazeuse est constituée par un mélange d'air, de vapeur d'eau et éventuellement de gaz provenant de la décomposition de matières organiques.

**VI- LES DESORDRES DANS LES SOLS**

Le problème principal dans les sols fins, comme les argiles et les marnes, est le phénomène de retrait-gonflement, qui cause des fissures apparaissant clairement sur les constructions et sur les routes. Ces fissures occasionnent des ouvertures dans les fenêtres et les portes et elles se propagent dans la maçonnerie et la structure de l'ouvrage.

Les ouvrages sont sujets au gonflement principalement dans la structure et la maçonnerie du bâtiment. Parmi ces derniers, Les maisons individuelles, construites sans mesures de précaution de construction sur ce type de sol, sont sujettes à des dégradations et des

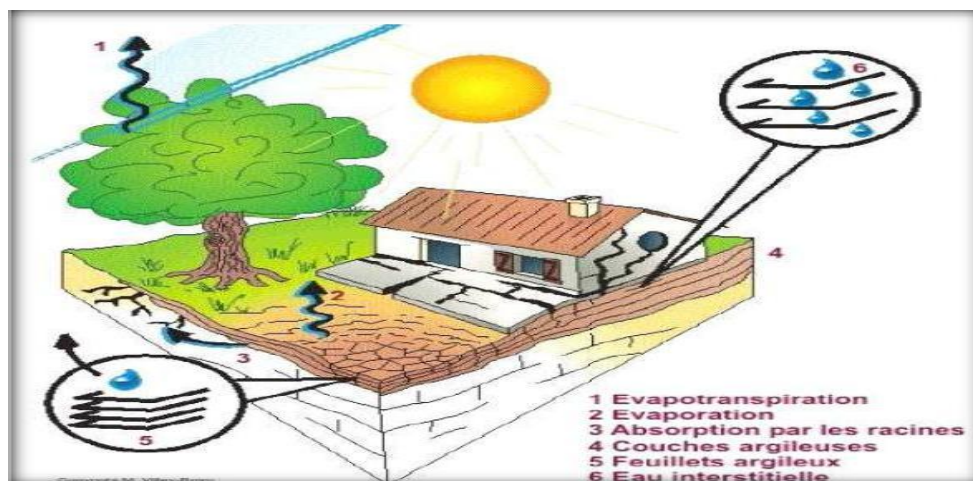
fissures au niveau des poteaux, des murs de remplissage et des fondations (radier, semelle superficielle ou filante et les pieux), voir la *figure III.1 (Freeah, 2006)*.

Ces désordres résultent du caractère différentiel que prennent les mouvements du sol de fondation (terrassment ou gonflement) sollicitant la structure en flexion ou en cisaillement, voir la *figure III.2 (Derriche et al., 2002)*.

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 (*Mouroux et al., 1987; Freeah, 2006 et Mouroux et al, 1988*). 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.



**Figure III-1 :** Risque à prendre en compte lors de la construction (Freeah, 2006).



**Figure III-2:** Cisaillement au niveau des nœuds (*Derriche Zet al., 2002*).

### ❖ 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 (Jennings, 1962), il peut être attribué au climat et à la surcharge. D'autres auteurs signalent que sur les routes d'importance moyenne, il y a apparition de divers types de fissures (Freeah, 2006).



**Figure III-3** : Dégradation des routes et des chaussées (Freeah, 2006 et Jennings, 1962).

## VII- GENERALITES SUR LES ARGILES

D'une manière générale, un sol contenant plus de 5% de particules argileuses possède déjà des propriétés d'un sol argileux. Lorsque la proportion des particules argileuses dépasse 30%, le sol est considéré comme une argile (Xiang-Ling LI, 1999).

Les particules d'argiles présentent la fraction minérale inférieure à  $2\mu\text{m}$ . L'argile étant pratiquement imperméable, elle est souvent employée comme matériaux d'étanchéité dans les noyaux de barrage en terre ou de digues. Toutefois, sa compressibilité est élevée, et en général, les charges qu'elle peut supporter sont de loin inférieures à celles que supportent le gravier et le sable. Les particules d'argile, contrairement à celles des autres types de sols, sont attirées les une vers les autres et se regroupent. Cette attraction, qui porte le nom de cohésion, est à l'origine de la consistance. Dans des conditions d'humidité favorables, la consistance est telle que l'argile devient plastique et qu'il est possible de la façonner, une opération pratiquement irréalisable avec le gravier et le sable (Robitaille et Tremblay, 1997).

### VII-1 Structure des argiles

Les argiles sont les particules fines dont la genèse est un processus plus ou moins accompli en partant de la roche mère. Le passage de la roche mère à l'argile est provoqué par un ensemble d'actions mécaniques, chimiques, et cristallographiques complexes connues sous le nom de processus pédo-génétique. Les grains argileux sont constitués d'un empilement de feuillets chargés électriquement qui glissent les uns par rapport aux autres.

On dit qu'ils ont des propriétés colloïdales (*Rousset. N, 1988*).

### VII-2 Les minéraux argileux

Les argiles sont essentiellement composées de minéraux argileux. Les caractéristiques physico-chimiques de ces derniers sont donc des facteurs déterminants pour le comportement mécanique. Les particules des minéraux argileux présentent, en effet, deux caractéristiques particulières et importantes, (*Xiang-Ling LI, 1999*) :

- Elles sont de très petite taille et associent l'eau à leur structure, ce qui leur confère des propriétés colloïdales intéressantes du point de vue géo-mécanique;
- La majorité des minéraux argileux se caractérise par une microstructure lamellaire ou foliaire organisée elle-même selon une intégration multi-échelle. En conséquence, la surface spécifique des minéraux argileux ainsi que la capacité d'échange cationique peuvent être élevées. Ces deux paramètres rendent compte de plusieurs propriétés hydromécaniques importantes, tels que le phénomène d'adsorption d'eau autour des particules argileuses et au sein de la structure foliaire, la capacité de gonflement chez certaines espèces minérales, l'étendu du domaine plastique, etc. (*Boudlal, O. 2013*).

### VII-3 Famille minéralogique

#### Classification

Les propriétés physiques des couches adsorbées dépendent aussi de la nature du minéral qui constitue le grain. L'étude des couches adsorbées et des minéraux argileux est importante pour bien comprendre le comportement des argiles que la granulométrie seule ne saurait expliquer. C'est ainsi que nous classons les minéraux argileux en différents groupes : famille, espèce et variété. Les trois familles les plus connues sont la kaolinite, la montmorillonite et l'illite, (*Berga, j. 2003-2004*).

#### 1) La kaolinite

Les argiles de la famille de la kaolinite sont les constituants essentiels de la plus part des argiles utilisées en céramique.

Leur surface spécifique ne dépasse pas 20 à 30 m<sup>2</sup> /mg. Les phénomènes de surface sont donc peu intenses. Autrement dit, ces minéraux sont relativement inactifs. La formule chimique de cette famille est du type Si<sub>2</sub> Al<sub>2</sub> O<sub>5</sub> (OH)<sub>4</sub> pour une demi-maille, elle est donc assez riche en alumine.

## 2) La montmorillonite

Les sols de la famille de la montmorillonite peuvent absorber de l'eau dans des proportions considérables, donnant lieu à des gonflements caractéristiques. Ceci est dû au fait que les liaisons d'un feuillet à l'autre sont faibles à cause de la structure floconneuse, et l'eau pénètre facilement entre les feuillets.

D'autre part, la surface spécifique de cette famille est élevée, elle peut dépasser 150 m<sup>2</sup>/g, ce qui donne une grande importance aux phénomènes de surface. La montmorillonite est alors une famille de minéraux argileux actifs. La formule chimique des montmorillonites est du type  $\text{Si}_4\text{Al}_{(2-x)}\text{Mg}_x\text{O}_{10}(\text{OH})_{2x}$  (cations échangeables)  $n\text{H}_2\text{O}$ .

## 3) L'illite

Les argiles de la famille de l'illite sont parmi les minéraux les plus répandus à la surface de la terre. La structure de l'illite est analogue à celle des micas, mais la matière est beaucoup plus finement divisée. La formule chimique pour une demi-maille de l'illite est de la forme  $\text{Si}_{(4-x)}\text{Al}_x\text{Al}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_{2x}\text{K}$ .

### VII-4 Identification des minéraux argileux dans un sol

#### a) Diffraction au rayons X

C'est une méthode de comparaison des spectres de diffraction de l'échantillon avec les spectres des minéraux connus. Cette méthode ne donne qu'une idée très approximative de la nature et la quantité des minéraux présents dans le sol.

#### b) Analyse différentielle thermique

Elle se fait par chauffage continu d'un échantillon dans un four électrique en présence d'une substance inerte de référence. La structure particulière des minéraux argileux déterminera des variations thermiques à des températures bien définies pour des minéraux donnés. Les variations enregistrées peuvent ensuite être comparées avec celles de minéraux connus.

#### c) Microscopie électronique

Ce procédé présente des difficultés d'interprétation et ne permet pas d'obtenir des données quantitatives.

#### d) Méthode de Casagrande

C'est une démarche simplifiée basée sur les limites d'Atterberg. Il s'agit de placer sur l'abaque de plasticité de Casagrande (*Figure III.4*) les points correspondant à l'échantillon et de comparer sa position avec celle des minéraux connus. Cette méthode peut donner autant de renseignements pertinents que n'importe quelle analyse de haute précision.

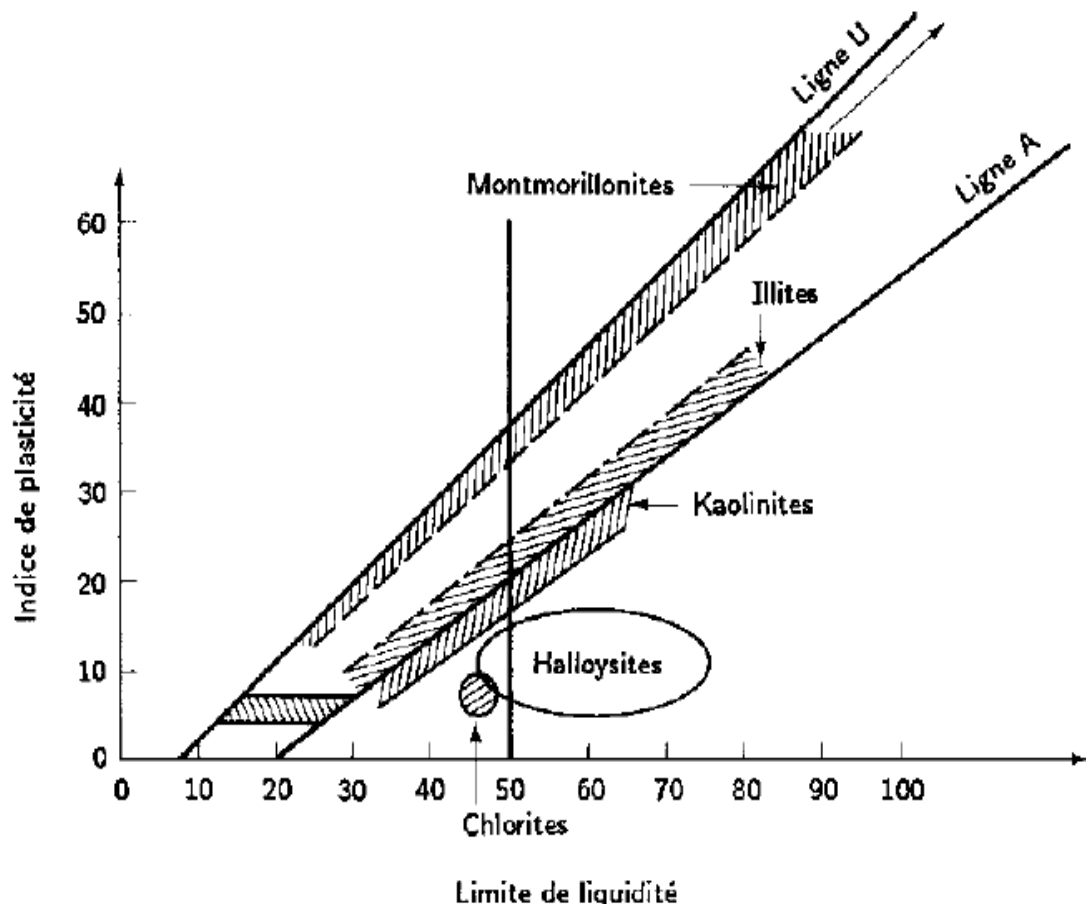


Figure III-4 : Abaque de plasticité de Casagrande et position des minéraux Argileux les plus connus.

## VIII-GENERALITES SUR LES MARNES

### VIII-1 Origine

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

- ✓ Si l'altération est prédominante, on trouvera des minéraux d'altération aux cotés des minéraux présents dans les roches mères. On parle de roches résiduelles,

- ✓ Si l'érosion est prédominante, on obtient après transport, sédimentation et diagenèse, des roches détritiques,
- ✓ Si la roche mère mise en solution peut conduire à la formation de roche d'origine chimique (tufs calcaire), de roches d'origine ou biochimique (calcaires coralliens).

### VIII-2 Définition de la marne

➤ **En géologie**, la marne est définie comme étant une roche sédimentaire constituée d'un mélange de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$  : composant principal du calcaire) et d'un pourcentage d'argile variant entre 30 et 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*).

### VIII-3 Les différents types de marnes

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

#### a) La couleur

**Les marnes bleues** : elles sont reconnaissables à leur couleurs bleue nuit. Ces marnes sont extrêmement fines et essentiellement composées d'argile, elles ne contiennent aucun élément détritique.

**Les marnes nummulitiques ou grises souris** : elles contiennent une fraction d'élément détritique fins, en particulier des sables dont leur présence rend ces marnes reconnaissable puisqu'elles croquent sous la dent.

**Les marnes gréseuses** : ces marnes ont une composante gréseuse importante, et même des niveaux de grés plus indurés inter-stratifiés dans les marnes.

**Les marnes grises** : on les retrouve avec d'épaisseurs plus importantes et elles ne contiennent que de l'argile (*Bouchez, F. 2008*).



**Figure III-5** : La marne bleue.



**Figure III-6** : La marne gréseuse vin Trias- Neffies.



**Figure III-7** : La marne noire (grise souris) l'Oxfordien.



**Figure III-8** : La marne grise de M'douha.

#### **b) Les constituants remarquables**

- de marnes dolomitiques,
- de marnes micacées,
- de marnes sableuses,
- de marnes glauconieuses,
- de marnes bitumineuses,
- de marnes gypseuses.

#### **c) L'intérêt stratigraphique et paléontologique**

- des marnes à foraminifères,
- des marnes à pholadomyies,
- des marnes à spongiaires,
- des marnes à radiolaires, etc.

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

#### **VIII-4 Genèse des marnes**

Les argiles qui rentrent dans la constitution des marnes proviennent, soit de l'altération des massifs émergés, soit de la reprise des sols.

Après un transport plus ou moins long, les minéraux argileux arrivent au bassin de sédimentation.

Dans les étapes proprement chimiques du cycle sédimentaire ? les néoformations dominent (carbonates, silex et phosphate). Au cours du dépôt, et après celui-ci, interviennent les phénomènes de diagenèses (somme de processus de formation des roches à partir des boues).

Dunoyer a distingué les phénomènes suivants (*Dunoyer, p, 1969*):

##### **a) Diagenèse des carbonates**

L'étude de la sédimentologie des carbonates, distingue deux types de phénomènes diagenétiques :

- Ceux qui affectent la composition minéralogique et chimique (remplacement, recristallisation, dissolution, cimentation et formation de nodules).
- Ceux qui altèrent la structure (fracturation, déformation plastique et tassement par dessiccation), (*Schmidt, T 1965*).

##### **b) Diagenèse des minéraux argileux**

Les transformations diagenétiques affectent particulièrement les minéraux argileux en raison de leur taille, de leur surface spécifique élevée, et de leur structure feuilletée facilitant les échanges d'ions entre le minéral et son entourage,

L'ensemble des phénomènes diagenétiques conduit à la formation d'un matériau dont les propriétés dépendront, en grande partie de l'intensité du phénomène qui s'est produit.

#### **VIII-5 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 (*Hammar et Meziani, 1996*).

Comme les argiles, les marnes sont tendres, finement poreuses, friables quand elles sont sèches, plastiques lorsqu'elles sont mouillées. Mais, à la différence des argiles, elles font effervescence avec les acides à cause de la présence du calcaire. La finesse des éléments constitutifs (minéraux argileux, carbonates et, parfois, silice en faible quantité) place les marnes dans le groupe des lutites, ou pélites. La teneur en carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) ou en argile (*Tableau III.1*) sont des paramètres essentiels permettant la classification de certaines roches (*Pejon et al., 1997*).

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

**Tableau III.1: Classification courante des roches selon la teneur en carbonate et en argile.**

Classification de Jung		Classification LCPC	
Roches	% d'argile	% $\text{CaCO}_3$	Roches
Calcaire	0 - 5	0 – 10	Argile ou Silt
Calcaire argileux	5 - 35	10 – 30	Argile ou Silt-Marne
Marne	35 - 65	30 – 70	Marne
Argile calcaire	65 - 95	70 – 90	Calcaire-Marneux
Argile	95 - 100	90 – 100	Calcaire

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

### VIII-6 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 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 influant est le drainage des nappes. On citera, parmi les paramètres d'altération:

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

### IX-CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à la description des caractéristiques des sols fins en général et des marnes en particulier ainsi que les problèmes qu'ils causent dans les constructions de Génie Civil. Nous avons illustrés pour cela différentes échelles d'étude permettant de montrer les différents minéraux constitutifs et les différents essais les caractérisant.

En s'intéressant précisément aux marnes étudiées, le chapitre suivant est consacré aux différents essais d'identification réalisés au laboratoire pour déterminer leurs caractéristiques physiques et minéralogiques.

***Chapitre IV :***

***Essais d'identifications***

## I-INTRODUCTION

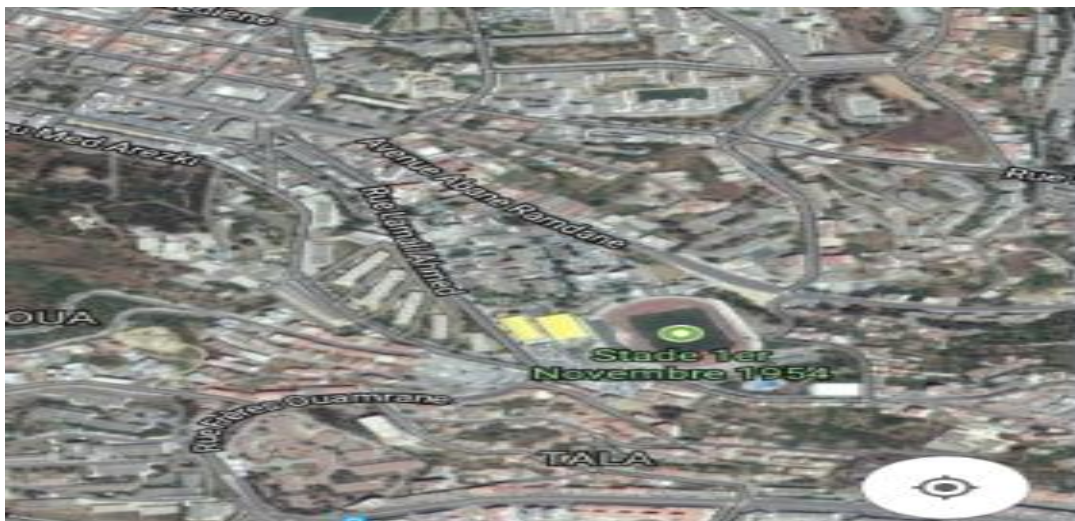
En mécanique des sols, on attache une grande importance à la définition des caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques des sols, car elles serviront par la suite à expliquer certains de leurs comportements comme le tassement, le glissement, etc.

Dans ce travail ces caractéristiques sont déterminées par des essais simples et rapides, appelés ‘‘essais d'identification’’ :

- La teneur en eau ( $w$ ) ;
- Poids volumique sèche ;
- Les limites d'Atterberg ;
- Valeur de bleu de méthylène ;
- Analyse granulométrique par sédimentométrie.

## II-SITES DE PRELEVEMENT DES MATERIAUX ETUDIES

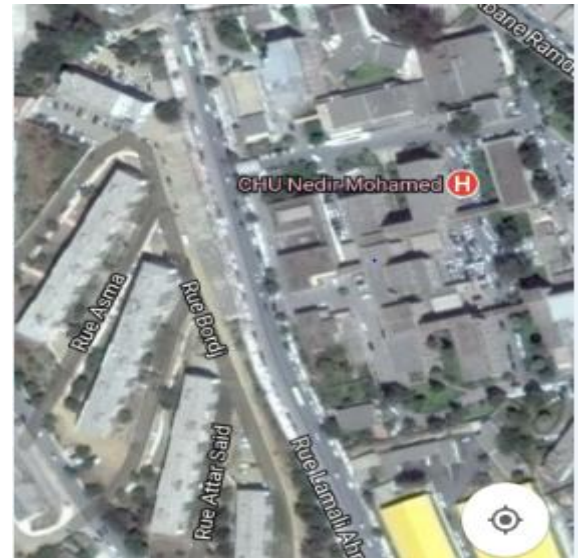
Les marnes utilisées dans cette étude ont été prélevées au niveau de la wilaya de TIZI-OUZOU par sondage carottier réalisé par le laboratoire LNHC(T.O) et les photos prises par le satellite nous montrent le lieu exact du prélèvement (Figures IV-1, IV-2 et IV-3) :



**Figure IV-1 :** Centre ville de Tizi-Ouzou.



**Figure IV-2 :** Lieu de prélèvement de la Marne 1.



**Figure IV-3 :** Lieu de prélèvement de la Marne 2.

**Tableau IV-1 :** Caractéristique des carottages des matériaux étudiés.

Nom	Lieu de sondage	Numéro de sondage	Profondeur de sondage
<b>Marne 1</b>	Avenue Abane Ramdane (l'OPGI Bloc 17)	SC 01	12 à 13 mètres
<b>Marne 2</b>	Rue Lamali Ahmed (CHU Nedir Mohamed)	SC 01	5 à 6 mètres

### III-CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET MINERALOGIQUES

Les essais d'identification sont réalisés au niveau du laboratoire pédagogique de mécanique des sols du département de Génie Civil de l'université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou.

#### III-1 Teneur en eau naturelle W % (NF P 94 – 050) – Méthode par étuvage

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

$$W = \frac{P_w}{P_d} \times 100 \quad (IV. 1)$$

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

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

**Tableau IV-2 :** Détermination de la teneur en eau naturelle.

Site de prélèvement des échantillons	W(%)
Marne 1	3.61
Marne 2	2.26

**Interprétation des résultats**

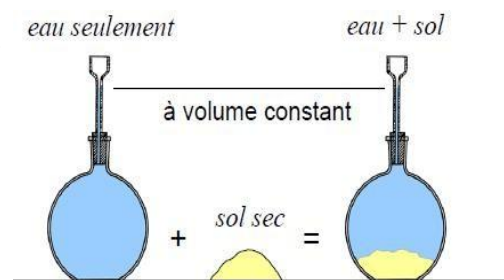
Les deux marnes étudiées présentent des teneurs en eau naturelles faibles (*Tableau IV-2*). Ceci peut être expliqué par le fait que ces dernières se présentent sous forme de blocs compacts, donc avec un volume des vides très réduit et une perméabilité très faible, d'où la difficulté d'infiltration d'eau, sachant que les échantillons sont prélevés par des sondages carottier en profondeur différentes dans les deux sites (*Tableau IV-1*) :

- pour la marne 2 de 5 à 6 mètres,
- pour la marne 1 de 12 à 13 mètres.

**III-2 Masse volumique des grains solides des sols  $\rho_s$  selon (NF P 94 – 054) – Méthode au pycnomètre**

La masse des particules solides est obtenue par pesage et exprimée en gramme.

Les quantités de sol utilisées pour l'essai sont 50 g et 100 g prélevées du tamisât de l'échantillon de sol au tamis de 2 mm.



**Figure IV-4:** Les étapes de l'essai au pycnomètre.

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

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

- $m_1$  : masse du pycnomètre vide (g),
- $m_2$  : masse du pycnomètre plein d'eau (g),
- $m_3$  : masse du pycnomètre avec le matériau (g),

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

$\rho_w$  : masse volumique de l'eau égale à 1 g/cm<sup>3</sup>.

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (\text{IV.3})$$

**Tableau IV-3:** Masse volumique des grains solides.

Type	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )
Marne 1	2,53
Marne 2	2,61

### III-3 Limites d'Atterberg (NF P 94 – 051)

#### Qu'est-ce que les limites d'Atterberg?

Ce sont des teneurs en eau correspondantes à des états physiques bien définis d'un matériau. Lorsque la quantité d'eau d'un sol varie, la consistance de ce sol peut varier dans des limites parfois importantes (LCTP de Tizi-Ouzou).

Suivant l'eau qu'il contiendra, le sol pourra être mou, boueux, souple, pâteux ou dur. Par convention on définit quatre états du sol qui sont :

- ✓ l'état solide sans retrait;
- ✓ l'état solide avec retrait;
- ✓ l'état plastique;
- ✓ l'état liquide.



**Figure IV-5:** Coupelle de Casagrande.

#### Pour quoi déterminer les limites d'Atterberg

On détermine au laboratoire les teneurs en eau qui correspondent aux changements d'état :  $W_L$  et  $W_P$ . Ces limites sont déterminées d'une façon empirique :

$W_L$  → coupelle de Casagrande.

$W_P$  → par fragmentation de cylindre de 3mm de diamètre et de 10cm à 15cm de longueur.

Ces essais se font sur la fraction du matériau < 0,40 mm.

**Détermination de la limite de liquidité  $W_L(\%)$** 

C'est la teneur en eau correspondante au passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique. La limite de liquidité est la teneur en eau du matériau qui correspond à une fermeture sur 1 cm des lèvres de la rainure après 25 chocs effectués à l'appareil de Casagrande.



**Figure IV-6:** Détermination de la limite de liquidité.

Les résultats obtenus sur les échantillons étudiés sont présentés dans le *Tableau IV-4* et leurs méthodes de calcul sont détaillées dans les figures *IV-7* et *IV-8* suivantes :

**Tableau IV-4 :** Limite de liquidité moyenne de la marne étudiée.

Type de l'échantillon	$W_L(\%)$
Marne 1	36,7
Marne 2	30,4

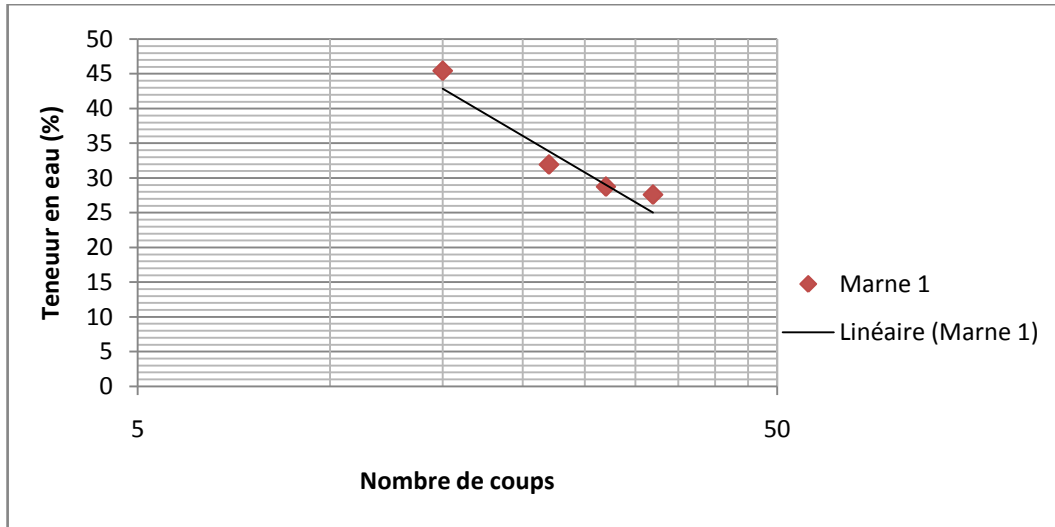


Figure IV -7 : Graphe de limite de liquidité de la marne 1.

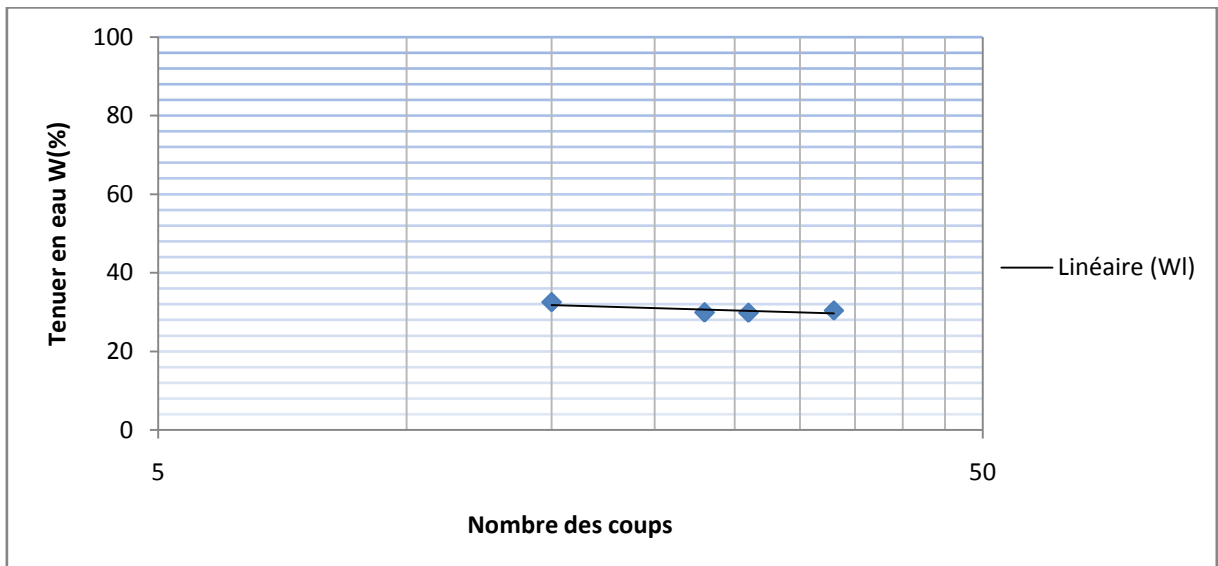


Figure IV -8 : Graphe de limite de liquidité de la marne 2.

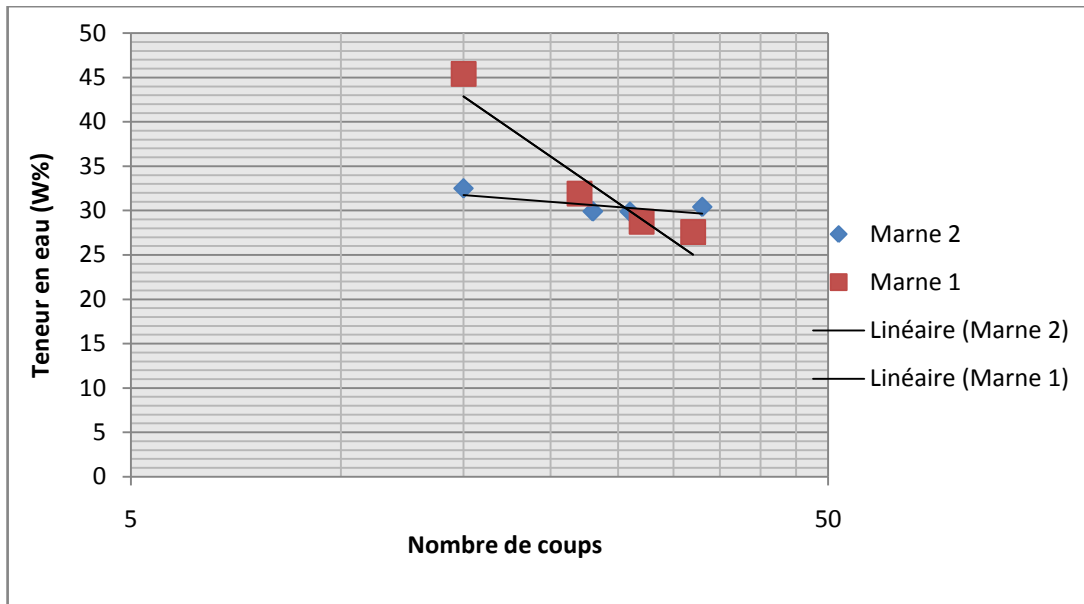


Figure IV -9 : Graphe de limite de liquidité des deux marnes étudiées.

**Détermination de la limite de plasticité  $W_P$**

**Principe de l'essai**

C'est la teneur en eau correspondante au passage de l'état plastique à l'état solide. La limite de plasticité est atteinte lorsque le rouleau, ayant atteint un diamètre de 3 mm et une longueur de 10 cm à 15 cm, se casse en le soulevant en son milieu de 2 cm à 3 cm de hauteur (Figure IV-10).

**Équipements nécessaires**

- Plaque en verre ou en marbre;
- Une balance;
- L'étuve.



Figure IV-10: Etapes de la limite de plasticité.

Tableau IV-5 : Limites de plasticité des marnes étudiées.

Type de l'échantillon	$W_P$ (%)
Marne 1	30,0325
Marne 2	23,0769

Une fois les limites de liquidité et de plasticité connues, il devient possible de calculer l'indice de plasticité. Si la teneur en eau naturelle a été mesurée, on peut aussi calculer l'indice de liquidité (Robitaille, V et Tremblay, D 1997).

**Indice de plasticité  $I_p$** 

L'indice de plasticité  $I_p$  (%) : C'est la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité, qui définit l'étendu du domaine plastique d'un sol :

$$I_p = W_L - W_P \quad (\text{IV.4})$$

L'indice de plasticité permet de définir le degré de plasticité d'un sol.

**Tableau IV-6:** 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 très plastique

**Tableau IV-7:** Indice de plasticité des marnes étudiées.

Type de l'échantillon	Indice de plasticité	Degré de plasticité
Marne 1	6,6675	Sol peu plastique
Marne 2	7,3231	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 5 et 30, ce qui indique qu'elles sont des sols peu plastiques.

**Indice de consistance :**

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.

$$I_c = \frac{W_L - W}{I_p} \quad (\text{IV.5})$$

**Tableau IV-8 :** Etat de consistance référentielle d'un sol.

Indice de consistance $I_C$	Etat du sol
$I_C > 1$	Solide
$0 < I_C < 1$	Plastique
$I_C < 0$	Liquide

**Tableau IV-9 :** Indice de consistance pour les 2 marnes.

Sol	$I_C$	Etat de sol
Marne 1	4,96	Solide
Marne 2	3,84	Solide

**Interprétation des résultats :**

On remarque que l'indice de consistance des deux marnes est supérieur à 1, ce qui nous permet de dire que nos sols sont dans l'état solide.

**III-4 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 d'eau distillé et maintenus en permanence sous agitation.



**Figure IV-11:** Matériel d'essai au bleu de méthylène –Essai à la tâche.

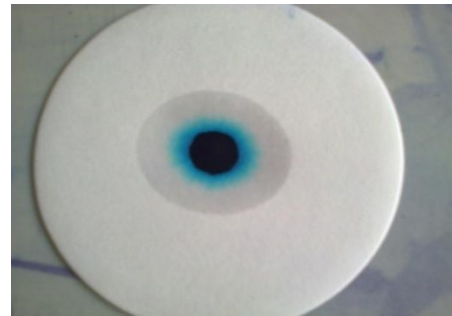
L'essai consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par l'échantillon de sol testé. Plus la fraction argileuse est importante plus elle adsorbe du bleu de méthylène.

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 (Figure IV.12).
- Si le test est positif, la zone humide est teintée de bleu, c'est-à dire on arrête le dosage (Figure IV.13).



**Figure IV-12 :** Teste au bleu négatif.



**Figure IV-13 :** Test au bleu positif.



**Figure IV-14 :** Déroulement de l'essai au bleu de méthylène.



**Figure IV-15 :** Résultats de l'essai à la tâche sur les différents échantillons étudiés.

La valeur au bleu du sol est donnée par la relation suivante :

$$\text{VBS} = \text{Mb}/\text{Ms} \times 100 \text{ et } \text{Mb} = \text{V} \times 100 \quad (\text{IV.6})$$

Avec :  $M_b$  : masse de bleu permettant la saturation par adsorption (g);

$M_s$  : masse sèche de la prise d'essai (g) ;

V: volume de solution de bleu utilisée (cm).

**Tableau IV-10:** Désignation du sol en fonction de son VBS.

VBS (en grammes de bleu pour 100 g 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-11:** Résultats des valeurs au bleu de méthylène.

Type du Sol	VBS (en gramme de bleu pour 50g de sol)	Désignation du sol
Marne 1	0.2 $\leq$ VBS = 1 $\leq$ 2.5	Sol limoneux
Marne 2	2.5 $\leq$ VBS = 2,7 $\leq$ 6	Sol limoneux – argileux

### L'interprétation des résultats

Les valeurs obtenues au bleu de méthylène montrent que la marne 1 représente un sol limoneux et la marne 2 représente un sol limoneux argileux.

### III-5 Analyse granulométrique par sédimentométrie (NF P 94 – 057)

L'Analyse granulométrique par sédimentométrie est basée sur la loi de STOKES. Elle exprime la vitesse de décantation par gravité d'une particule sphérique mise en suspension dans un liquide visqueux.

La vitesse de décantation dépend du diamètre des grains : Par convention, le diamètre d'une

particule est égal au diamètre de la particule sphérique de même masse volumique et qui a la même vitesse de décantation (*LCTP de Tizi-Ouzou*).

La méthode consiste à mesurer à différents intervalles de temps, à l'aide d'un densimètre, la densité d'une suspension de sol.

$$V = [(q_s - q_w) / 18\mu] \times D^2 \quad (\text{IV.7})$$

V : vitesse de décantation de la particule (cm/s) ;

$q_s$ : masse volumique de la particule (g/cm<sup>3</sup>) ;

$q_w$ : masse volumique du liquide (g/cm<sup>3</sup>) ;

D : diamètre de la particule (cm) ;

$\mu$  : viscosité dynamique du liquide.

Soit **t**, le temps de décantation de quelques particules, la densité de la suspension à une profondeur **H** nous donne donc :

$$D = \left( \frac{1}{g} * \frac{18\eta}{\rho_S - \rho_W} * \frac{Ht}{t} \right)^{0,5} \quad (\text{IV.8})$$

Cette densité indique la concentration en particules de diamètre égal ou inférieur à **D**.

### **Pour quoi la sédimentométrie?**

L'analyse granulométrique par tamisage servant aux sols grenus étant incomplète pour un matériau possédant une quantité importante de grains fins (< 80  $\mu\text{m}$ ), elle fait appel à la sédimentométrie pour une analyse complète du matériau.

La sédimentométrie permet l'identification et la classification des sols à grains fins.

### **Principe de l'essai**

- On prend le passant au tamis 0,080 mm au moment du lavage de la quantité pesée à l'état sec au cours de l'étude granulométrique par tamisage.
- On le sèche jusqu'à dessiccation complète.
- On le désagrège à l'aide d'un maillet et on le mélange pour avoir un échantillon homogène.
- On pèse 50 g d'échantillon qu'on mélange dans une éprouvette graduée avec un demi- litre d'eau distillée avec 5% d'hexametaphosphate de sodium ( $\text{Na}_6 (\text{PO}_3)_6$ ),

10H<sub>2</sub>O) pendant deux minute et on y ajoute de l'eau distillée jusqu'à avoir 1000 ml de mélange.

- Agitation de la solution avec un mélangeur manuel pendant 2 minutes ensuite on déclenche le chronomètre et au bout de 30 S on prend la première lecture au densimètre. Les autres lectures suivantes à effectuer durant l'essai sont successivement:(1- 2 -5-10-20 – 40 – 80 –240 –1440 mn).
- On calcule les pourcentages des tamisas qui complètent la courbe granulométrique (*LHCC de Tizi-Ouzou*).



**Figure IV-16** : Etapes de déroulement d'essai de sédimentométrie.

Les résultats obtenus sont comme suit :

**Marne 1 :**

**Tableau IV-12** : Résultat de l'analyse granulométrique par sédimentation de la marne 1.

<b>T (mn)</b>	0,5	1	2	5	10	20	40	80	240	1140
<b>P(%)</b>	71	65,3	61,3	53,4	51,4	39,5	31,6	29,6	11,7	7,9
<b>D (mm)</b>	0,074	0,053	0,038	0,024	0,017	0,012	0,009	0,006	0,004	0,0017

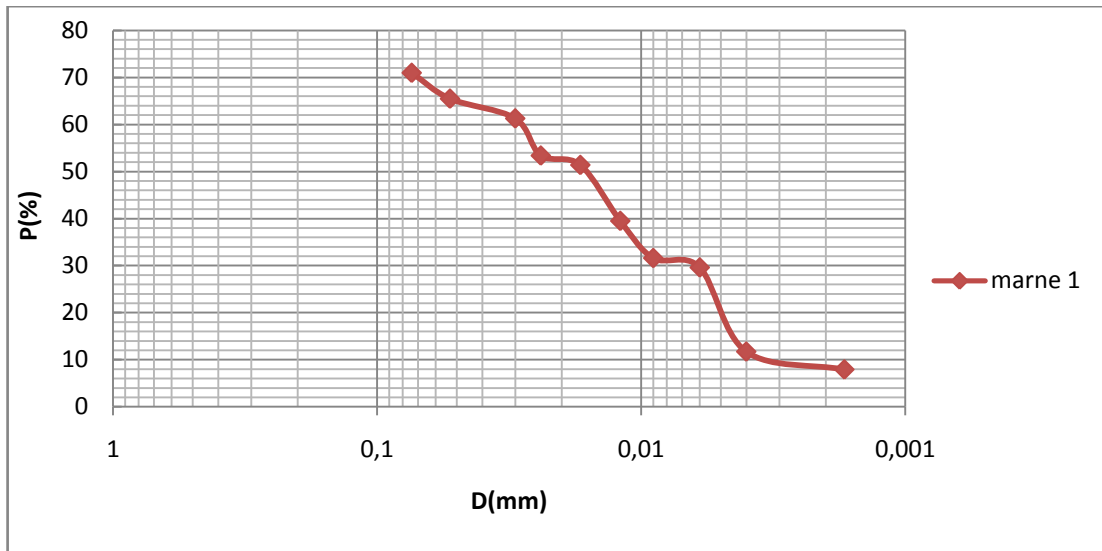


Figure IV -17 : Courbe d'analyse granulométrique par sédimentation de la marne 1.

Marne 2 :

Tableau IV-13 : Résultat de l'analyse granulométrique par sédimentation de la marne 2.

<b>T (mm)</b>	0,5	1	2	5	10	20	40	80	240	1140
<b>P (%)</b>	95	83,1	79,1	67,2	55,4	49,4	43,5	35,6	19,7	19,7
<b>D (mm)</b>	0,066	0,048	0,036	0,023	0,017	0,012	0,0089	0,0063	0,004	0,0017

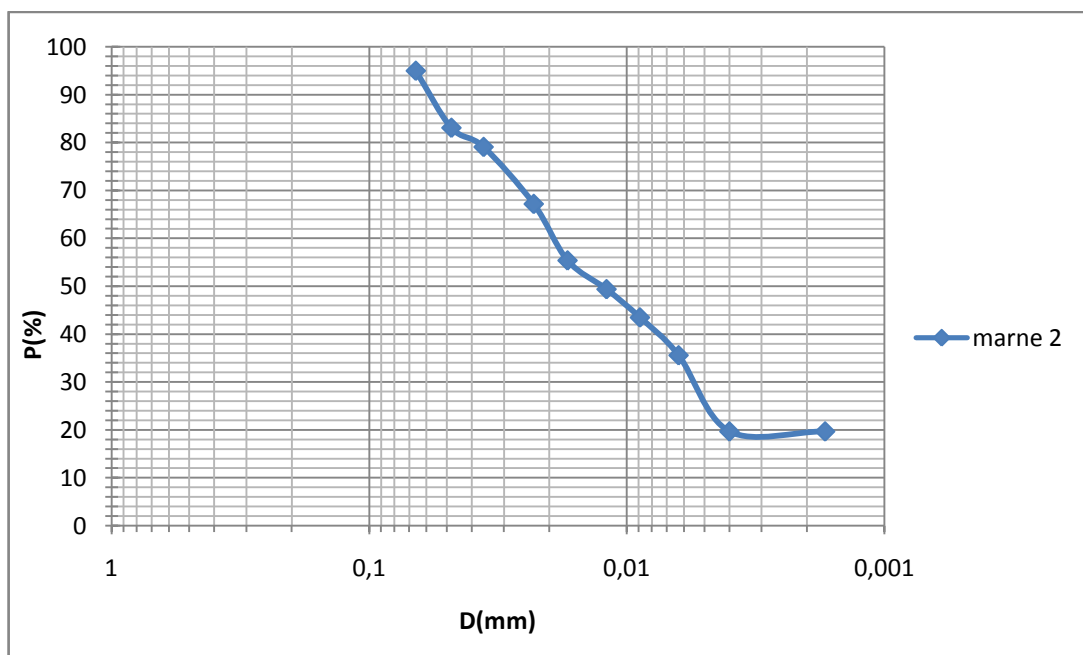


Figure IV -18: Courbe d'analyse granulométrique par sédimentation de la marne 2.

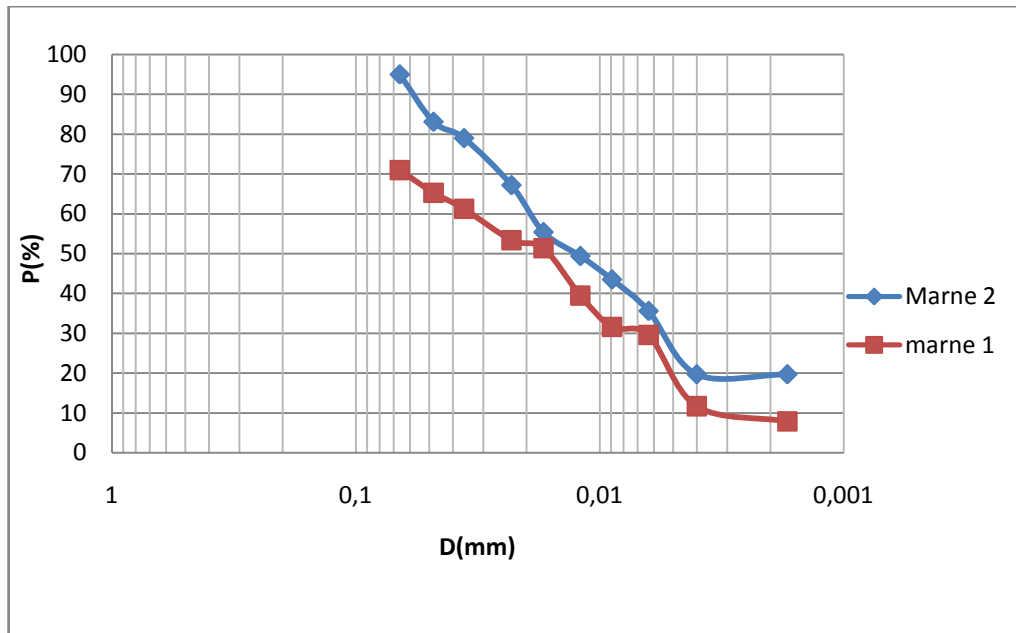


Figure IV -19 : Courbe d'analyse granulométrique par sédimentation des deux marnes.

**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.

**III-6 L'activité AC :**

La granulométrie caractérisée par le pourcentage des grains dont la dimension est inférieure à 2µm (proportion d'argile F2 % < 2µm), nous aide à calculer l'activité (AC) de Skempton selon la norme NF P94-056 en utilisant l'équation suivante :

$$\text{L'activité de Skempton : } A_C = \frac{I_P}{F_2} \quad (IV. 9)$$

Les résultats obtenus par l'équation (IV.9) sont présentés dans le (Tableau IV-14).

**Tableau IV-14:** Activité (AC) de Skempton pour les deux marnes.

Type	L'activité (AC)	Résultats
Marne 1	0,84	moyennement actif
Marne 2	0,37	Faiblement actif

**III-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, basées sur des caractéristiques du sol, qui sont faciles à déterminer en 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 selon un seul paramètre*

**Tableau IV-15 :** Evaluation du potentiel de gonflement à partir de l'indice de plasticité (Mouroux et al. 1988).

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

**Tableau IV-16 :** Résultats du potentiel de gonflement à partir de l'indice de plasticité (Mouroux et al., 1988).

Type	L'indice de plasticité	Potentiel de gonflement
Marne 1	6,6675	bas
Marne 2	7,3231	bas

**b) Combinaison de deux paramètres**

**Tableau IV-17 :** Degré d'expansion en fonction de limite de liquidité et l'indice de plasticité (Snethen et al. 1977).

$I_p$	WL (%)	classification
< 25	< 50	faible
25-35	50-60	moyen
> 35	> 60	Très élevé

**Tableau IV-18 :** Résultats de Degré d'expansion en fonction de la limite de liquidité et l'indice de plasticité pour les deux marnes étudiées.

Type	I <sub>P</sub>	W <sub>L</sub> (%)	classification
Marne 1	6,6675	36,7	faible
Marne 2	7,3231	30,4	faible

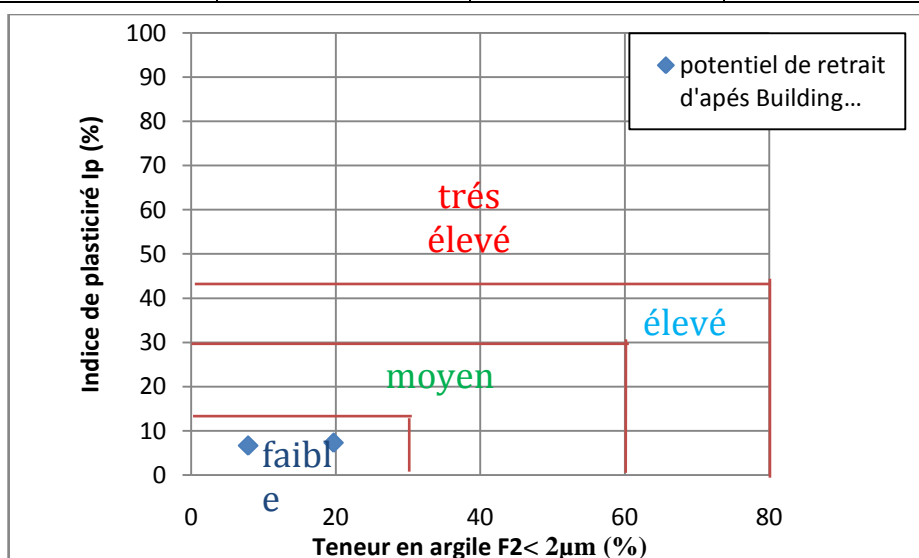
**III-8 Mesure du potentiel de retrait :**

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 (*Figure IV-20*). 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-19 :** Evaluation du potentiel de retrait à partir de l'indice de plasticité.

Type	I <sub>P</sub> (%)	F <sub>2</sub> < 2 μm	Commentaire
Marne 1	6,6675	7,9	faible
Marne 2	7,3231	19.7	faible



**Figure IV-20:** Potentiel de retrait d'après (Building Research Establishment, 1980).

**Tableau IV-20 : Résultats finals pour les caractéristiques physiques.**

<b>Sites</b>	<b>Marne 1</b>	<b>Marne 2</b>
<b>W(%)</b>	3,61	2,25
<b>WL(%)</b>	36,7	30,4
<b>WP(%)</b>	30,0325	23,0769
<b>I<sub>p</sub>(%)</b>	6,6675	7,3231
<b>I<sub>c</sub></b>	4,96	3,84
<b>A<sub>c</sub></b>	0,84	0,37
<b><math>\rho_s</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,53	2,61
<b>%&lt;80<math>\mu</math>m</b>	71	95
<b>%&lt;2 <math>\mu</math>m</b>	7,9	19,7
<b>VBS</b>	1	2,7

**IV-9 Analyse minéralogique****Essais réalisés :**

Détermination et identification des minéraux des marnes étudiées par la méthode de diffraction **aux rayons X**.

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

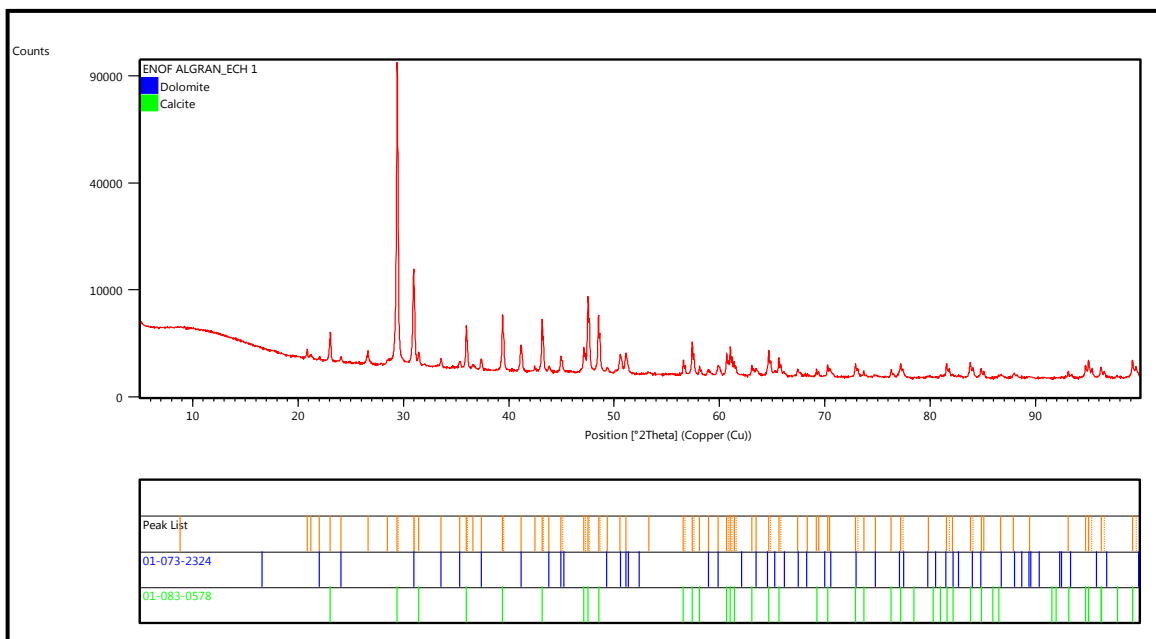


Figure IV-21: Diffractogramme aux rayons X de la Marne 1.

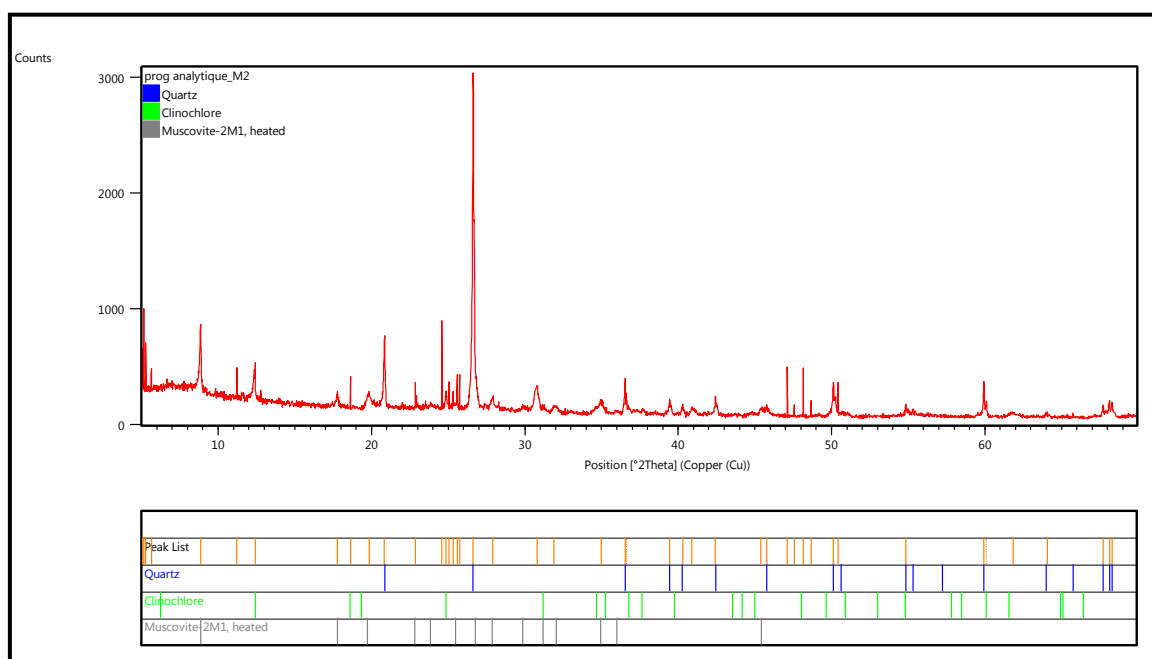


Figure IV-22 : Diffractogramme aux rayons X de la Marne 2.

**Interprétation des résultats :**

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

- La Marne 1 est principalement composée par le quartz, la chlorite-serpentine et la muscovite.
- La Marne 2 est formée essentiellement par le quartz, le clinocllore et la muscovite.

**IV-CONCLUSION :**

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats des essais d'identifications réalisés au laboratoire, ce qui a permis d'avoir une idée sur la nature physique et minéralogique du sol étudié.

A partir des essais physiques réalisés on peut classer les deux sols étudiés :

- La marne 1 est un sol limoneux avec une présence très faible des particules argileuses ; ce qui engendre un potentiel de gonflement et un potentiel de retrait faibles.
- La marne 2 est un sol limoneux-argileux avec une présence faible des particules argileuses.
  - Ce qui engendre un potentiel de gonflement et un potentiel de retrait faibles pour les deux marnes.

Les résultats d'analyse minéralogique obtenus, montrent que les marnes étudiées contiennent presque les mêmes types des minéraux.

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

***Chapitre V :***

***Etude des effets climatiques au laboratoire***

## I- INTRODUCTION

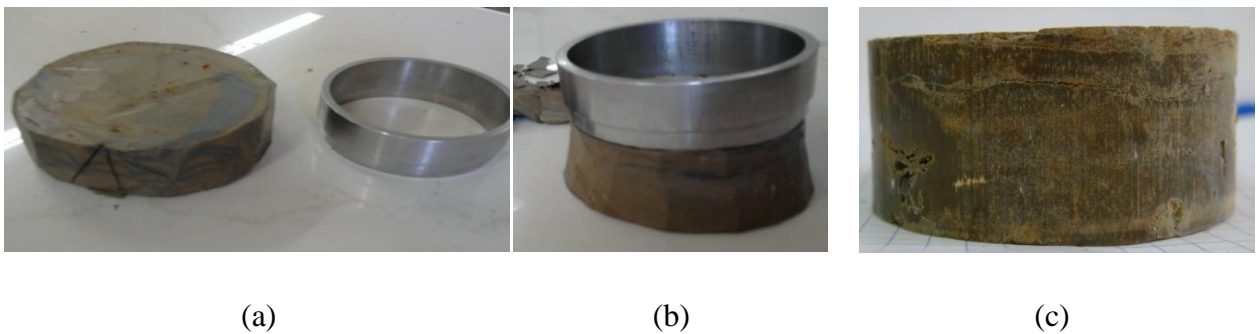
Une bonne reconnaissance du sol nécessite une campagne suffisante composée d'essais in-situ et de laboratoire. Dans les conditions d'exploitation, les matériaux granulaires se dégradent sous l'effet de différents processus d'altération. Dans ce chapitre on s'intéresse aux effets climatiques et à leur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

Pour cela on tient à représenter l'effet de la nature par les deux essais suivants :

- Gel/dégel
- Dégradabilité

## II-PREPARATION DES ECHANTILLONS

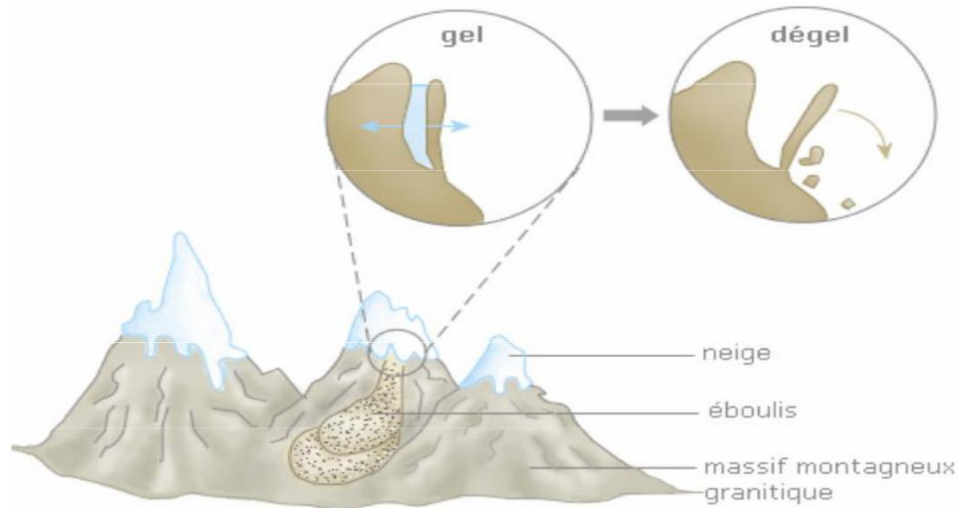
Les échantillons étudiés sont intacts, le dispositif utilisé pour la préparation des échantillons est l'anneau de l'appareil de l'essai oedométrique, et la Figure V -1 montre les différentes étapes.



**Figure V-1** : Préparations des échantillons.

### III- ESSAI GEL/DEGEL (Norme NF-EN 1367-1)

La présente norme spécifie une méthode d'essai permettant de fournir des données sur le comportement de sol, lorsqu'il est soumis à des cycles du gel-dégel.



**Figure V-2 :** Effet de gel dans la nature.

Le gel crée des contraintes dans les granulats qui peuvent provoquer leur rupture.

#### III-1 La gélifraction

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

#### III-2 Principe de l'essai :

Après avoir imbibé les échantillons à la pression atmosphérique, ils sont soumis à 10 cycles de gel-dégel. Chaque cycle comporte un refroidissement à  $-2,5^{\circ}\text{C}$  et un dégel à une température de  $45^{\circ}\text{C}$ . On examine les granulats après la fin des cycles et on évalue le changement de leur dimension fractale.

### III-3 Appareillage :

Les éléments constituant l'appareillage sont :

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



**Figure V-3:** Enceinte climatique.

### III-4 Déroulement d'essai

- Sécher les échantillons dans l'étuve pendant 24h à une température de 105°C.
- Imbiber les échantillons dans l'eau distillée à 20°C pendant 24h à l'enceinte climatique.

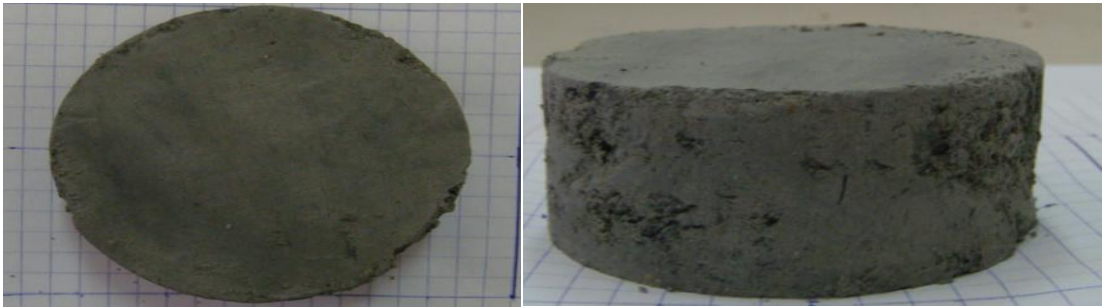
**Dans le cas du gel**, on abaisse la température de 20°C à 0°C pendant 150 ( $\pm 30$ ) min et la maintenir à 0°C pendant 210 ( $\pm 30$ ) min. Puis on continue à abaisser la température de 0°C à (-2,5) °C durant 180 $\pm$ 30 min et la maintenir à -2,5 pendant au moins 240 min.

**Dans le cas du dégel**, on laisse les échantillons dans l'eau à (20 $\pm$ 3) °C à (45 $\pm$ 3) pendant 10h au maximum.

Chaque cycle de **gel-dégel** prend **24h**.

A la fin de l'essai (après les 10 cycles), on mesure la masse des échantillons et on calcul leurs dimensions fractales.

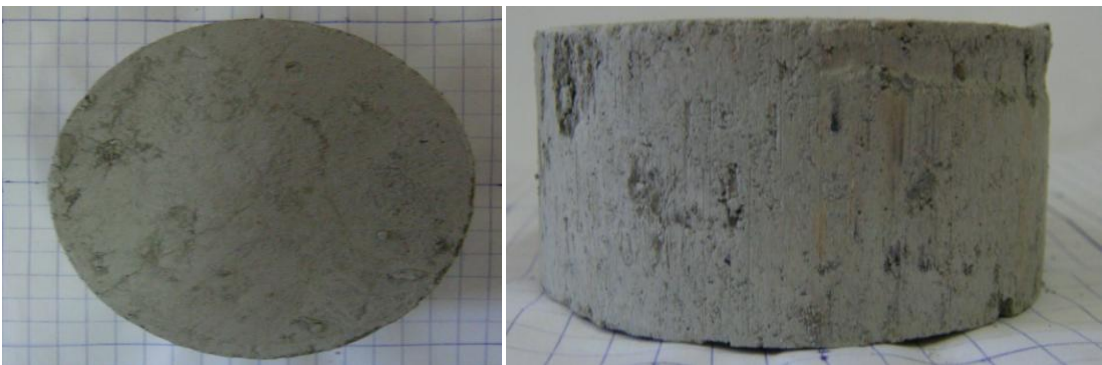
**III-5 Les images des échantillons durant tout l'essai**



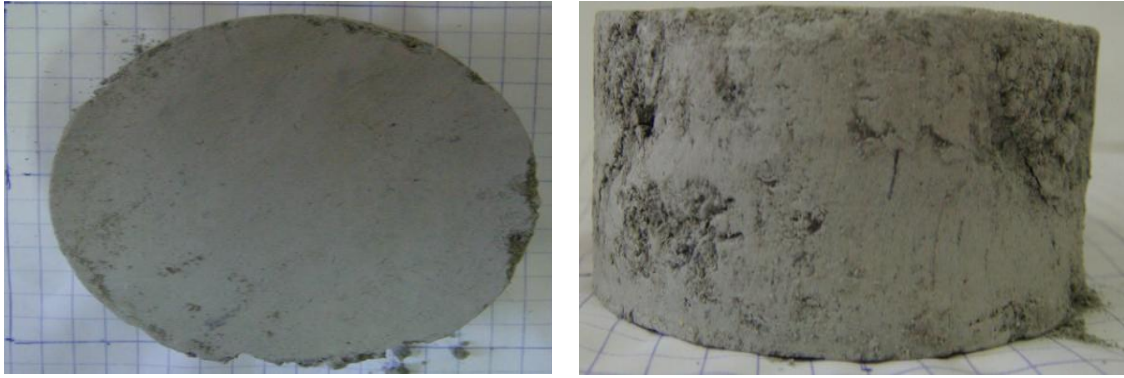
**Figure V-4 :** Echantillon 1 de la marne 1 avant l'étuvage.



**Figure V-5 :** Echantillon 2 de la marne 1 avant l'étuvage.



**Figure V-6 :** Echantillon 1 de la marne 1 après l'étuvage.



**Figure V-7 :** Echantillon 2 de la marne 1 après l'étuvage.



**Figure V-8 :** Echantillon 1 de la marne 2 après l'étuvage.



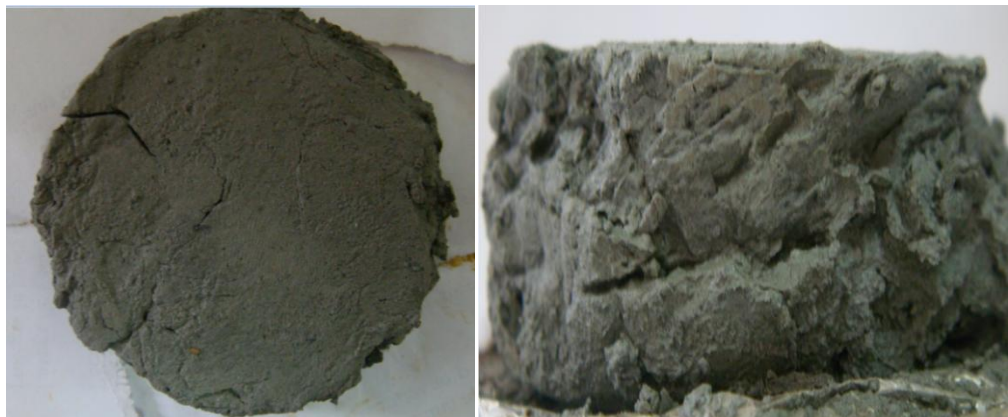
**Figure V-9:** Echantillon 2 de la marne 2 après l'étuvage.



**Figure V-10 :** Marne 2 après 5 cycles de gel/dégel.



**Figure V-11 :** Marne 1 après 5 cycles de gel/dégel.



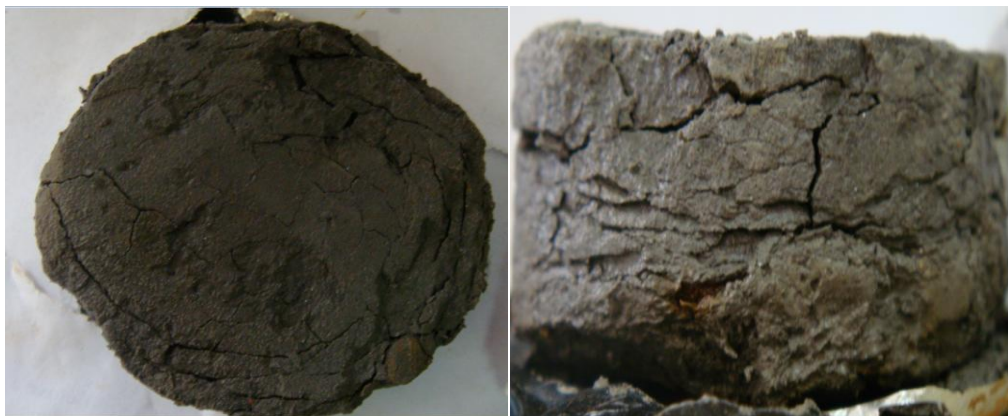
**Figure V-12 :** Echantillon 1 de la marne 1 à la fin de l'essai gel/dégel.



**Figure V-13 :** Echantillon 2 de la marne 1 à la fin de l'essai gel/dégel.



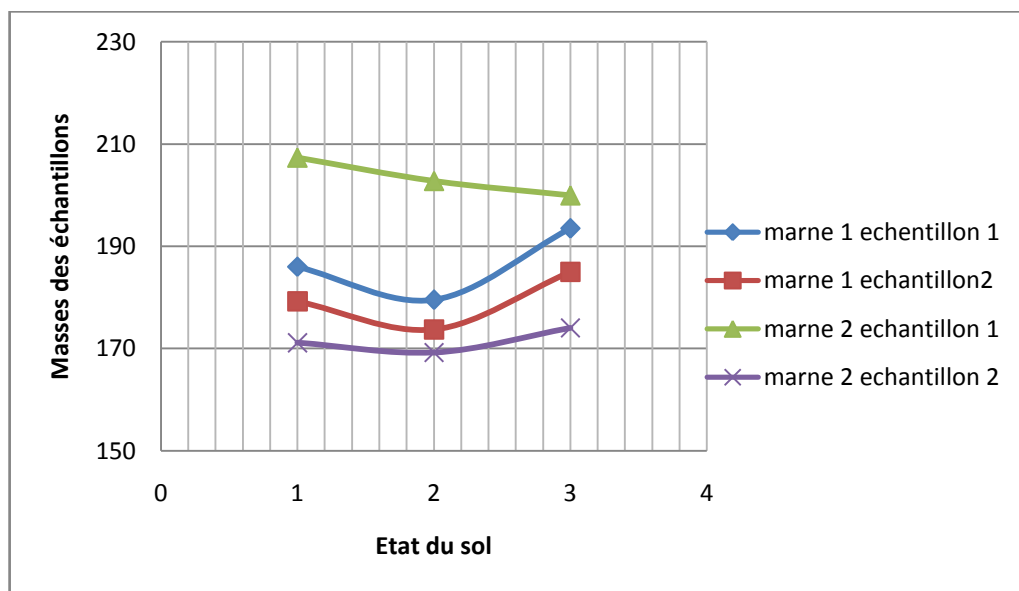
**Figure V-14 :** Echantillon 1 de la marne 2 à la fin de l'essai gel/dégel.



**Figure V-15 :** Echantillon 2 de la marne 2 à la fin de l'essai gel/dégel.

**Tableau V-1** : Les masses des échantillons durant l'essai de gel/dégel.

Marne 1	Masse de l'échantillon	Marne 2	Masse de l'échantillon
<i>Avant l'essai</i>			
<i>Echantillon 1</i>	186 ,002	<i>Echantillon 1</i>	207,368
<i>Echantillon 2</i>	179,213	<i>Echantillon 2</i>	171,126
<i>Après l'étuvage</i>			
<i>Echantillon 1</i>	179,513	<i>Echantillon 1</i>	202,776
<i>Echantillon 2</i>	173,722	<i>Echantillon 2</i>	169,229
<i>Fin de l'essai</i>			
<i>Echantillon 1</i>	193,490	<i>Echantillon 1</i>	199,980
<i>Echantillon 2</i>	185,004	<i>Echantillon 2</i>	174,022

**Figure V-16** : Variation des masses des échantillons durant l'essai de Gel/Dégel.

### III-6 Interprétation des résultats

D'après les résultats obtenus au cours de cet essai on remarque une diminution de la masse des deux sols étudiés après l'étuvage (*Tableau V-1*), ça s'explique par l'évaporation d'eau que constitue le sol, comme on a constaté que les masses de deux marnes ont augmenté à la fin de l'essai (*Figure V-16*), cela s'explique par le fait que les marnes ont absorbé de l'eau pendant la phase du gel, ce qui est dû par la forte présence de *Quartz* dans la composition minéralogique des deux sols,

Comme on a constaté les observations suivantes (Figures V-4,... V-15) :

Le premier cycle est caractérisé par le rétrécissement volumique des échantillons après séchage et l'apparition d'un effritement des échantillons.

La marne 1 a subi un retrait de volume, qui s'est manifesté plus dans le sens vertical ; avec une apparition des fissures et des déformations importantes suivi d'un effritement des échantillons engendrant une production de petites particules fines.

Pour la marne 2 ; on remarque que les échantillons ont subi un certain retrait-gonflement, des réarrangements se sont produits à la phase de gonflement et ces réarrangements ont engendré l'effritement progressif des échantillons et l'augmentation de la perméabilité, au cours du cycle du gel la température a baissé jusqu'à  $-2.5^{\circ}\text{C}$  ; l'eau est gelée dans les pores et les échantillons ont subi des déformations importantes dans les deux sens verticaux et horizontaux. Lors du séchage de larges fissures sont apparues suite à la fonte de gel.

On peut dire que la composition minéralogique des deux sols a joué un rôle important dans les résultats de cet essai sachant que la marne 1 est composée de *chlorite-serpentine* et la marne 2 porte aussi le *clin-chlore* les deux sont proches des élixes qui ont une propriété de gonflement moyenne, et la présence de *moscovite* qui a une forte sensibilité à l'eau se qui explique la forte production des fins.

## **IV ESSAI DE DEGRADABILITE (norme NF P 94-067)**

### **IV-1 But d'essai**

Constater les effets des cycles de séchage humidification sur les sols étudiés.

### **IV-2 Appareillage et matériel d'essai**

Les éléments constituant l'appareillage sont :

- Etuve réglable ( $105^{\circ}\text{C}$ ) ;
- balance de précision à  $\pm 0,1\text{ gr}$  ;
- une seringue ;
- Bacs métalliques.

### **IV-3 Déroulement d'essai**

- Préparer les échantillons ;
- Mesurer les masses des échantillons avant l'essai ;

- Imbiber les échantillons pendant  $8h \pm 1h$  ;
- Etuvage pendant  $16h \pm 1h$ .

Suivre la réalisation de quatre cycles d'imbibition/séchage pendant 4 jours.

### **Remarque**

On n'a pas pu respecter la norme, car la norme est destinée aux sols rocheux, nous avons utilisé des sols fins, donc on l'a modifiée comme suit :

- au lieu d'imbiber les échantillons on les a mouillés à l'aide d'une seringue jusqu'à saturation des échantillons (Figure V-17), pour garder leur forme, la procédure d'ajout de l'eau durant les quatre cycles est représentée dans le tableau ci-dessous.

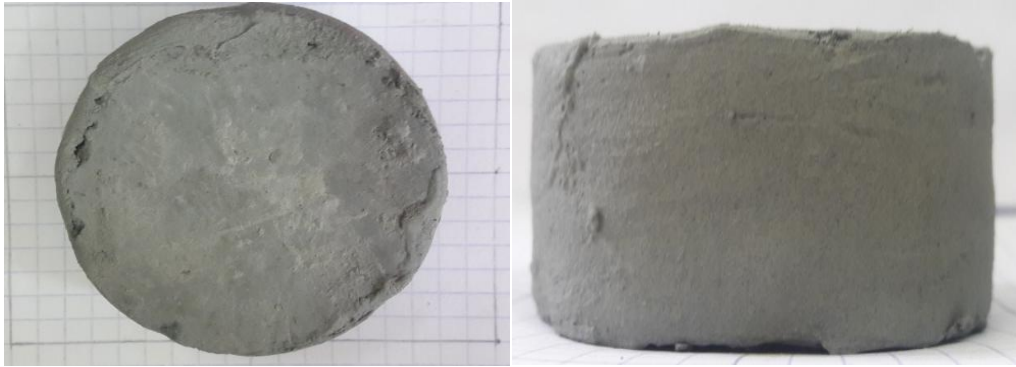
**Tableau V-2** : Procédure de mouillage des échantillons.

Les parties d'ajout d'eau	La quantité d'eau	heure
1 <sup>er</sup> partie	10 ml	8 :30
2 <sup>ème</sup> partie	5 ml	9 :45
3 <sup>ème</sup> partie	5 ml	10 :35
4 <sup>ème</sup> partie	5 ml	12 :30
5 <sup>ème</sup> partie	10 ml	14 :30
6 <sup>ème</sup> partie	-	16:00
	= 35 ml	8 h

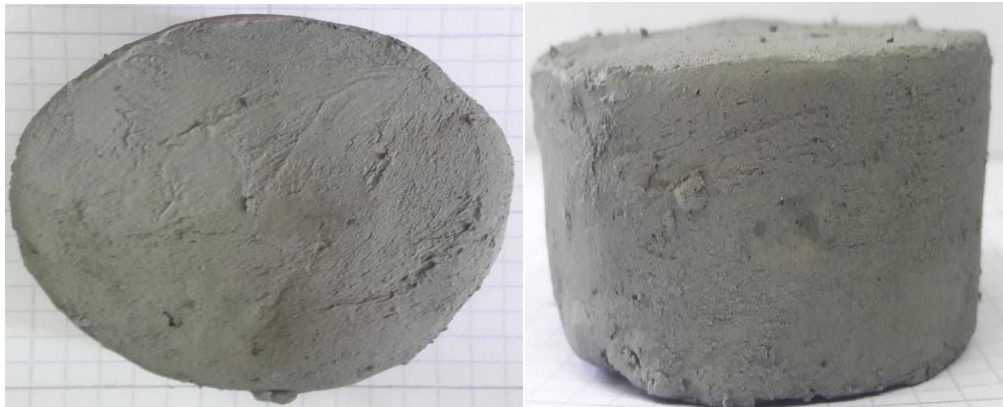


**Figure V-17** : Mouillage des échantillons à l'aide d'une seringue.

**IV-4 Les différentes images obtenus ou coures de cet assai**



**Figure V-18 :** Echantillon 1 marne 1 avant essai.



**Figure V-19 :** Echantillon 2 marne 1 avant essai.



**Figure V-20 :** Echantillon 1 marne 2 avant essai.



**Figure V-21** : Echantillon 2 marne 2 avant essai.



**Figure V-22** : Echantillon 1 marne 1 après le 1<sup>er</sup> cycle.



**Figure V-23** : Echantillon 2 marne 1 après le 1<sup>er</sup> cycle.



**Figure V-24:** Echantillon 1 marne 2 après le 1<sup>er</sup> cycle.



**Figure V-25 :** Echantillon 2 marne 2 après le 1<sup>er</sup> cycle.



**Figure V-26 :** Echantillon 1 marne 1 après le 2<sup>em</sup> cycle.



**Figure V-27** : Echantillon 2 marne 1 après le 2<sup>em</sup> cycle.



**Figure V-28**: Echantillon 1 marne 2 après le 2<sup>em</sup> cycle.



**Figure V-29** : Echantillon 2 marne 2 après le 2<sup>em</sup> cycle.



**Figure V-30** : Echantillon 1 marne 1 après le 3<sup>em</sup> cycle.



**Figure V-31** : Echantillon 2 marne 1 après le 3<sup>em</sup> cycle.



**Figure V-32** : Echantillon 1 marne 2 après le 3<sup>em</sup> cycle.



**Figure V-33** : Echantillon 2 marne 2 après le 3<sup>em</sup> cycle.



**Figure V-34** : Echantillon 1 marne 1 après le 4<sup>em</sup> cycle.



**Figure V-35** : Echantillon 2 marne 1 après le 4<sup>em</sup> cycle.



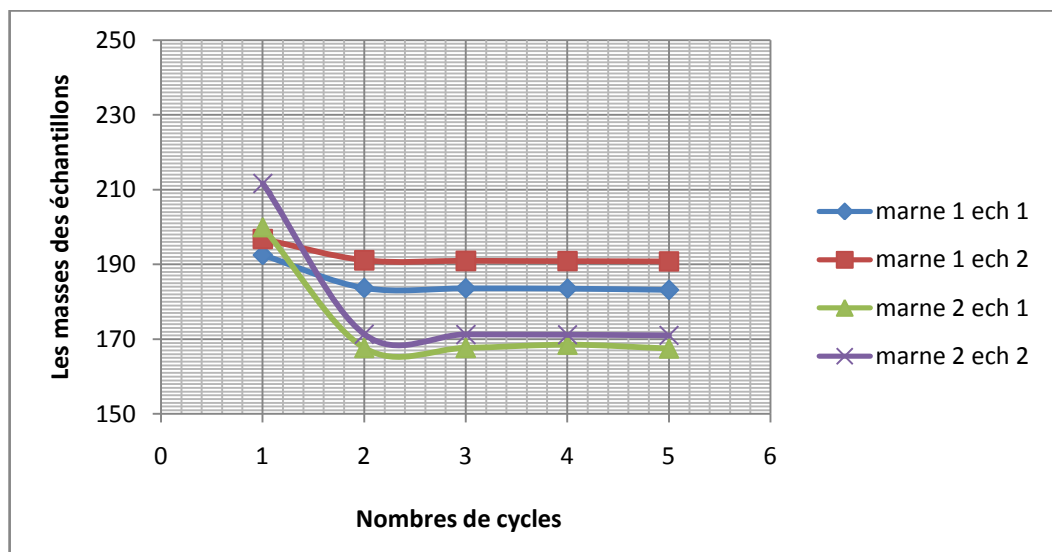
**Figure V-36** : Echantillon 1 marne 2 après le 4<sup>em</sup> cycle.



**Figure V-37** : Echantillon 2 marne 2 après le 4<sup>em</sup> cycle.

**Tableau V-3 : Les masses des échantillons avant et après l'essai.**

Marne 1	Masse(g)		Marne 2	Masse (g)
		Avant l'essai		
Echantillon 1	192,492		Echantillon 1	199,980
Echantillon 2	196,785		Echantillon 2	211,661
		Après 1 <sup>er</sup> cycle		
Echantillon 1	183,706		Echantillon 1	167 ,632
Echantillon 2	191,094		Echantillon 2	171,326
		Après 2 <sup>em</sup> cycle		
Echantillon 1	183 ,606		Echantillon 1	167,537
Echantillon 2	190.940		Echantillon 2	171,229
		Après 3 <sup>em</sup> cycle		
Echantillon 1	183,546		Echantillon 1	168,530
Echantillon 2	190.894		Echantillon 2	171,165
		Après 4 <sup>em</sup> cycle		
Echantillon 1	183,146		Echantillon 1	167,502
Echantillon 2	190.795		Echantillon 2	171,026



**Figure V-38 : Variations des masses des échantillons en fonction des cycles.**

#### **IV-5 Interprétations des résultantes**

A partir des résultats obtenus au cours de l'essai de dégradabilité, on voit bien la différence entre les images prises avant, pendant et après chaque cycle (Figure V-18,...37), les observations ont montré une diminution de la masse (Figure V-38) et un retrait volumique irréversibles des échantillons durant la phase de séchage du première cycle ; ainsi qu'un réarrangement de la texture surfacique. Les fissures commencent à s'ouvrir, elle réapparaissent à chaque phase de séchage, dans les deux plans verticale et horizontale, et leur ouvertures augmentent après chaque cycle de séchage, comme on a remarqué aussi une fermeture de certaines fissures au cours de la phase d'humidification, comme on a constaté une certaines pertes des fines en passant d'un cycle a un autre, comme le montre la figure ( V-35).

#### **V- CONCLUSION**

L'analyse des résultats des essais présentés de ce chapitre nous a permet d'avoir une idée sur les effets climatiques que peut subir le sol étudié, dans la nature. Ces effets sont appliqués aux échantillons en réalisant les essais de dégradabilité et de gel-dégel, les résultats sont comme suit :

- Des réarrangements de la texture surfaciques des échantillons.
- Des fissurations et des déformations dans les deux plans suivis de pertes de fines.

Tous ces effets sont liés à la présence de l'eau, qu'influe sur les caractéristiques physiques et minéralogiques des sols.

***Chapitre VI :***

***Calcul de la dimension fractale***

## I- INTRODUCTION

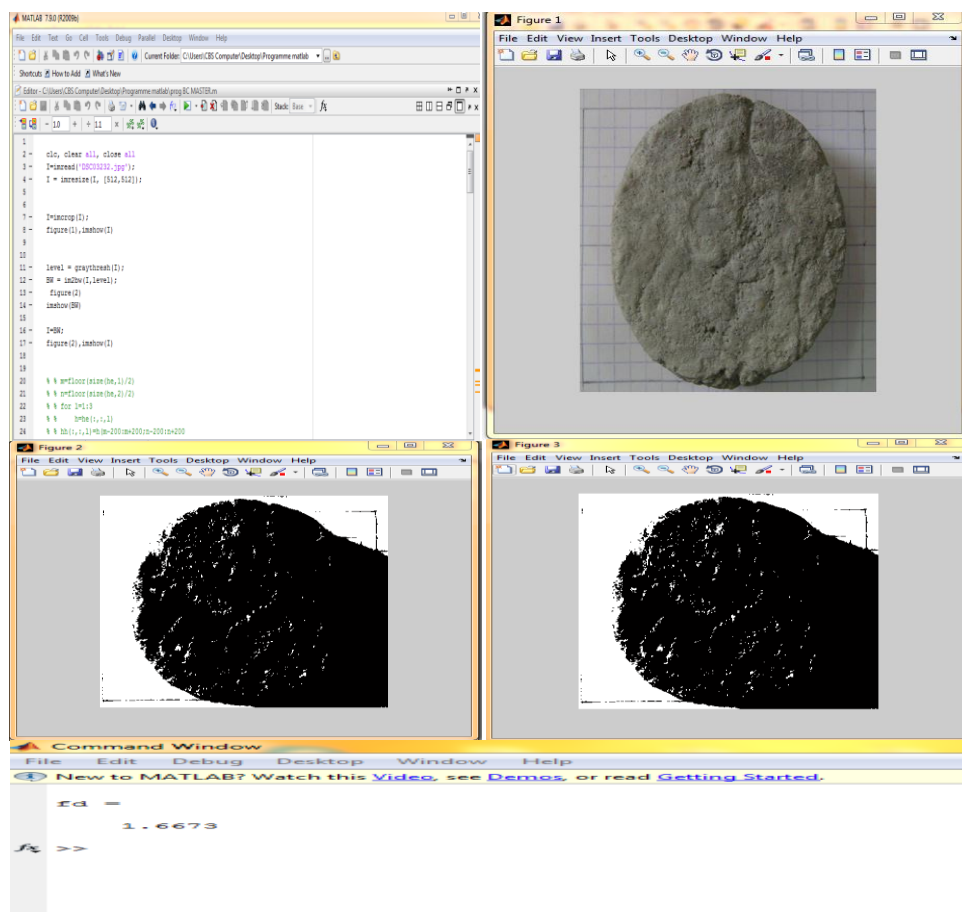
Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats des différentes mesures de la dimension fractale faite aux deux matériaux utilisés (marne de deux sites différents).

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

## II-DETERMINATION DE LA DIMENSION FRACTALE PAR LA METHODE DE BOX COUNTING

La dimension fractale a été calculée pour les différents échantillons étudiés, en utilisant le logiciel MATLAB R2009b, pour faciliter les calculs, à l'aide d'un programme implémenté qui traite leur contour et leur texture suivant le même principe que la méthode de Box Counting (**Figure VI-1**).

*Exemple de calcul de la dimension fractale par le logiciel MATLAB R2009b:*



**Figure VI-1 :** Les étapes de calcul de la dimension fractale par le logiciel MATLAB.

### III- RESULTATS DU CALCUL DE LA DIMENSION FRACTALE

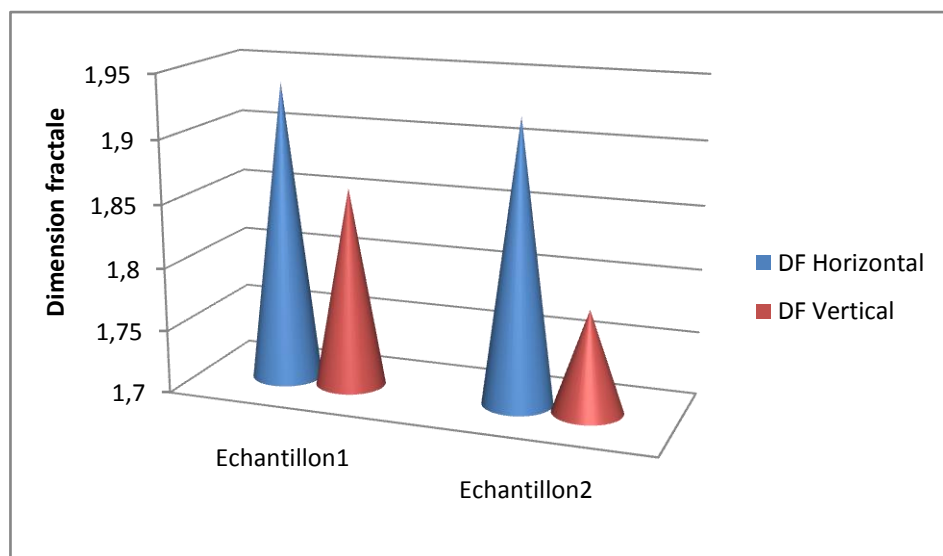
#### III-1 Essais Gel-dégel

Marne 1 :

Avant l'essai

**Tableau VI-1** : Résultats du calcul de la dimension fractale de la marne 1 avant l'essai.

Echantillon	DF horizontale	DF verticale
Echantillon 1	1,9376	1,8582
Echantillon 2	1,9227	1,7809

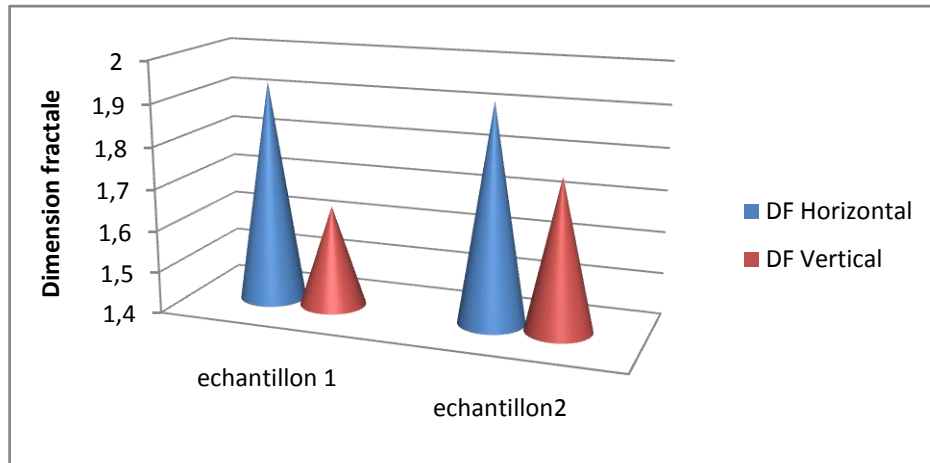


**Figure VI-2** : Valeurs de la dimension fractale de la marne 1 avant l'essai.

Après essai

**Tableau VI-2** : Résultats de la dimension fractale de la marne 1 après l'essai.

Echantillon	DF horizontale	DF verticale
Echantillon 1	1,9331	1,6429
Echantillon 2	1,9216	1,7624



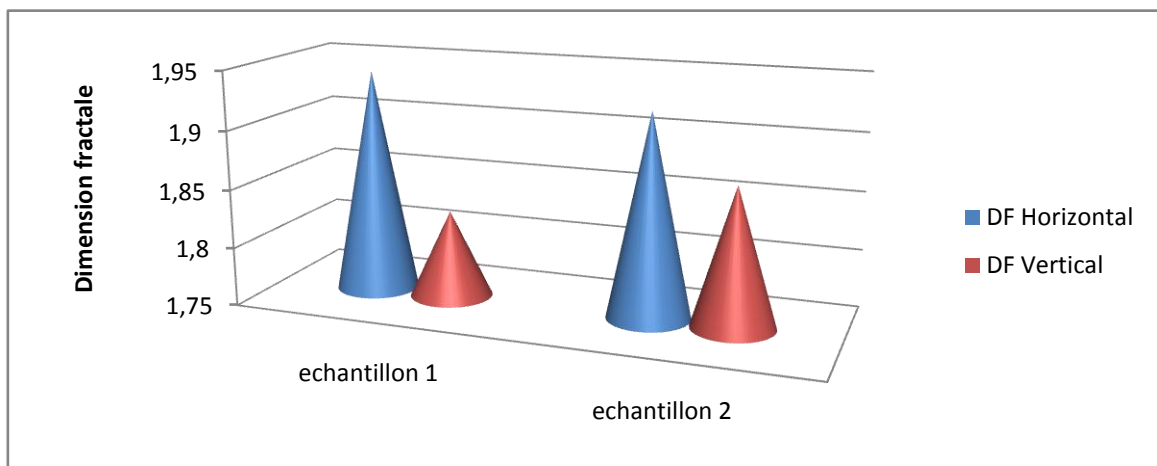
**Figure VI-3 :** Résultats de la dimension fractale de la marne 1 après l’essai.

**Marne 2 :**

**Avant l’essai**

**Tableau VI-3 :** Résultats de la dimension fractale de la marne 2 avant l’essai.

Echantillon	DF Horizontale	DF Verticale
Echantillon 1	1,9414	1,8246
Echantillon 2	1,9235	1,8686

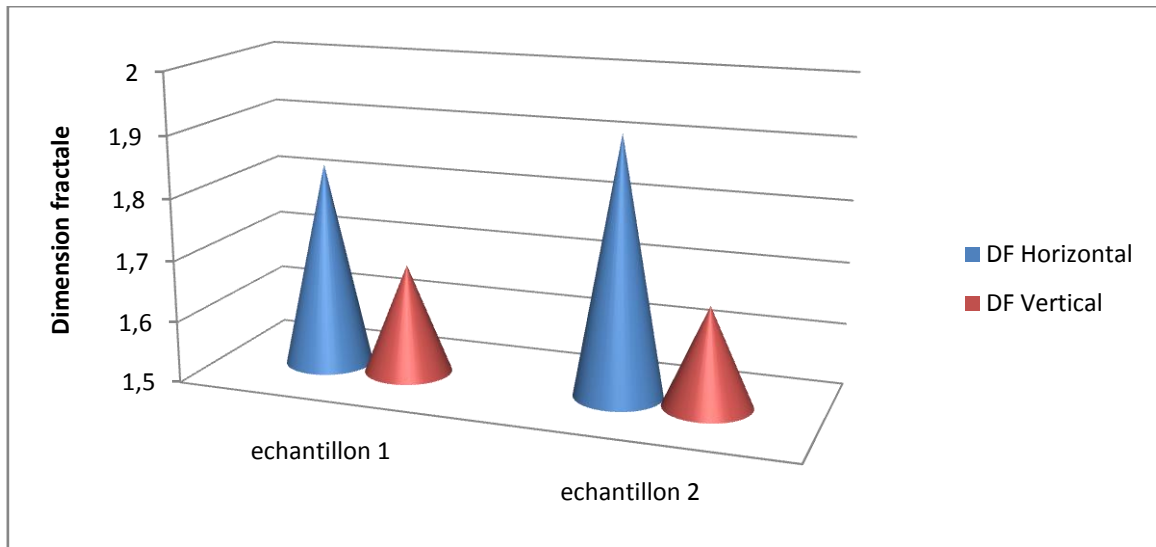


**Figure VI-4 :** Résultats de la dimension fractale de la marne 2 avant l’essai.

**Après l’essai**

**Tableau VI-4 :** Résultats de la dimension fractale de la marne 2 après essai.

Echantillon	DF Horizontale	DF Verticale
Echantillon 1	1,8338	1,6784
Echantillon 2	1,9171	1,6620



**Figure VI-5 :** Résultats de la dimension fractale de la marne 2.

### Interprétations et comparaisons des résultats

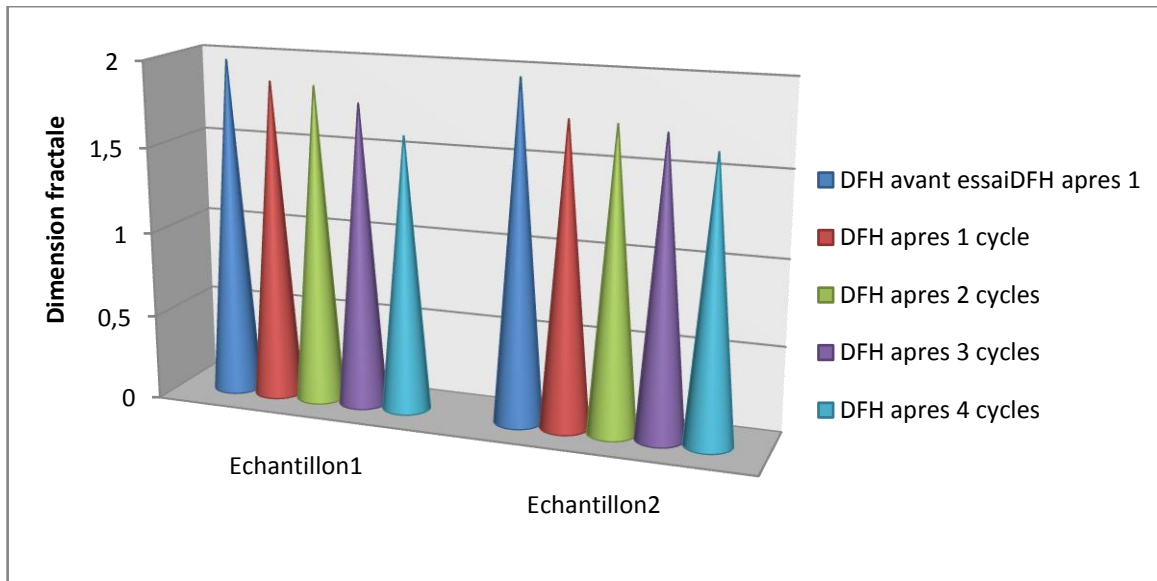
Des différents résultats sont obtenus pour les deux marnes ; la variation de la dimension fractale avant et après essais est remarquable, on voit bien l'influence des cycles de gel-dégel sur les échantillons des deux sols et sur les valeurs de leurs dimensions fractales, les changements marqués suivant le plan horizontal sont moindres par rapport à ceux suivant le plan vertical, où nous avons remarqué bien une diminution importante de la dimension fractale, ce qui est dû aux déformations et aux fissurations des échantillons surtout sur les côtes.

### III-2 Dégradabilité

#### Marne 1 :

**Tableau V-5 :** Résultats de la dimension fractale horizontale de la marne 1.

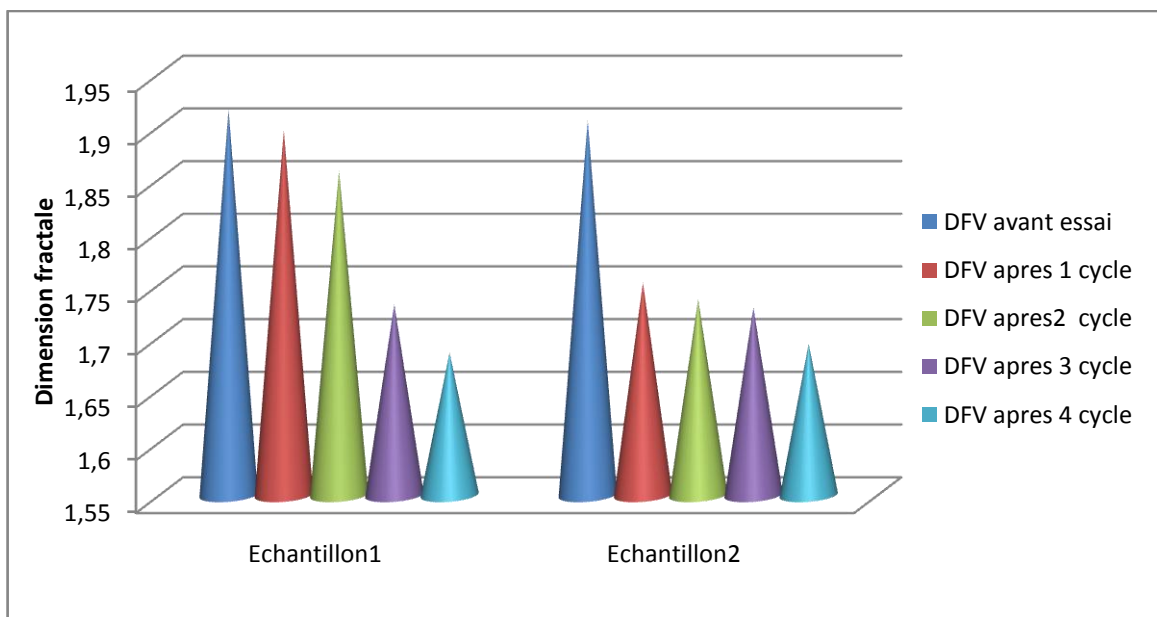
Echantillon	DFH avant essai	DFH après 1 cycle	DFH après 2 cycles	DFH après 3 cycles	DFH après 4 cycles
Echantillon 1	1,9733	1,8642	1,8542	1,7692	1,6018
Echantillon 2	1,9674	1,7560	1,7460	1,7181	1,6321



**Figure VI-6 :** Résultats de la dimension fractale horizontale de la marne 1.

**Tableau VI-6 :** Résultats de la dimension fractale verticale de la marne 1.

Echantillon	DFV avant essai	DFV après 1 cycle	DFV après 2 cycles	DFV après 3 cycles	DFV après 4 cycles
Echantillon 1	1,9163	1,8962	1,8581	1,7312	1,6856
Echantillon 2	1,9060	1,7518	1,7360	1,7281	1,6937



**Figure VI-7 :** Variation de la dimension fractale verticale de la marne 1.

## Marne 2 :

Tableau VI-7 : Résultats de la dimension fractale horizontale de la marne 2.

Echantillon	DFH avant essai	DFH après 1 cycle	DFH après 2 cycles	DFH après 3 cycles	DFH après 4 cycles
Echantillon 1	1,9557	1,9133	1,9049	1,8488	1,7594
Echantillon 2	1,9940	1,9113	1,9024	1,8729	1,6546

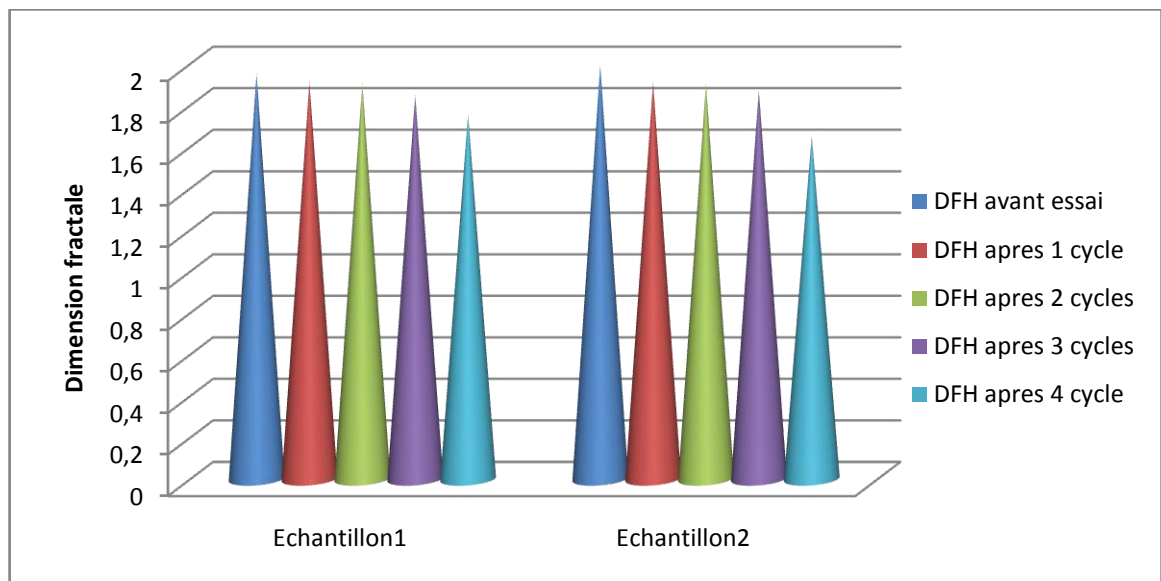
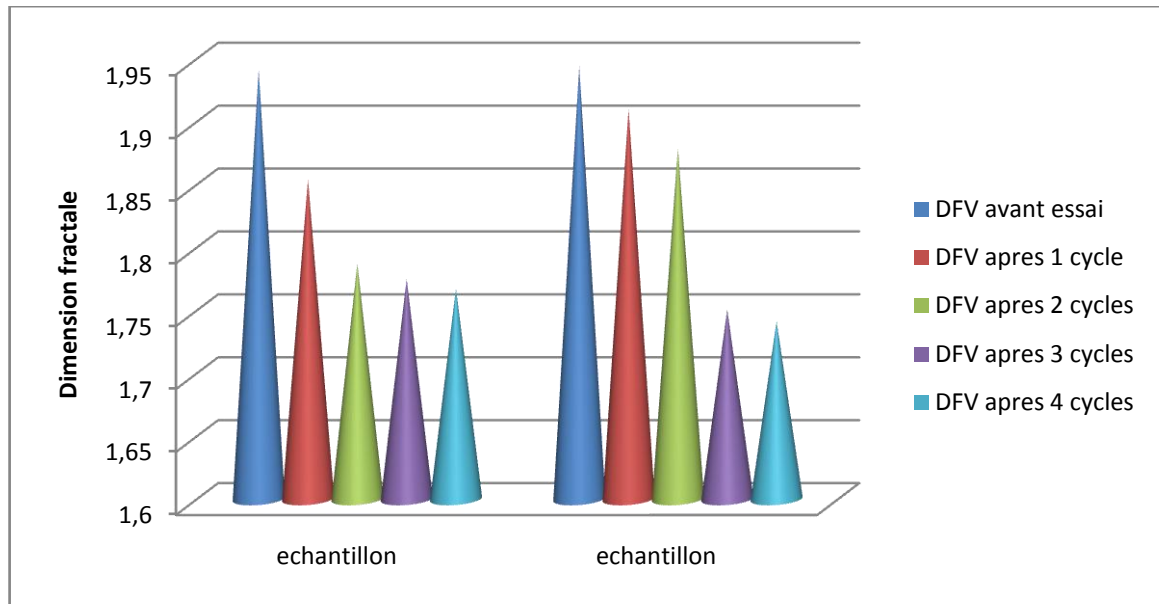


Figure VI-8 : Variation de la dimension fractale horizontale de la marne 2.

Tableau VI-8 : Résultats de la dimension fractale verticale de la marne 2.

Echantillon	DFV avant essai	DFV après 1 cycle	DFV après 2 cycles	DFV après 3 cycles	DFV après 4 cycles
Echantillon 1	1,9413	1,8542	1,7871	1,7751	1,7674
Echantillon 2	1,9442	1,9101	1,8791	1,7508	1,7415



**Figure VI-9 :** Résultats de la dimension fractale verticale de la marne 2.

### Interprétations des résultats

Des différents résultats obtenus au cours de cet essai ; on remarque bien l'influence des cycles immersions- séchages sur les résultats du calcul de la dimension fractale, et les résultats montrent la diminution des dimensions fractales en passant d'un cycle à un autre.

### IV- CONCLUSION

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

## CONCLUSION GENERALE

Le but principal de ce travail est de mettre en évidence l'influence des changements climatiques sur la dégradation des sols en termes de dimension fractale.

Cette étude conduit dans un premier temps à la réalisation des deux essais suivant :

*Gel-dégel*, l'essai de *Dégradabilité* et dans un deuxième temps à mettre en évidence la notion de la dimension fractale des échantillons en fonction de leur dégradabilité.

Les principaux résultats obtenus permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Les matériaux étudiés ont une granulométrie très fins et présente une grande sensibilité à l'eau.
- Les deux marnes sont très dégradables, on a marqué une production importante des particules fines au cours des essais gel-dégel et dégradabilité.

Finalement la dimension fractale dépend de la nature des caractéristiques physiques et minéralogiques des grains de sol.

Plus les minéraux sont résistants plus les échantillons sont moins dégradables et moins sensibles aux essais gel-dégel.

Ce travail n'est qu'une introduction au domaine des fractales et la dimension fractale, il nécessite d'autres recherches plus approfondies, pour caractériser et cerner mieux les modèles fractals dans les sols. Pour s'ouvrir beaucoup plus sur cette notion des fractales, nous conseillons nos chercheurs de travailler sur la méthode de Box Counting pour la détermination de la dimension fractale de rugosité  $DF_R$ , à condition d'utiliser des techniques très avancées pour la prise d'images des échantillons, en général cette méthode a un rapport directe avec les essais et les études géotechniques.

# Références bibliographiques

**ACHIR, M (2011)**

« Caractérisation du phénomène d'écrasement par l'étude de la dimension fractale des grains », Mémoire de magister de L'UMMTO ,2011.

**AFNOR (1995)**

« Géotechnique, essai de reconnaissance des sols(TOME1) »,1995.

**BENOIT, T (2005)**

« Fractales et autosimilarité » ; université plaise pascal, prix jeune chercheure 2005.

**BERGA, A (2003-2004)**

« Eléments de Mécanique des Sols », Centre Universitaire de Béchar, 2003-2004.

**BOUCHEZ, C (2008)**

« Rapport de sédimentologie : étude des milieux de dépôts », L3 Sciences de la Terre et des Planètes, pp2-8.

**BOUDLAL, O (2013)**

« Etude expérimentale du comportement mécanique des fines dans la stabilité des talus et des fondations », Thèse de Doctorat de L'UMMTO, 2013.

**BOUZEBOUDJA, A (2016)**

« L'influence de la dimension fractale en 3D sur les caractéristiques mécaniques des matériaux granulaires », Thèse de Doctorat de L'UMMTO, 2016.

**BOUZEBOUDJA, H (2015)**

« Étude de la dimension fractale des grains en fonction de leur écrasement à l'essai de cisaillement », Mémoire de MASTER de L'UMMTO, 2015.

**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.

**CHUICHA, K (2006)**

« La dimension fractale et l'étendue granulaire comme paramètre d'identification des mélanges granulaires » ; (journal article) materials and structures, 2006, volume, 39number 7.

**DJEBRA, T (2014)**

« Caractérisation mécanique et minéralogique des marnes de la Grande Kabylie (application aux marnes du nord et de l'est) », Mémoire de MASTER de L'UMMTO, 2014.

**Delahaye, D, et Le Roux, A (1975)**

« Désordres sur des remblais en marne, Bulletin de liaison des laboratoire des ponts des chaussées ». -75-Réf. 1975.

**DUNOYER de Segonzac, G (1969)**

« Les matériaux argileux dans la diagenèse, passage au métamorphisme » ; Mémoire du Service de la carte géologique d'Alsace et de Lorraine, n° 29.

**ELMALEH, F. NGUYEN, S (2003)**

« Introduction aux fractales » ; Lycée La Fontaine, paris, TPE 2002-2003.

**FALCONER, K, CHICHESTER, WILEY, J et SONS (1990)**

« Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications » 2e éd, poche (ISBN 978-0 470-84862-3) (LCCN 2004271361).

**FEDER, J (1988)**

« Fractals »; plenum press New York, 1988.

**GOUYET, J.F (1992)**

« Physique et structure fractales»; paris New York,Ed.masson, 1992.

**HAMMAR, D et MEZINI, S (1996)**

« Identification et Caractérisation Mécanique de la Marne de Tizi-Ouzou : Application au Domaine Routier », Mémoire d'ingénieur d'état en Génie Civil.

**HOFFMANN, C (2009)**

« Une brève explication de la géométrie fractale » ; primary Care 2009 ; 9N°10, Suisses.

**HUGHES, L (2006)**

« Fissures rocheuses » ; thèse de doctorat de la Faculté Polytechnique de Mon, 2006.

**JENNINGS, J, E, B et BURLAND, J, B (1962)**

“Limitations to the use of effective stresses concept in partly saturated soils”; Géotechnique, vol .12

**KELLOUCHE, A (2010)**

« Influence de la dimension fractale sur le cisaillement des grains à la boîte de casa grande », Mémoire de MASTER 2 de L'UMMTO, 2010.

**MANDELBROT, B.B (1975)**

« Les objets fractales forme, hasard et dimension » ; pris (France), Edition Flammarion 1975.

**MEDJNOUN, A (2014)**

« Analyse, caractérisation, prévision et modélisation du comportement des argiles gonflantes », Thèse de Doctorat de L'UMMTO, 2014.

**MELLAL, F et LAMRI, B (2010)**

« Étude du comportement d'un remblai routier traité à la chaux, cas de L'autoroute Est-Ouest », Doctorant, Université Hassiba Benbouali de Chlef.

**MOUROUX, P et MARGON, P et PINTE, J-C (1988)**

« La construction économique sur les sols gonflants » ; Manuels et Méthodes, 14, BRGM, France.

**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.

**P 18-592 (1990)** : Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à tache.

**LERAU, J (2006)**

« Géotechnique 1, Cours-Chapitres 1 », Institut National Des Sciences Appliquées de Toulouse, 2005-2006.

**OUAAZ, O (2014)**

« Étude de la dégradation des grains sous les conditions climatiques : calcul de leur dimension fractale », Mémoire de MASTER de L'UMMTO, 2014.

**OUTAYEB, S (2015)**

« Évaluation de la dégradation chimique des grains de schiste à l'aide de la notion de la dimension fractale », Mémoire de MASTER de L'UMMTO, 2015.

**OUZIA, DJ (2013)**

« Influence de l'eau sur le comportement mécanique du matériau marne », Mémoire de MASTER de L'UMMTO, 2013.

**Pejon, O J, Le Roux, A et Guignard, d (1997)**

« Comportement à l'eau des roches argilo-marneuses, suivi du gonflement, importance de la minéralogie et des textures » ; bulletin de l'association internationale de géologie de l'ingénieur.

**Robitaille, V et Tremblay, D (1997)**

« Mécanique des sols théorie et pratique », Modulo éditeur, Québec.

SCHMIDT, V (1965)

« faciès , diagenesis and reservoir properties in the Gigas beds (upper Jurassic) Northwestern Germany in Dolomitization and Limestone diagenesis, Soc.Econ. Pal Miner, Spec.Publ,13.”

**YEZLI, S (2011)**

« Influence de la dimension fractale sur les caractéristiques mécanique des matériaux » ;  
Mémoire de magister de L' UMMTO, 2011.

**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, 1999.

### **Les sites d'internet :**

- [\*http://www.mathcurve.com/fractals/sierpinski/sierpinski.shtml\*](http://www.mathcurve.com/fractals/sierpinski/sierpinski.shtml)
- [\*http://www.mathcurve.com/fractals/peano/peano.shtml\*](http://www.mathcurve.com/fractals/peano/peano.shtml)
- [\*http://www.mathcurve.com/fractals/peano/peanogeneralisee.shtml\*](http://www.mathcurve.com/fractals/peano/peanogeneralisee.shtml)
- [\*http://books.google.com/books?q=dimension+fractale&btnG=Chercher+des+livres&hl=fr\*](http://books.google.com/books?q=dimension+fractale&btnG=Chercher+des+livres&hl=fr)
- [\*http://membres.lycos.fr/lesfractales/frame.html\*](http://membres.lycos.fr/lesfractales/frame.html)