

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Université Ahmed Draia Adrar
Faculté Des Sciences et de Technologies
Département Des Sciences et Technologie



Mémoire De Fin D'étude En Vue De L'obtention Du Diplôme :
Master En Génie Civil
Option : Géo-matériaux et Structures

Présenté Par :

Boussaid Wafa
Baouahhab Keltoum

THEME

***Caractérisation physico-chimique des gisements
des argiles à la région d'Adrar***

Soutenu Le 21/09/2015 Devant Un Membre De Jury Composé De :

Mr. Bassoud Abdelkader
Mr. Akacem Moustafa
Pr. MEKERTA Belkacem
Mr. MOULAY OMAR Hassan

President
Examineur
Encadreur
Co-Encadreur

Année Universitaire 2014-2015

Remerciements

Au début nous remercions dieu qui nous a donné la volonté et la confiance pour achever ce modeste travail.

Nous remercions chaleureusement l'encadreur Mr.Mekerta Belkacem, qui a orienté notre travail et nous faire bénéficier de leurs connaissance et qui nous ont guide des débuts jusqu'à moment à exposer notre travail.

Je remercie Monsieur Bassoud Abdelkader qui on a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire, qu'il trouve ici l'assurance de nos respectueuse gratitude.

Je remercie également, Monsieur : Akacem Moustafa d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Nous remercions spécialement Mr.Shemsa Abdel Aziz, Mr.Moulay Omar Hassen,,Mr.Abbou Mohamed Mme.Belaidi Khadija, , qui, nous avons favorablement aidé par son conseils et son orientations très précieuses.

Je remercie pareillement l'ensemble des membres du laboratoire de génie civil de l'Université d'Ahmed Draya Adrar notamment Yaaichi Abdelkrim, Houtiya Abdarahim.

Nous ne saurais oublions tous les responsables de la faculté de science et de technologie surtout le département de Génie civil, de l'université d'Adrar de nos avoir facilité l'accès au laboratoire.

Sans oublier le remerciement des personnes qui nous ont donnés le courage et qu'ont acceptées de changer avec eux les idées sur notre thème choisi. remerciements vont aussi aux enseignants du département des sciences et science de technologie surtout les enseignants de la spécialité Génie Civil.

Enfin nous remercions aussi mes amis pour leur soutien moral et leur encouragement à suivre nos étude, ainsi tous ce qui contribuer à la réalisation de ce mémoire.

Wafa et Kelthoum

Sommaire

Notation.

Liste des figures.

Liste des photos.

Liste des tableaux.

Introduction générale	IX
CHAPITRE I: Analyse des travaux antérieurs sur les argiles.	
I.1) Généralités sur les argiles.....	1
I.2) Structure des argiles.....	1
I.2.a. Le tétraèdre de silice.....	1
I.2.b. L'octaèdre d'alumine.....	2
I.3) Principaux groupes de minéraux argileux.....	2
I.3.1. Structure de la montmorillonite.....	3
I.3.2. Structure de la kaolinite.....	3
I.3.3. Structure de l'illite.....	4
I.4) Propriétés des argiles.....	5
I.4.1. Forme et surface spécifique.....	5
I.4.1.a. La forme.....	5
I.4.1.b. La surface spécifique.....	6
I.4.2. Capacité d'échange cationique CEC.....	7
I.4.3. Degré d'hydratation.....	8
I.4.4. Activité des argiles.....	9
I.5) Mécanismes de gonflement des argiles.....	10
II.6) Conclusions.....	10
CHAPITRE II: Identification des matériaux d'étude.	
II.1) Introduction.....	11
II.2) Caractérisation des sédiments.....	11
II.3) Caractéristique physiques.....	11
II.3.1. Poids spécifique des grains solides (Norme NF P94-05).....	11
II.3.1.1. Définition.....	11

II.3.1.2. Principe de mesure.....	11
II.3.1.3. Expressions des résultats.....	12
II.3.2. Analyse granulométrique (Norme NF P94-057).....	13
II.3.2.1. Analyse par tamisage.....	13
II.3.2.2. Principe de l'essai.....	13
II.3.2.3. Analyse par sédimentométrie.....	14
II.3.2.3.1. Principe de l'essai.....	15
II.3.2.3.2. Présentation des résultats.....	16
II.3.3. Essai des limites d'Atterberg.....	17
II.3.3.1. préparation de sol.....	17
II.3.3.2. Détermination de la limite de liquidité.....	18
II.3.3.2.1. principe de l'essai.....	18
II.3.3.3. Détermination de la limite de plasticité.....	20
II.3.3.3.1. Mode opératoire.....	20
II.3.3.4. Indice de plasticité.....	21
II.3.3.5 l'indice de consistance.....	22
II.3.3.5. Abaque plasticité de casagrande.....	22
II.3.3.6. Activités des argiles.....	23
II.3.3.7. Limite des retrait.....	24
II.3.3.7.1) Mode opératoire.....	24
II.3.4. Essai au bleu de méthylène a la tache (Norme NF P94-068).....	26
II.3.4.1. Introduction.....	26
II.3.4.2. Définition.....	26
II.4) Classification du sol.....	30
II.4.1. Classification du sol selon le GTR.....	30
II.4.2. Classification du sol selon le LCPC.....	31
II.5) Caractéristique chimique.....	31
II.5.1. Teneur en carbonate CaCO ₃	31

II.5.1.1. Introduction.....	31
II.5.1.2.Définition.....	31
II.5.1.3.Classification.....	32
II.5.1.4.Expression des résultats.....	33
II.6) Etude du phénomène de gonflement des argile.....	33
II.7) Conclusions.....	35
CHAPITRE III: Contexte géologique des argiles	
III.1) Introduction.....	36
III.2) Les gisement d'argile au niveau de la wilaya d'Adrar.....	36
III.3) Localisation de site.....	37
III.3.1. Argile d'Adrar Nord	37
III.3.2. Argile Tililane.....	39
III.4) Contexte géologique de la région.....	39
III.5) La relation enter la nature des argile étudiées et la Contexte géologique de la région.....	40
III.6) Domaine d'utilisation des argiles.....	41
III.6.1.L'utilisation des argiles étudiées au remblai et couche de forme.....	41
III.7) Conclusion.....	42
Conclusion générale.....	43
Bibliographique	
Annexes	

Liste des symboles

Al⁺³	: Ion d'aluminium
A₁	: Activité d'après Skempton
A₂	: Activité d'après Seed et al
Al₂O₃	: Oxyde d'aluminium
C₂	: Pourcentage des éléments inférieur à deux microns
Ca⁺⁺	: Ion de calcium
C.E.C	: Capacité d'échange cationique (meq/100g)
H₂O	: Eau
H	: Hauteur (m)
I_p	: Indice de plasticité
A_c	: Activités des argiles
K⁺	: Ion de potassium
Mg⁺²	: Ion de magnésium
Na⁺	: Ion de sodium
O⁻²	: Ion d'oxygène
Si⁺⁴	: Ion de silicium
SiO₂	: Oxyde de silicone
Sst	: Surface spécifique totale (m ² /g)
T	: Temps (s)
T-O	: Tétraédrique- octaédrique
Vcc	: volume de solution utilisé
N	: Indice de nocivité

USTMB	: Université des sciences technique Mohamed Boudiaf
IGCM	: Institut génie Civile et maritime.
LCPC	: Laboratoire Centrale des ponts et chaussées.
GTR	: Guide technique routière.
VB	: Volume de bleu méthylène (ml)
W	: Teneur en eau (%)
WL	: Limite de liquidité (%)
W_p	: Limite de plasticité (%)
W_R	: Limite de retrait (%)
OH	: Hydroxydes
Fe+	: Ion de fer
γ_s	: Poids spécifique du solide (Kg/m ³)

DESIGNATION DES FIGURES

Chapitre .I

Figure	Page
Figure I.1: Représentation schématique d'un tétraèdre et d'une couche tétraédrique.....	1
Figure I.2: Représentation schématique d'un tétraèdre et d'une couche octaédrique.....	2
Figure I.3 : Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile.....	2
Figure I.4: Structure tridimensionnelle de la montmorillonite.....	3
Figure I.5: Structure tridimensionnelle de la kaolinite.....	4
Figure I.6: Structure tridimensionnelle de l'illite (Khelifa, 1994).....	4
Figure I.7 : Forme des particules argileuses (Fagel, 2005).....	6
Figure I.8: Surface des particules argileuses: interne et externe (Fagel, 2005).....	7
Figure I.9 : Abaque pour l'identification des sols gonflants.....	8

Chapitre .II

Figure II.1: Courbes granulométriques des deux argiles (Adrar Nord et Tililane).....	17
Figure II.2 : Courbe de la limite de liquidité (Argile rouge).....	19
Figure II.3 : Courbe de la limite de liquidité (Argile verte).....	20
Figure II.4 : Abaque de Casagrande.....	22
Figure II.5 : Définition des limites d'Atterberg (en particulier la limite de retrait).....	24
Figure II.6 : Schéma synoptique du processus opératoire de l'essai.....	27
Figure II.7 : Diagramme de nocivité (Lautrin, 1987).....	30
Figure II.8 : Classification de l'argile étudié en fonction de la VB.....	30

Chapitre .III

Figure III.1: Localisation du site Adrar nord.....37

Figure III.2: Plan de situation de gisement d’Adrar nord.....38

Figure III.3: Localisation du site Tililane.....39

DESIGNATION DES PHOTOS

Chapitre II

Photo	Page
Photo II.1 : L'appareillage de l'essai les poids spécifique des grains solides.....	12
Photo II.2 : Appareillage de l'essai de l'analyse par sédimentométrie.....	15
Photo II.3 : L'appareillage de l'essai des limites d'Atterberg.....	18
Photo II.4 : Mode opératoire de l'essai de la limite de palsticité.....	21
Photo II.5 : Appareillage de l'essai de la limite de retrait.....	25
Photo II.6 : L'appareillage de l'essai au bleu.....	26
Photo II.7 : Essai à la tache (Argile rouge et Argile verte).....	27
Photo II.8 : Appareillage de l'essai de la teneur en CaCO ₃	32

DESIGNATION DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau	Page
I.1 : Caractéristiques des argiles	05
I.2 : Surface spécifique des particules argileuses	06
I.3 :Capacité d'échange de cations (C.E.C) et surface spécifique totale (sst) de quelques argiles	08
I.4 : Activité de différents minéraux	09

Chapitre II

II.1 : Poids volumique des grains solides (Argile rouge)	12
II.2 : Poids volumique des grains solides (Argile verte)	13
II.3 : Analyse granulométrique par sédimentométrie (Argile rouge).....	16
II.4 : Analyse granulométrique par sédimentométrie (Argile verte).....	16
II.5 : Résultats de la limite de liquidité (Argile rouge)	19
II.6 : Résultats de la limite de liquidité (Argile verte)	19
II.7 : Résultats de la limite de plasticité (Argile rouge)	21
II.8 : Résultats de la limite de plasticité (Argile verte).....	21
II.9 : Etude du comportement plastique	23
II.10 : Activité des sols	23
II.11 : Activité des différents minéraux	24
II.12 : Résultats de la limite de retrait (Argile rouge)	25
II.13 : Résultats de la limite de retrait (Argile verte).....	25

II.14: Paramètres tirés de l'essai au bleu.....	28
II.15: Classification des sols.....	28
II.16: Représente la valeur de bleu de quelques sols	29
II.17: Classification	29
II.18 : Paramètres de classification des sols selon GTR.....	31
II.19 : Teneur en CaCO ₃ de quelques sols caractéristiques	32
II.20 : Laboratoire USTOMB (IGCM Oran)	33
II.21 : Estimation du potentiel de gonflement	33
II.22: Estimation du potentiel de gonflement	33
II.23: Estimation du potentiel de gonflement selon HOLTZ	34
II.24: Synthèse des paramètres physiques (argile rouge)	34
II.25: Synthèse des paramètres physiques (argile verte)	34

Chapitre III

III.1 : les données climatiques de la région d'Adrar.....	40
III.2: Paramètres des argiles en remblai et en couche de forme.....	41

Introduction générale

Les gisements d'argile sont nombreux et se trouvent en quantité considérable dans les contées lointains dans le sud algérien. Le géologue ou le pédologue considèrent comme «argile» tout minéral de faible granulométrie, la limite est fixée à 2 ou 4 microns selon les cas d'études. Certaines particularités essentielles caractérisent la structure d'une argile. Les sols argileux sont à craindre, puisque de par leur structure minéralogique, elles sont gonflantes et peuvent engendrer des désordres dans les bâtis.

Le premier chapitre est consacré à la présentation des différentes structures des argiles et aussi sur les mécanismes de gonflement des argiles.

Dans le second chapitre, on s'intéresse sur les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des sédiments bruts enlevés en deux endroits différents au niveau de la région d'Adrar. Les deux zones de cette étude se trouvent à Adrar nord et Tililane. Adrar nord, il s'agit d'une carrière d'argile qui se trouve à quelques kilomètres au nord de la ville d'Adrar (partie Est de la RN6), ce gisement a une couleur rouge et sert à alimenter la briqueterie d'Adrar. A Tililane, on est en présence d'une argile verte qui a été découverte au niveau d'une tranchée de construction.

Dans le troisième chapitre, il est question d'étudier la relation qui existe entre la nature géologique des argiles avec le contexte géologique.

Une conclusion générale résume les résultats obtenus lors de ce travail et des recommandations pour la suite des travaux de recherche.

Chapitre I
Analyse des travaux
antérieurs sur les argiles

I.1. Introduction

Les argiles sont des roches sédimentaires qui proviennent de l'altération chimique des roches et plus exactement des minéraux silicatés (Feldspaths, mica....). Selon leur origine, on distingue les argiles d'altération (formées principalement par l'altération des calcaires), les argiles fluviatiles (elles se déposent dans le lit majeur des fleuves lors des décrues), les argiles lacustres (déposées dans les lacs et étangs) et les argiles marines (argiles d'origine continentale déposées en milieu marin) [7].

Le géologue ou le pédologue considèrent comme « argile » tout minéral de faible granulométrie, la limite est fixée à 2 ou 4 microns selon les cas d'études. Les ingénieurs dans les disciplines de la construction s'intéressent aux propriétés de plasticité des matériaux argileux quelque soit leur taille, qui sont les limites d'Atterberg [8].

I.2. Structure des argiles :

Les argiles sont des aluminosilicates plus ou moins hydratés et la majorité des minéraux argileux appartiennent au groupe des silico-aluminates phylliteux. Ils sont organisés en couches planes infinies constituées d'unités structurales tétraédriques et octaédriques reliées par leurs sommets. Ces différentes structures associent les caractéristiques physico-chimiques très particulières, à savoir la capacité des argiles à admettre de nombreux échanges de cations et d'anions dans le réseau.

Les particules d'argile sont formées d'un empilement de feuillets qui sont constitués par l'association de deux unités structurales de base, ces feuillets sont formés par le rapprochement des couches structurales tétraédriques (silice) et octaédriques (aluminium). Les couches structurales sont formées d'unités structurales de base par empilement d'ions ou d'hydroxyles en orientation hexagonale ou compacte [13].

I.2.a. Le tétraèdre de silice SiO_4 :

Quatre atomes d'oxygène disposés au sommet d'un tétraèdre régulier enferment un atome de silicium. Les tétraèdres sont combinés entre eux pour former des couches planes appelées couches tétraédriques, voir Figure I.1 [13].

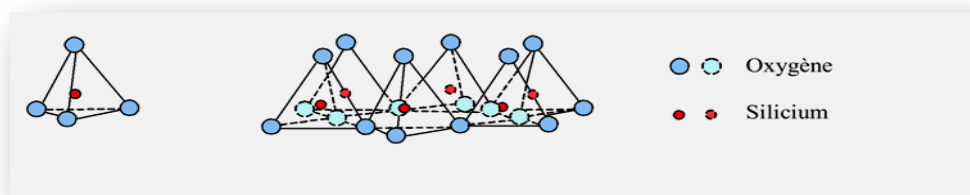


Figure I.1 : Représentation schématique d'un tétraèdre et d'une couche tétraédrique.

I.2.b.L'octaèdre d'aluminium ou de magnésium :

Six ions hydroxydes enferment un atome d'aluminium ou de magnésium. Les octaèdres se rangent pour former des couches planes appelées couches octaédriques (Figure I.2) [13].

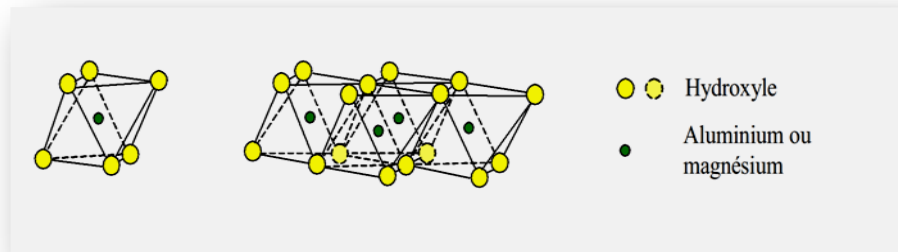


Figure I.2 : Représentation schématique d'un octaèdre et d'une couche octaédrique.

La figure I.3 nous montre une représentation schématique de la structure minéralogique d'une particule d'argile [3].

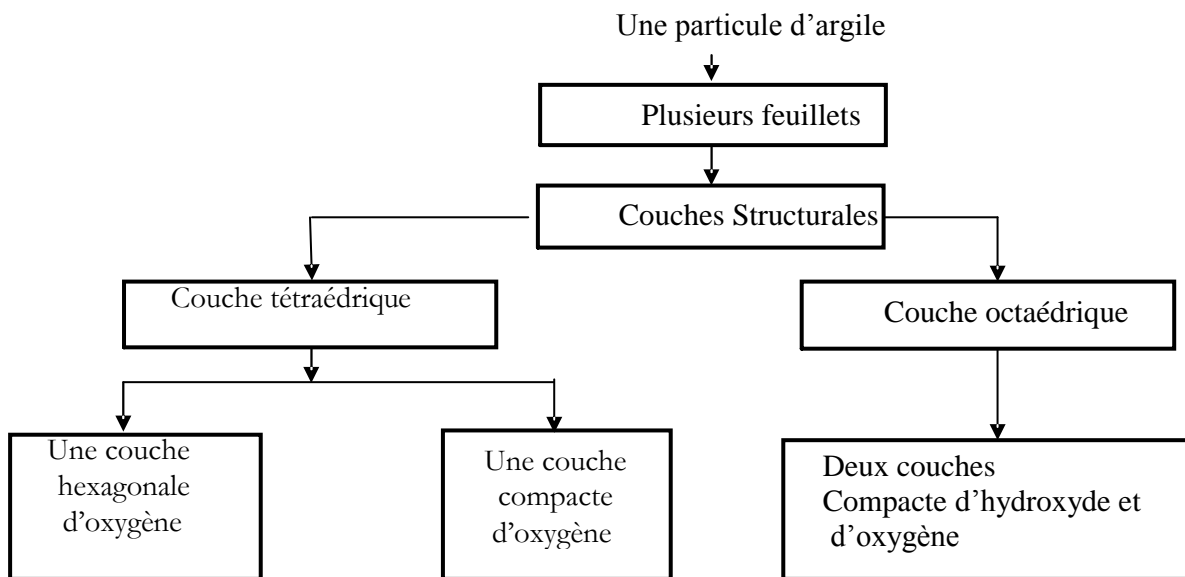


Figure I.3 : Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile [9]

I.3.Principaux groupes de minéraux argileux:

A partir des deux structures de base octaédrique et tétraédrique, plusieurs familles d'argiles sont définies : la montmorillonite, la kaolinite, l'illite. Ce sont les trois argiles les plus connues [13].

I.3.1. Structure de la montmorillonite :

La montmorillonite montre une succession de couches d'atomes d'oxygène, de silicium, d'oxygène et d'hydroxyle, de silicium et d'oxygène.

L'épaisseur d'un feuillet est de 10\AA , les éléments qui occupent les espaces octaédriques peuvent être l'aluminium, le fer, le magnésium, ou une combinaison de ces éléments (voir Figure 1.4) [13].

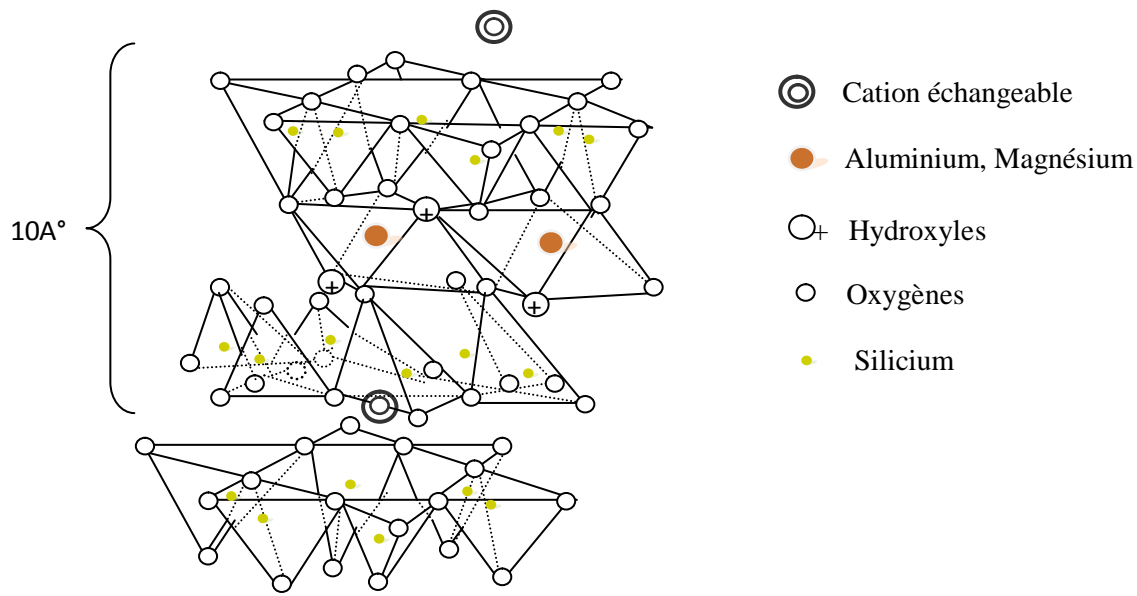


Figure 1.4: Structure tridimensionnelle de la montmorillonite [13].

I.3.2. Structure de la kaolinite :

Dans la kaolinite les couches d'octaèdres et les couches de tétraèdres sont parallèles et s'intercalent de manière à ce que les atomes supérieurs et inférieurs de chacune des couches appartiennent à un même plan (voir Figure I.5).

L'unité minéralogique peut être considérée comme une succession de couches d'atomes d'oxygène, de silicium, d'oxygène et d'hydroxyle, d'aluminium et d'hydroxyle. Ces couches de 7\AA d'épaisseur de chacune, sont reliées entre elles par des liaisons hydrogènes existantes entre O et (OH). La formule générale d'un feuillet est :

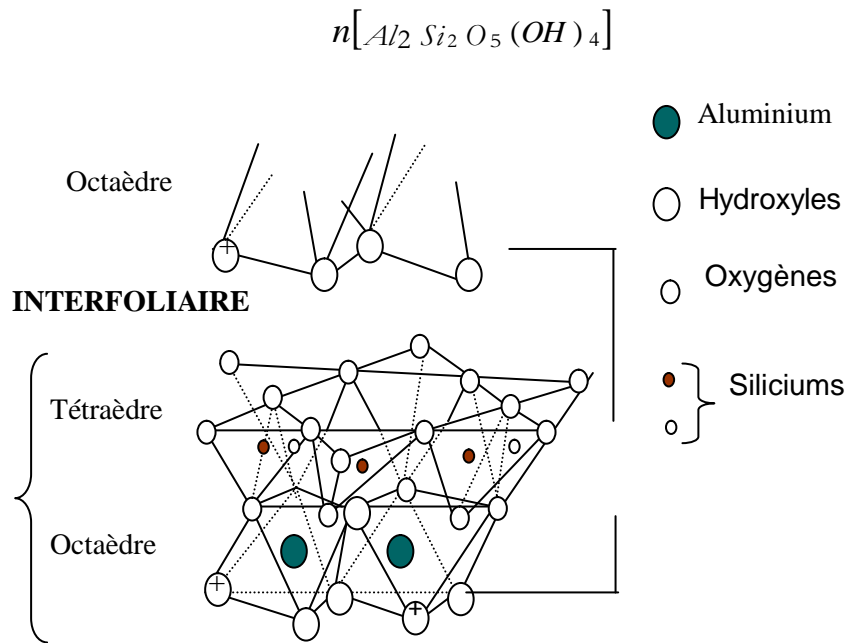


Figure 1.5: Structure tridimensionnelle de la kaolinite [13]

I.3.3. Structure de L’illite:

La structure de l’illite ressemble à celle de la montmorillonite ; la différence provient du fait que l’aluminium remplace à 20 % le silicium dans les tétraèdres (voir Figure I.5) [13].

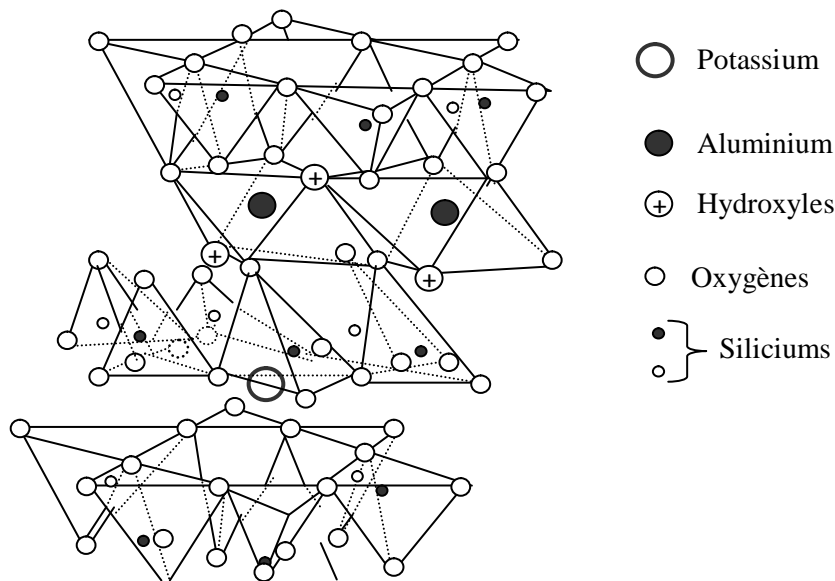


Figure I.6: Structure tridimensionnelle de l’illite (Khelifa, 1994) in [13].

Les caractéristiques de ces trois argiles sont résumées dans le tableau I-1.

Tableau I.1 : Caractéristiques des argiles (Bultel, 2001) in [4].

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

C.E.C exprime la capacité d'échange cationique.

I.4. Propriétés des argiles

Les minéraux argileux se caractérisent par quatre propriétés principales :

1. formes et surfaces spécifiques.
2. capacités d'adsorption d'eau et de gonflement.
3. multiples possibilités d'échanges cationiques.
4. activité des argiles.

I.4.1. Forme et surface spécifique :

I.4.1.a. La forme :

Les argiles se présentent sous trois formes (voir Figure I.6) :

1. en flocons, caractérisés par une même dimension dans les deux directions et une épaisseur équivalente à $1/20^{\text{ième}}$ de la longueur.
2. en latte, avec une dimension plus longue, épaisseur toujours équivalente $1/20^{\text{ième}}$ de la longueur.
3. en aiguilles, deux dimensions identiques et la $3^{\text{ième}}$ beaucoup plus grande (assez rare).

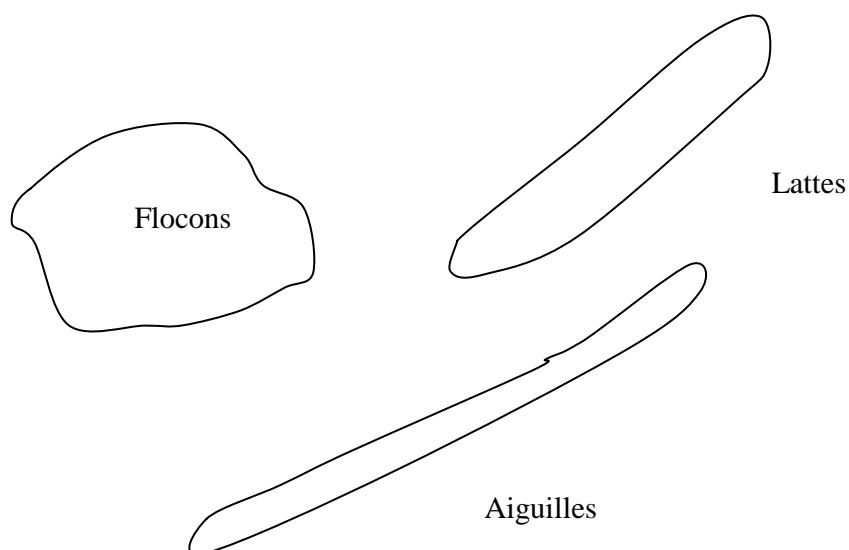


Figure I.7 : Forme des particules argileuses (Fagel, 2005) [6].

I.4.1.b.Surface spécifique :

La dimension des particules aura une influence importante. En effet, la surface spécifique des minéraux argileux croît avec la diminution de la taille des particules, ce qui donne un pouvoir d'absorption plus important et, par conséquent, un potentiel de gonflement plus grand.

Le tableau I.2 et la figure I.7 résument la surface spécifique des particules argileuses.

Tableau I.2 : Surface spécifique des particules argileuses (Fagel 2005) in [6].

Argile	Surface spécifique (m ² /g)		
	Interne	Externe	Totale
Smectite	750	50	800
Vermiculite	750	>1	750
Illite	5	25	30
Kaolinite	0	15	15
Chlorite	0	15	15

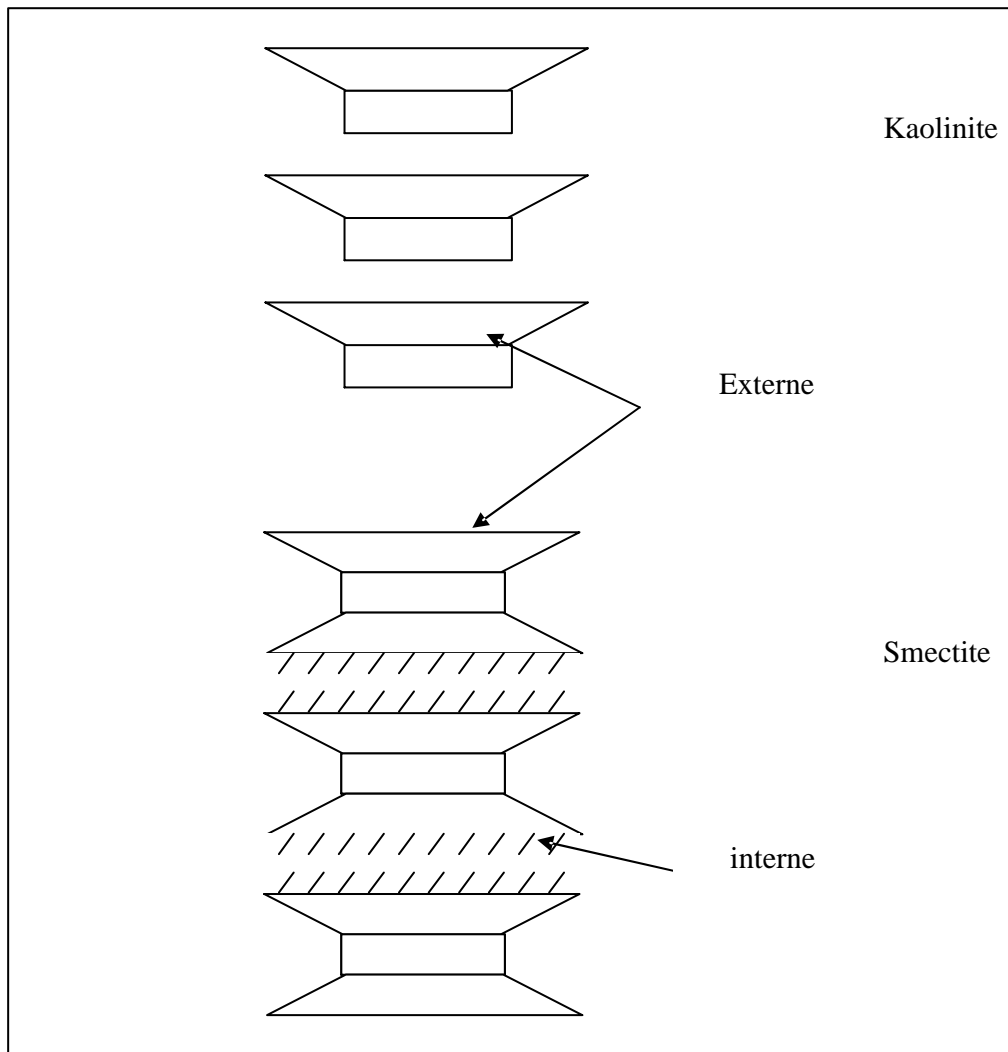


Figure I.8: Surface des particules argileuses: interne et externe (Fagel, 2005) in [6].

I.4.2. Capacité d'échange en cation CEC :

C'est principalement les propriétés électriques de surface de la particule argileuse et les cations dont le comportement dépend de leurs positions, de leurs possibilités d'échanges et leurs caractéristiques électriques et géométriques. Pour un même type de minéral et d'une manière générale, le gonflement va en décroissant suivant les ions suivants Li^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , H^+ et Fe^{3+} .

Le tableau I.2 résume les CEC et la surface spécifique totale Sst de quelques argiles.

Tableau I.3 : Capacité d'échange de cations (C.E.C) et surface spécifique totale (Sst) de quelques argiles d'après (Lautrin.1987) in [7].

Argiles	C.E.C (meq/100gr)	Sst (m ² /g)
Montmorillonite Na ⁺	150	800
Montmorillonite Ca ⁺⁺	80	300
Illite	10-40	40-60
Kaolinite	3-15	40-60
Elément non argileux	-	1-3

I.4.3.Degré d'hydratation :

Le degré d'hydratation varie d'une famille argileuse à une autre. Certains minéraux argileux ont la capacité d'introduire dans leur structure des molécules d'eau. Cette eau modifie la dimension de la couche en provoquant son gonflement. Ces argiles ont une appellation d'argiles gonflantes [6].

I.4.4.Activité des argiles :

Skempton (1953), a considéré que les valeurs des limites d'Atterberg sont liées à la quantité d'eau retenue à la surface des particules et donc à la quantité d'argile présente dans le sol. L'auteur a défini l'activité d'une argile par le rapport de l'indice de plasticité (Ip) et du pourcentage des éléments inférieurs à deux microns (C₂<2 μm).

$$A_1 = I_p / C_2$$

1 Skempton a proposé la nomenclature suivante [10] :

- Argiles inactives : les argiles qui ont une activité inférieure à 0,75. Ces argiles sont à base de Kaolinite, ou des argiles contenant peu de minéraux argileux.
- Argiles normales : qui ont une activité comprise entre 0,75 et 1,25.
- Argiles actives : qui ont une activité comprise entre 1,25 et 2.
- Argiles très actives : qui ont une activité supérieure à 2.

2 En ce qui concerne les argiles compactées, Seed et al (1962) in [11]), ont introduit une modification à la définition de Skempton sous la forme suivante :

$$A_2 = I_p / (C_2 - n)$$

n = 5 cas des sols naturels ; n = 10 cas des sols reconstitués

Le tableau I.4 résume les activités des différents minéraux.

Tableau I.4 : Activité de différents minéraux (Skempton, 1953 et Mitchell, 1976).

Minéral	Activité
Montmorillonite Na ⁺	4 - 7
Montmorillonite Ca ⁺	1,5
Illite	0,5 - 1,3
Kaolinite	0,3 - 0,5
Calcite	0,2
0,2	0

I.5.Mécanismes de gonflement des argiles:

Dans les argiles on rencontre deux cas de gonflement qui se produisent de deux manières et à deux niveaux différents.

Le gonflement inter-foliaire : il intervient à l'échelle microscopique de la structure argileuse. Les analyses minéralogiques montrent que certaines argiles, pour lesquelles les liaisons inter-feuillets sont très faibles, ont la propriété de fixer les molécules d'eau entre deux feuillets voisins. L'eau pénètre à l'intérieur de l'espace inter-foliaire, s'organise en couches mono-moléculaires et provoque ainsi un gonflement inter-foliaire ou intra-particulaire. Ce type de gonflement concerne les argiles gonflantes telles que les smectites et la montmorillonite (Olson et Mesri, 1971 ; Tessier, 1984 ; Cases et al.1990 in Hossein Nowamooz, 2007) [14]. Ce gonflement intervient à l'échelle la plus petite de la structure argileuse alors qu'il présente une ampleur très importante.

Le gonflement inter-particulaire : En dehors du cas de gonflement inter-foliaire qui concerne les argiles dites « gonflantes », il existe un autre cas de gonflement appelé « gonflement inter-particulaire ». Pour ce cas de gonflement l'eau ne pénètre pas à l'intérieur des particules, il occupe plutôt l'espace entre particules. Ce gonflement inter-particulaire, contrairement au gonflement inter-foliaire, a une ampleur assez limitée, mais affecte toutes les argiles.

La figure I.9 est un exemple parmi d'autres qui permet d'identifier les sols gonflants en connaissant l'indice de plasticité I_p et le pourcentage de la fraction argileuse inférieure à $2\mu\text{m}$.

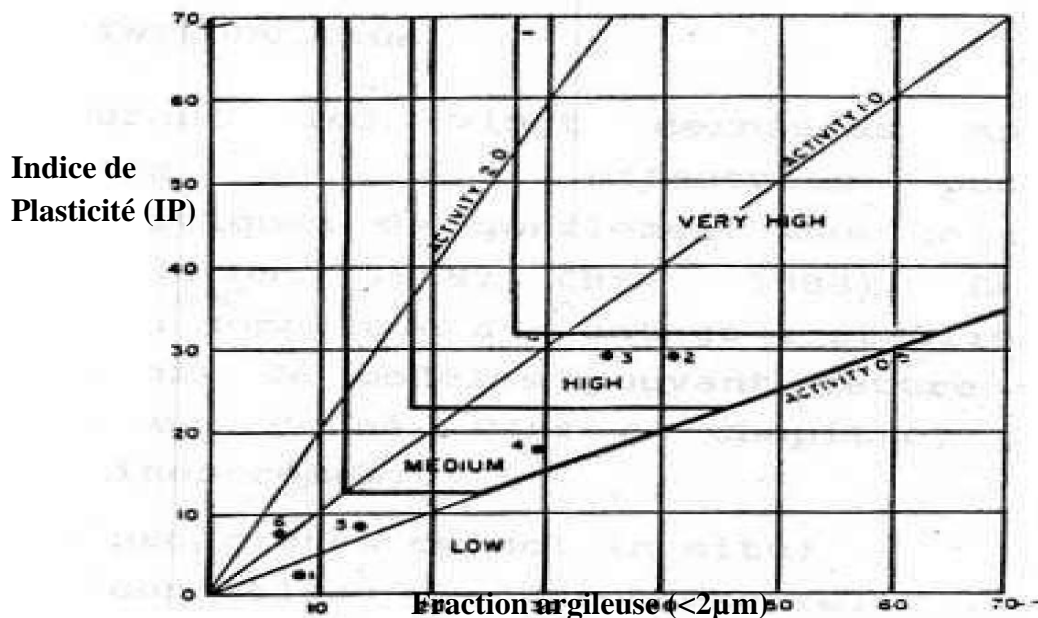


Figure I.9 : Abaque pour l'identification des sols gonflants (d'après Williams et Donaldson, 1980 in Djedid et al, 2001, [3])

I.6.Conclusions:

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques notions avec certaines particularités caractérisant la structure d'une argile. On a donné aussi un aperçu général sur la structure d'une certaine variété d'argile, permettant de comprendre pourquoi certaines argiles réagissent avec l'eau.

Ce chapitre fait comprendre aussi que quelques sols argileux sont à craindre, puisque de par leur structure minéralogique, elles sont gonflantes et peuvent engendrer des désordres dans les bâtis.

Dans le chapitre qui va suivre, nous allons identifier et analyser deux cas de variétés d'argiles se trouvant au niveau de la région d'Adrar.

Chapitre II

Identification des matériaux d'étude

II.1.Introduction :

Dans ce chapitre, on présente les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des sédiments bruts en levés en deux endroits différents au niveau de la région d'Adrar. Les deux zones de cette étude se trouvent à Adrar Nord et Tililane. à Adrar Nord, il s'agit d'une carrière d'argile qui se trouve à quelques kilomètres au nord de la ville d'Adrar (partie Est de la RN6), ce gisement a une couleur rouge et sert à alimenter la briqueterie d'Adrar. A Tililane, on est en présence d'une argile verte qui a été découverte au niveau d'une tranchée de construction.

II.2.Caractérisation des sédiments :

On présentera les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des deux argiles brutes dans le but d'une recherche d'une valorisation dans le domaine des matériaux de construction et la construction routière.

Les essais effectués sur nos échantillons sont les suivants :

- ✓ poids volumique des grains solides ;
- ✓ analyse granulométrique par sédimentométrie ;
- ✓ les limites d'Atterberg ;
- ✓ essai au bleu de méthylène ;
- ✓ teneur en carbonate de calcium CaCO_3 .

II.3.Les caractéristiques physiques :**II.3.1.Poids volumique des grains solides : Norme NF P94-054****II.3.1.1.Définition :**

Le poids volumique des grains solides du sol (γ_s) est le rapport de la masse de ces particules solides (W_s) par leur volume absolu (V_s) ; γ_s en kN/m^3 .

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

II.3.1.2.Principe de la mesure:

Le poids spécifique des particules solides est obtenu par pesage des différents poids au pycnomètre (voir photo II.1).



Photo II.1 : L'appareillage de l'essai les poids spécifique des grains solides.

II.3.1.3 : Expression des résultats : D'après les résultats obtenus de l'essai, la valeur du poids spécifique des grains solides (γ_s) est :

$$\gamma_s = \frac{(W3 - W1) * \gamma_w(20^\circ)}{W2 - W1 - W4 + W3}$$

W1: Pycnomètre vide .

W2: Pycnomètre + l'eau désilé jusqu'a le repère .

W3: Pycnomètre + échantillon.

W4: Pycnomètre +échantillon + l'eau

Les tableaux II.1 et II.2 montrent les résultats des poids volumiques secs des deux agiles rouge et verte.

Tableaux II.1: Les poids spécifique des grains solides (Argile rouge),(voir annexes)

	Prise(1)	Prise(2)	Prise (3)
W1(g)	68	68	68
W2(g)	169.8	169.8	169.8
W3(g)	78	78	78
$\gamma_w(20^\circ)$	0.9982	0.9982	0.9982
W4(g)	176	176.1	176.05
$\gamma_s(g/cm^3)$	2.626	2.661	2.697
$\gamma_s(kN/m^3)$	26.26	26.61	26.97
Moyenne γ_s	26.6		

Tableaux II.2: Les poids spécifique des grains solides (Argile verte),(voir annexes)

	Prise(1)
W1(g)	68
W2(g)	170.1
W3(g)	78.3
γ_w (20°)	0.9982
W4(g)	176.4
γ_s (g/cm³)	2.57
γ_s (kN/m³)	25.7

Pour les deux argiles, le poids volumique sec et compris environ entre 26 et 27 kN/m³, ce qui est conforme avec la particularité des argiles.

II.3.2.L'analyse granulométrique : Norme NF P94-057

II.3.2.1. Analyse par tamisage :

C'est la détermination de la distribution dimensionnelle en poids des éléments d'un sol, et elle s'effectue en deux étapes :

- le tamisage par voie humide ou tamisage sous l'eau pour la distribution dimensionnelle en poids des particules de taille supérieure à 80µm .
- la sédimentométrie, pour la distribution dimensionnelle en poids des particules de taille inférieure à 80µm.

II.3.2.2.Principe de l'essai :

- selon la norme NF P94-050, l'essai s'effectue sur une masse supérieure à 20g avec $600 D \geq m \geq 200 D$

Avec :

m : masse de l'échantillon exprimé en grammes.

D : dimension maximale des plus gros éléments appréciée visuellement et exprimée en millimètres.

Dans notre cas, le tamisage se fait par la voie humide afin de séparer les particules grossières des particules fines, et ceci à l'aide d'une série de tamis de contrôle dont les dimensions des mailles vont en décroissant du tamis supérieur au tamis inférieur. Après avoir pesé chacun d'eux vide, on fait passer notre échantillon humide à travers la colonne et on pèse chaque tamis après l'avoir séché pendant 24 heures à l'air libre de préférence.

II.3.2.3. Analyse granulométrique par sédimentométrie :

L'essai sert à déterminer la propriété et la distribution en poids des particules fines d'un sol en fonction de leurs dimensions (diamètre inférieur à 80 μm). C'est un essai qui consiste à déterminer les diamètres équivalents des particules sphériques en fonction de leur vitesse de chute selon la loi de STOCKES, dans un environnement visqueux afin d'obtenir le tracé d'une courbe granulométrique pour des particules inférieure à 80 μm .

II.3.2.3.1. Principe de l'essai :

On verse la suspension dispersée dans une éprouvette immédiatement après la fin de l'agitation mécanique en prenant soin de rincer les palettes de l'agitateur mécanique avec de l'eau distillée. On récupère l'eau de rinçage en évitant de perdre les parties de l'échantillon de sol pendant le transfert (voir photo 2.2 le principe de l'appareillage).

- ✓ On complète en remplissant l'éprouvette par de l'eau distillée jusqu'à la graduation de 1000 cm^3 .
- ✓ En même temps, on verse l'eau distillée dans une seconde éprouvette témoin à une même graduation (1000 cm^3) et on introduit le thermomètre pour mesurer la température de la solution. On utilise le densimètre propre pour mesurer la densité dans la solution.
- ✓ Pour obtenir une concentration uniforme sur toute la hauteur de l'éprouvette, on agite par un agitateur manuel de manière verticale.
- ✓ Une fois qu'on arrête l'agitation manuelle, on retire l'agitateur et en même temps on déclenche le chronomètre, cet instant indique le début de l'essai.
- ✓ On plonge le densimètre avec précaution dans la suspension immédiatement après le déclenchement du chronomètre.

Réalisation des mesures :

Faire les lectures à t : (30s) ; 1 - 2 - 5 - 10 – 30 – 60 – 120 – 240 et 1440) minutes

Noté à chaque lecture la densité de la solution à : 0.0001 près et la température de l'eau se trouvant dans l'éprouvette témoin.

- ✓ Les trois premières lectures 30" – 1 et 2 min se feront sans retirer le densimètre de la solution.
- ✓ Après la troisième lecture, on retire le densimètre après chaque mesure
- ✓ Après la troisième mesure, on plonge le densimètre 30 secondes avant de faire la prochaine lecture.

Pourcentage des éléments inférieurs à D :

Le pourcentage est donné par la formule suivante :

$$p = \left[100 \times \frac{V_s}{m} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_w} \cdot \rho_w \right] (R_\tau - R_\beta)$$

tel que :

V_s : Volume de la suspension 1000L ou 2000L

m : Masse du sol sec utilisé ($m = 40$ g) ou ($m = 80$ g)

ρ_s : Masse volumique des grains solides

ρ_w : Masse volumique de l'eau

R_t : Lecture de l'éprouvette A au temps t

R_B : Lecture de l'éprouvette B (Eprouvette témoin)

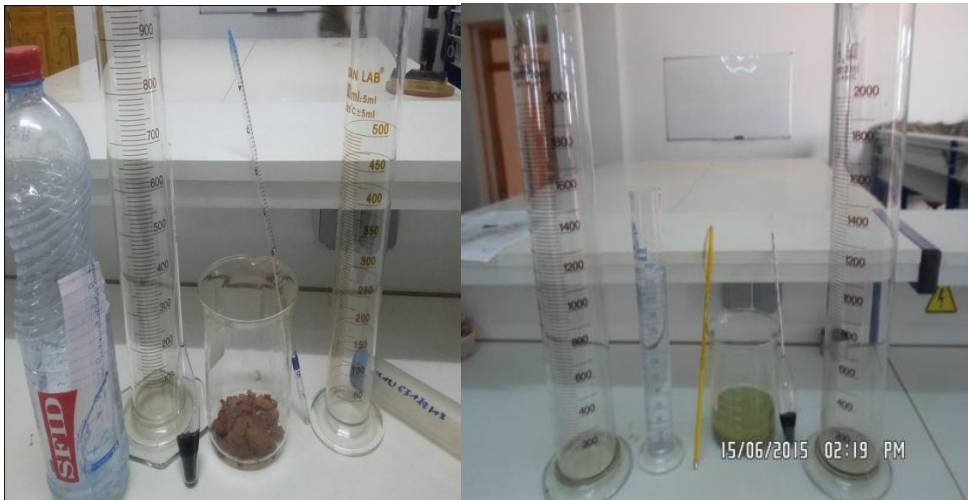


Photo II.2 : Appareillage de l'essai de l'analyse par sédimentométrie

Les tableaux II.3 et II.4 montrent les détails des mesures et ainsi que les interprétations.

Tableau II.3 : Analyse granulométrique par sédimentométrie (Argile rouge),(voir annexes).

Temps de lecture (min)	Lecture nombre de graduation (Rt)	Température (T°)	Facteur F	(R _B)	(Ht)	P% < D	D (mm)
30"	1.0220	26°	0.01268	0.9972	11.308	99.06	0.0603
1'	1.0200	26°	0.01268	0.9972	11.888	91.07	0.04371
2'	1.0188	26°	0.01268	0.9972	12.236	86.28	0.03133
5'	1.0178	26°	0.01268	0.9972	13.926	82.29	0.02114
10'	1.0167	26°	0.01268	0.9972	14.245	77.89	0.0151
30'	1.0140	26°	0.01268	0.9972	15.028	67.10	0.0089
60'	1.0120	26°	0.01268	0.9972	15.608	59.12	0.00646
24H	1.008	26°	0.01268	0.9972	16.768	43.14	0.00136

Tableau II.4 : Analyse granulométrique par sédimentométrie (Argile verte),(voir annexes).

Temps de lecture (min)	Lecture nombre de graduation (Rt)	Température (T°)	Facteur F	(R _B)	(Ht)	P% < D	D (mm)
30"	1.015	29°	0.0126	0.996	12.99	77.53	0.0642
1'	1.014	29°	0.0126	0.996	13.28	73.45	0.0459
2'	1.0138	29°	0.0126	0.996	13.34	72.63	0.0325
5'	1.0132	29°	0.0126	0.996	14.91	70.18	0.0217
10'	1.0125	29°	0.0126	0.996	15.12	67.33	0.0154
30'	1.0112	29°	0.0126	0.996	15.49	62.02	0.0090
60'	1.010	29°	0.0126	0.996	15.84	57.12	0.0065
24H	0.9965	29°	0.0126	0.996	19.76	2.04	0.0014

II.3.2.3.Présentation des résultats :

Les résultats obtenus sont représentés graphiquement sur les courbes dites « courbes granulométriques », voir figure II.1. A partir de ces courbes nous pourrons par la suite classer le sol.

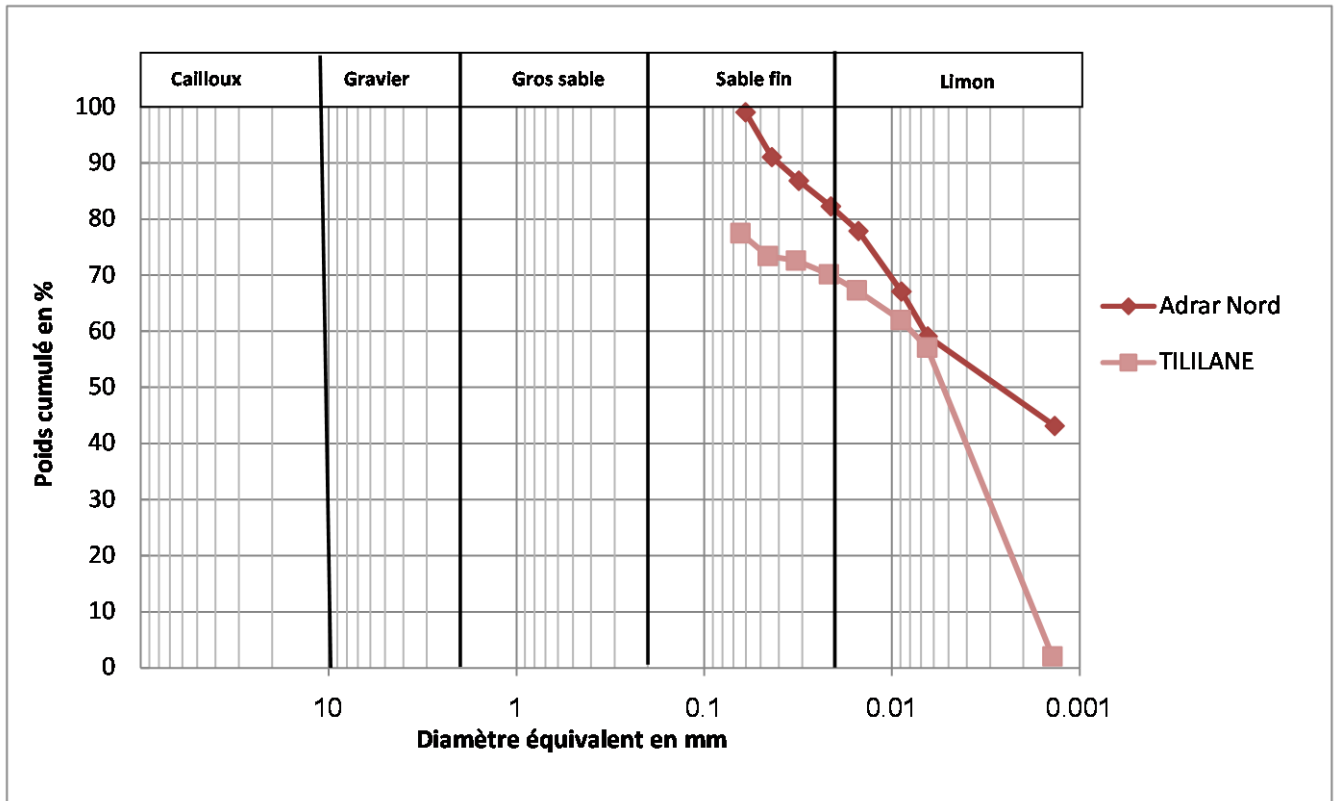


Figure II.1 : Courbes granulométriques des deux argiles (Adrar Nord et Tililane).

A partir de la figure II.1, nous remarquons que nos deux sols sont fins, puisque plus de 50% des éléments ont un diamètre inférieures à 80μ , avec les éléments inférieures à 2μ ; 47% (Adrar Nord) et 14 % (Tililane).

II.3.3.Essais des limites d'Atterberg :

Le comportement de l'argile dépend essentiellement de son état physique, ce dernier étant défini en fonction de la teneur en eau. L'essai aux limites d'Atterberg permet de connaître la limite de liquidité W_L et la limite de plasticité W_p . L'essai se fait sur une partie du matériau passant au tamis 0.40 mm.

II.3.3.1.Préparation de sol :

- échantillonner et homogénéiser le sol ;
- imbiber une masse de matériau dans un récipient d'eau à la température ambiante pendant 24 heures ;
- tamiser ce matériau par une voie humide sur un tamis de 40μ ;

- recueillir le matériau dans un bac ;
- après une durée de décantation d'un moins 24h, l'eau est siphonné sans entrainer des particules solides.

II.3.3.2. Détermination de la limite de liquidité :

II.3.3.2.1 Principe de l'essai (voir photo II.3) :

- malaxer la totalité du tamisât afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide ;
- répartir avec la spatule dans la coupelle propre et sèche une masse de sol ;
- étaler la pâte pour recouvrir le fond de la coupelle, sauf une partie d'environ 3cm, et son épaisseur au centre est de l'ordre de 15 à 20 mm ;
- partager la pâte en deux au moyen de l'outil à rainurer et en le tenant perpendiculairement à la surface de la coupelle ;
- fixer délicatement la coupelle sur le support métallique de l'appareil de Casagrande ;
- actionner la gamme de façon a soumettre une série de chocs à la cadence d'un coup par seconde ;
- noter le nombre N de chocs nécessaires pour que les lèvres de la rainure se rejoignent sur une longueur d'environ 1cm.

Observations :

La limite de liquidité W_L est la teneur en eau du matériau qui correspond conventionnellement à une fermeture sur 1cm des lèvres de la rainure après 25 coups. Elle est calculée à partir de la droite moyenne ajustée sur le couple des valeurs expérimentales. La limite W_L est obtenue pour une valeur N égale à 25, elle est exprimée en pourcentage et au nombre entier entre le plus proche.



Photo II.3 : L'appareillage de l'essai des limites d'Atterberg (appareil de Casagrande)

Les tableaux II.5 et II.6 montrent les résultats des essais de la limite de liquidité pour les deux argiles et les figures II.2 et II.3 le tracé des courbes de la teneur en eau W en fonction du nombre de coups N .

Tableau II.5 : Résultats de la limite de liquidité (Argile rouge) .

Numéro de la tare	D	E	F
Poids total humide (g)	43.3	32.8	31.2
Poids total sec (g)	36.9	27.5	26.4
Poids de la tare (g)	27	18.5	15.5
Poids de l'eau (g)	6.4	5.3	4.8
Poids sec de l'échantillon (g)	9.9	9	10.9
Teneur en eau W%	64.64	58.88	44.03
Nombre de coups	19	23	31

Tableau II.6 : Résultats de la limite de liquidité (Argile verte).

Numéro de la tare	A	B	C
Poids total humide (g)	43.2	48.2	43.9
Poids total sec (g)	39.6	42.5	40.1
Poids de la tare (g)	34.4	35	35.3
Poids de l'eau (g)	3.6	5.7	3.8
Poids sec de l'échantillon (g)	5.2	7.5	4.8
Teneur en eau W%	69.23	76	79.16
Nombre de coups	33	27	23

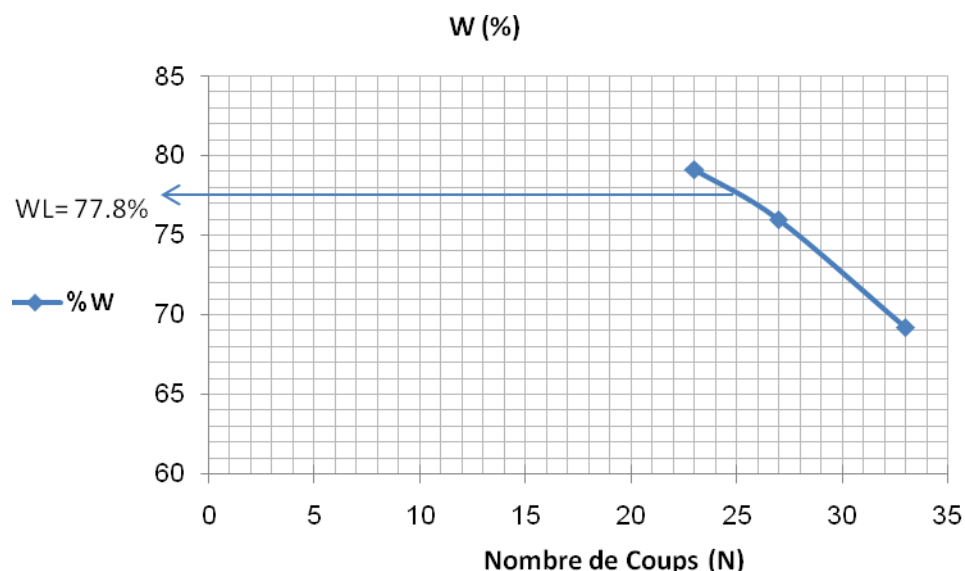


Figure II.2 : Courbe de la limite de liquidité (Argile rouge)

On en déduit W_L correspondant à $N=25$ coups du graphe, on a : $W_L= 77.8\%$ (Argile rouge).

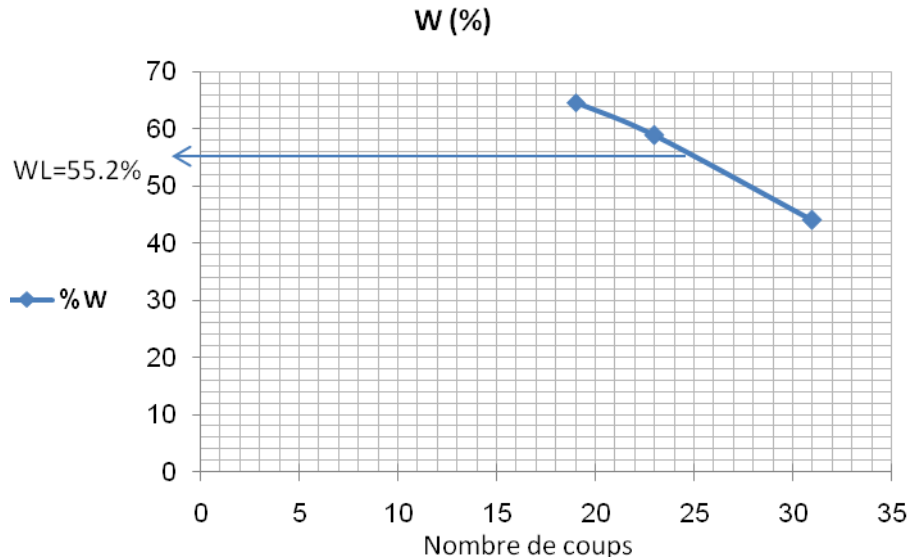


Figure II.3 : Courbe de la limite de liquidité (Argile verte)

On en déduit W_L correspondant à $N=25$ coups du graphe, on a $W_L= 55.2\%$ (Argile verte).

II.3.3.3. Détermination de la limite de plasticité :

II.3.3.3.1 Mode opératoire (voir photo II.4) :

- former une boulette à partir de la pâte préparée de la limite plasticité ;
- router la boulette sur une plaque lisse à la main de façon à obtenir un rouleau qui est aminci progressivement jusqu'à qu'il atteigne 3mm de diamètre ;
- l'amincissement du rouleau se fait de manière continue et sans effectuer de coupure dans le sens de sa longueur ;
- le rouleau au moment où il atteint un diamètre de 3mm, il doit avoir environ 10cm de longueur et ne doit pas être creux ;
- la limite de plasticité sera obtenue lorsque simultanément le rouleau se fissure sur une hauteur de 2 à 3 cm et que son diamètre atteigne 3mm environ ;
- réintégrer le rouleau à la boulette si aucune fissure n'apparaît ;
- reformer un nouveau rouleau ;
- peser et étuver la masse prélevée en deux fois ;
- étuver un deuxième essai sur une nouvelle boulette.



Photo II.4 : Mode opératoire de l'essai de la limite de palsticité.

Les résultats des essais de la limite de plasticité sont présentés dans les tableaux II.7 et II.8.

Tableau II.7: résultats de la Limite de plasticité (Argile rouge)

Numéro de la tare	E	F	G	H
Poids total humide (g)	19.2	19.4	28.6	28.6
Poids total sec (g)	18.7	18.6	28.2	17.9
Poids de la tare (g)	17.5	16.6	27	15.6
Poids de l'eau (g)	0.5	0.8	0.4	0.7
Poids sec de l'échantillon (g)	1.2	2	1.2	2.3
Teneur en eau W%	42	40	33.33	30.43
Wp	36.44			

Tableau II.8: résultats de la Limite de plasticité (Argile verte)

Numéro de la tare	I	J	K
Poids total humide (g)	36	34.8	19.7
Poids total sec (g)	35.5	34.5	19.1
Poids de la tare (g)	34.3	33.3	17.5
Poids de l'eau (g)	0.5	0.3	0.6
Poids sec de l'échantillon (g)	1.2	1.2	1.6
Teneur en eau W%	41.66	25	37.5
Wp	34.72		

II.3.3.4. Indice de plasticité :

L'indice de plasticité est la différence entre les valeurs de la limite de liquidité et la limite de plasticité.

$$I_p = W_L - W_P$$

$$I_p = 77.8 - 36.44 = 41.36\% \text{ (Argile rouge); } I_p = 55.2 - 34.72 = 20.48\% \text{ (Argile verte).}$$

II.3.3.5.l'indice de consistance:

Rapport défini par la formule suivante :

$$IC= WL -W / IP$$

Avec : W : teneur en eau naturel.

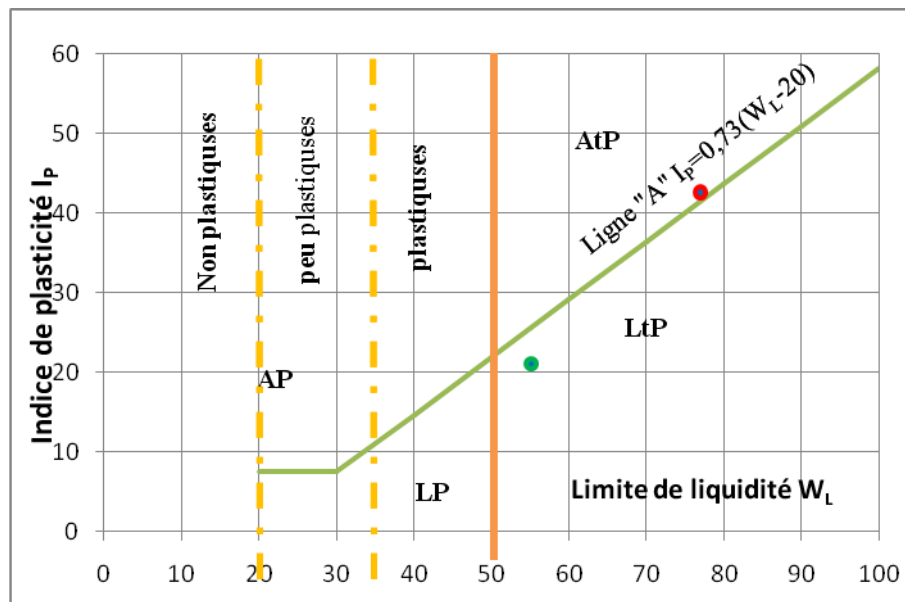
W% (Argile rouge)= 1.07% (voir annexes) , W%(Argile verte) = 1.22% (voir annexes)

Ic= Wl-W/Ip =77.8-1.07/41.36=1.86 (Argile rouge).

Ic= Wl-W/Ip =55.2-1.22/20.48=2.64 (Argile verte).

II.3.3.6.Abaque de plasticité de Casagrande:

Le degré de plasticité peut être évalué à l'aide du diagramme de Casagrande. Il y'a lieu de reporter les résultats des limites d'Atterberg obtenues pour chaque argile et situer l'état de plasticité auquel il appartient. Le degré de plasticité peut être évalué à l'aide du diagramme de Casagrande. Il y'a lieu de reporter les résultats des limites d'Atterberg obtenues pour chaque argile et situer l'état de plasticité auquel il appartient (voir figure II.4).



rouge

● Argile verte

● Argile

Figure II.4 : Abaque de Casagrande

Nous remarquons d'après la figure II.4, que l'argile rouge est de consistance très plastique, par contre l'argile verte est un limon très plastique.

Par rapport aussi au tableau II.9, on peut connaître l'état de plasticité de nos argiles.

Tableau II.9 : Etude du comportement plastique

Indice de plasticité Ip (%)	Etat du sol
0-5	Non plastique
5-15	Peu plastique
15-40	Plastique
> 40	Très plastique

- L'argile rouge a un comportement très plastique car $I_p > 40\%$, ($I_p = 41.36\%$).
- L'argile verte a un comportement plastique car I_p est entre 15 et 40 %, ($I_p = 20.48\%$).

II.3.3.7. Activités des argiles :

D'après SKEMPTON l'activité d'une argile (A_c) se définit comme suit :

$A_c = I_p (\%) / \text{pourcentage des éléments } < 2 \mu\text{m}$

$A_c = 41.36/47 = 0.88$ (Argile rouge)

$A_c = 20.48/14 = 1.46$ (Argile verte)

Par rapport au tableau II.10, on peut connaître l'activité de nos argiles. L'argile rouge a une activité normale, par contre l'argile verte est active.

Tableau II.10 : Activité des sols [13].

Activité (A_c) %	Dénomination
$0 < A_c < 0,5$	Inactif
$0,5 < A_c < 0,75$	Peu actif
$0,75 < A_c < 1,25$	Normal
$1,25 < A_c < 2$	Actif
$A_c > 2$	Très actif

On peut aussi connaître la nature de nos argiles en comparant son activité à celles de certains minéraux donnés par le tableau II.11.

L'argile rouge est proche du minéral Illite, par contre l'argile verte est proche du minéral la Montmorillonite Ca. Cette approche n'est que significative et qui doit pour plus de précisions tenir compte aussi de quelques paramètres physiques et chimiques.

Tableau II.11: Activité des différents minéraux (Skempton, 1953 et Mitchell, 1976).

Minéral	Activité
Montmorillonite Na	4 – 7
Montmorillonite Ca	1,5
Illite	0,5 – 1,3
Kaolinite	0,3 – 0,5
Calcite	0,2
Quartz	0

II.3.3.7.Limite de retrait:

II.3.3.7.1.Mode opératoire:

La limite de retrait exprime la limite entre l'état solide avec retrait et l'état solide sans retrait(voir figure II.5).

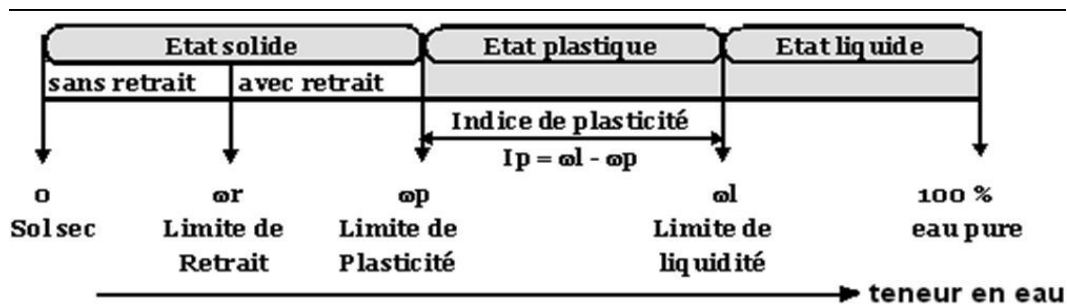


Figure II.5 : Définition des limites d'Atterberg (en particulier la limite de retrait).

La limite de retrait (W_r) est la teneur en eau pondérale conventionnelle de dessiccation d'un sol remanié, au dessous de laquelle le volume de l'échantillon est supposé ne plus varier. Elle est déterminée par la norme XP P 94-60-1. Après l'étuvage des échantillons d'argiles étudiées, on a constaté un taux de retrait élevé. Ce retrait est dû principalement au départ par séchage d'une grande quantité d'eau (voir photo II.4).



Photo II.5 : Appareillage de l'essai de la limite de retrait.

Les tableaux II.12 et II.13 montrent les différents résultats des essais de la limite de retrait W_R .

Tableau II.12: Résultats de la limite de retrait (Argile rouge) ,(voir annexes).

	Prise n°1	Prise n°2
P0	10.1	9.5
P1	234.1	230.6
P2	36.2	35.3
P3	117.4	156.6
Pc	15.1	15.1
P4	25.2	24.6
V_A	15.36	16.26
V_C	2.66	2.60
Teneur en eau W_R (%)	12.99	12.81
Moyenne W_R (%)	12.9	

Tableau II.13: Résultats de la limite de retrait (Argile verte) ,(voir annexes).

	Prise n°1	Prise n°2
P0	9.9	9.7
P1	234.4	230.6
P2	36.7	34.8
P3	151.4	134.1
Pc	15.6	14.2
P4	25.5	23.9
V_A	15.36	15.20
V_C	2.70	2.56
Teneur en eau W_R (%)	12.58	13.66
Moyenne W_R (%)	13.12	

II.3.4.Essai au bleu de méthylène à la tache : Norme NF P94-068**II.3.4.1 Introduction :**

L'essai au bleu de méthylène mesure la surface spécifique des particules argileuses du sol. L'essai dit «à la tache» mesure la surface spécifique totale (interne + externe) des particules, tandis que l'essai au bleu optique, dit «turbidimétrique», mesure leur surface spécifique externe.

II.3.4.2.Définition :

La valeur de bleu notée VB et exprimée en grammes de bleu de méthylène par 100 g de matériau, est la quantité de ce colorant qui est nécessaire pour recouvrir d'une couche non moléculaire les surfaces internes et externes de toutes les particules argileuses présentes dans 100 g de sol. La photo II.6 montre les différents accessoires de l'essai au bleu, par contre la photo II.7 montre la finalité de l'essai des deux argiles en respectant l'organigramme de la figure II.6.



Photo II.6 : L'appareillage de l'essai au bleu.

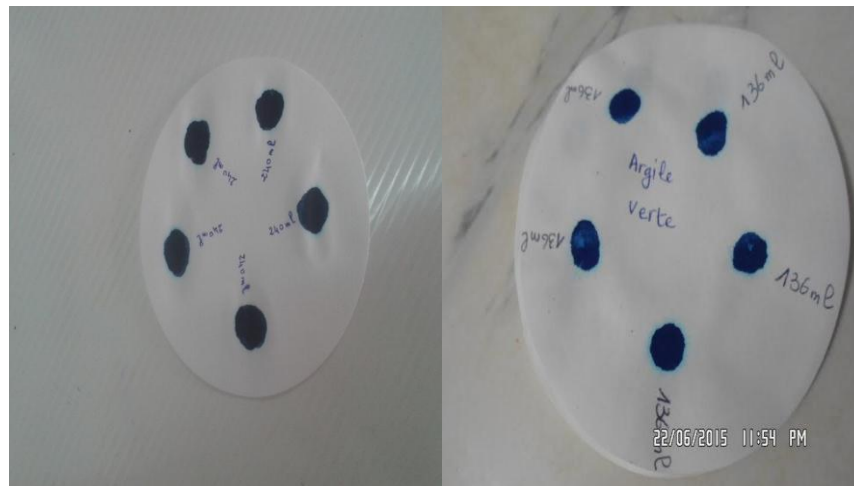


Photo II.7 : Essai à la tache (Argile rouge et Argile verte)

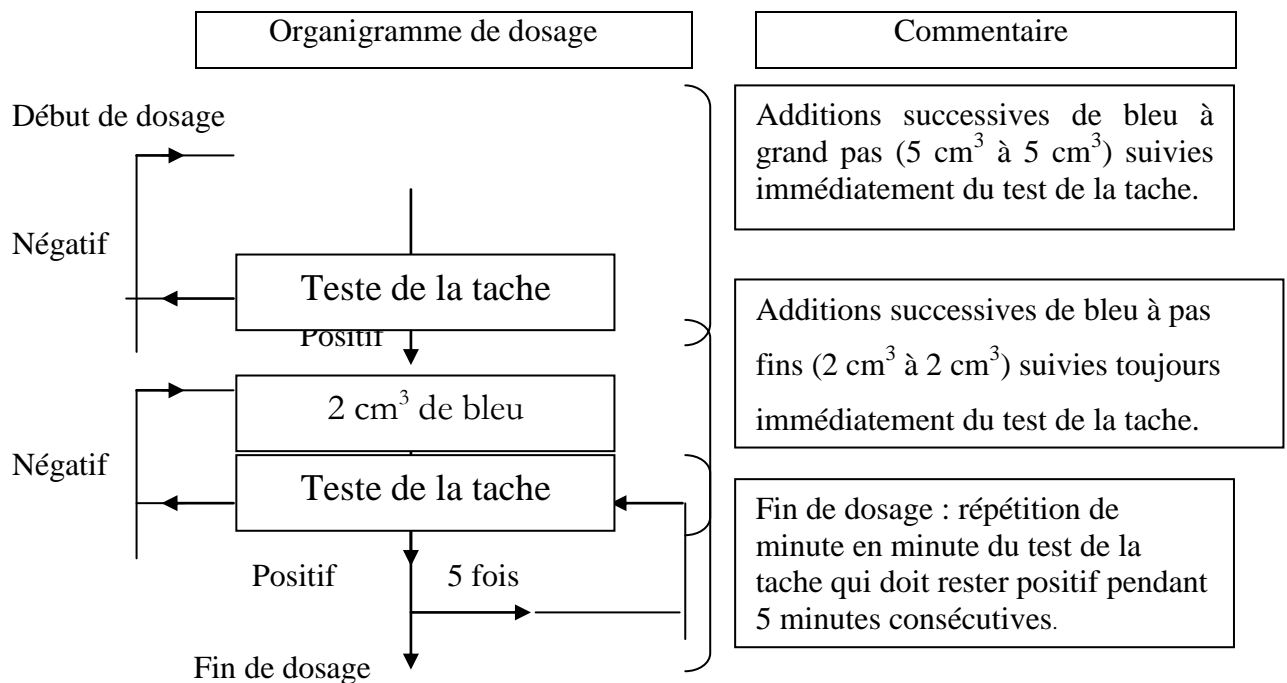


Figure II.6 : Schéma synoptique du processus opératoire de l'essai au bleu à la tache (Shaffner, 1989, cité par Bengraa 2004) in [2]

- De cet essai, nous pouvons tirer la valeur au bleu qui est exprimée par la formule suivante :

$$VB = \frac{\text{Volume en cm}^3 \text{ de solution}}{\text{Poids sec de la prise d'essai}}$$

- La surface spécifique totale SST est calculée d'après la formule ci-dessous :

$$SST = 20,93 \times V_{cc} \times \frac{1}{P_s}$$

D'où :

- SST : surface spécifique (m²/g) ;
- V_{cc} : volume de solution utilisé (cm³) ;
- P_s : poids du matériau sec (g) ;
- 20,93 est la surface qui correspondant à 1 cm³ de bleu de méthylène.
- L'indice de nocivité de la fraction argileuse qui est définie par :

$$N = 100 \frac{VB \text{ (fraction O/ D)}}{C_2}$$

N : Indice de nocivité de la fraction argileuse.

C₂ : terme de pourcentage des éléments < 2 μ de la fraction argileuse.

Le tableau II.14 résume les différentes valeurs liées à la valeur au bleu VB.

Tableau II.14: Paramètres tirés de l'essai au bleu.

Paramètres	Argile rouge	Argile verte
Valeur au bleu VB (cm ³ /g)	8	4.53
Surface spécifique totale (m ² /g)	167.44	94.88
Indice de nocivité	17.02	32.36

Les ordres de grandeurs des valeurs au bleu des sols d'après Philipponat in [13] sont représentés dans le tableau :

Tableau II.15: Classification des sols d'après Philipponat in [13]

Valeur au bleu VB	Type de sol
VB < 0.2	Sols sableux
0.2 < VB < 2.5	Sols limoneux
2.5 < VB < 6	Sols limoneux argileux
6 < VB < 8	Sols argileux
VB > 8	Sols très argileux

Du tableau II.15, on confirme que nos sols sont fins et que l'argile rouge est un sol argileux à très argileux très plastique, par contre l'argile verte est un sol fin limoneux argileux très plastique.

Par contre le tableau II.16 ci-dessous, confirme aussi l'appellation du sol et les seuils de plasticité.

Tableau II.16: Représente la valeur de bleu de quelques sols (Hang, 1984) in [13]

VB (cm ³ /g)	Types de sols
0.1	Sols insensibles à l'eau
0.2	Apparition de la sensibilité à l'eau
1.5	Seuil distinguant les sols sablo-limoneux des sols argileux
2.5	Seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux de plasticité moyenne
6	Seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux
> 8	Seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux

D'après la classification de Holtz et Gibbs [13] représentée dans le tableau II.17, les argiles peuvent être classées suivant leurs surfaces spécifiques.

Tableau II.17: Classification d'après Holtz et Gibbs in [13]

Argiles	Surface spécifique (m ² /g)
Montmorillonite Ca ⁺⁺ Na ⁺	300 à 800
Illite	40 à 60
Kaolinite	5 à 20
Élément non argileux	1 à 3

D'après le tableau II.17 Holtz et Gibbs [13], on remarque que notre argile rouge se classe dans la limite inférieure des montmorillonites, ainsi que l'argile verte.

La figure II.7 d'après (Lautrin, 1987) [13], nous renseigne sur l'indice de nocivité. Nous remarquons que nos deux argiles se classent parmi les sols nocifs et actifs.

Le taux de montmorillonite dans la fraction argileuse est très élevé, il est > 75% pour les sols nocifs et 90% pour les sols très actifs). Nos argiles sont à caractère évolutifs, c'est-à-dire capable de modifier leurs comportements pour toute modification chimique et hydrique du milieu.

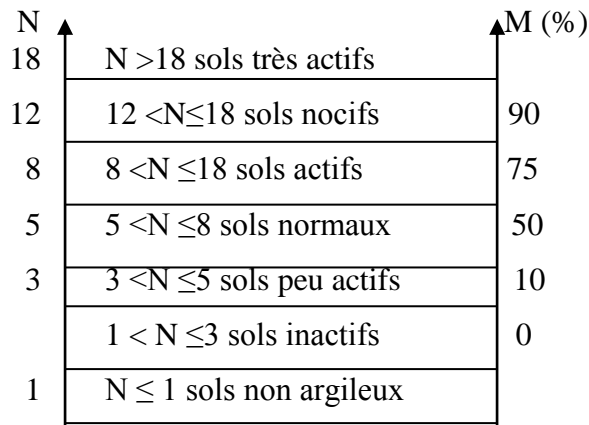


Figure II.7 : Diagramme de nocivité (Lautrin, 1987) in [13].

II.4.Classification du sol :

Selon aussi le «Guide Technique pour la Réalisation des Remblais et des couches de forme », [GTR.2000], en fonction de la valeur de bleu de méthylène VB = 8 (Argile rouge), le sol étudié est placé dans le groupe des **sol argileux à très argileux**. Par contre VB=4.53(Argile verte), le sol étudié est placé dans le groupe des **Sols limoneux-argileux**. (voir figure II.8).

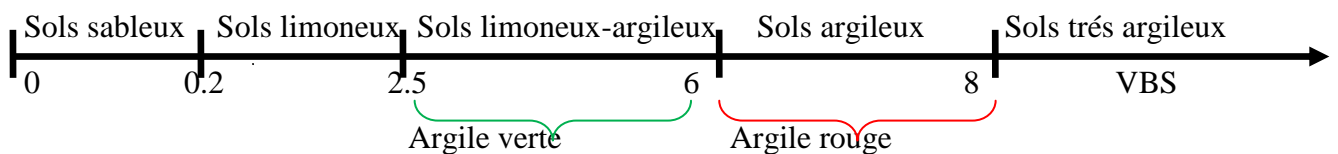


Figure II.8 : Classification de l'argile étudié en fonction de la valeur au bleu de méthylène (VBS) [15]

II.4.1.Classification du sol selon le GTR (Guide des travaux Routiers) :

Le passant à 80µm est supérieur à 35% (Argile rouge et Verte), on a les résultats suivants, voir tableau II.18.

Tableau II.18 : Paramètres de classification des sols selon GTR.

	Ip	Ic	VB
Argile rouge	41,36	1,88	8
Argile verte	20,48	2,70	4,53

Selon le GTR notre sol a pour classement :

(Argile rouge) se classe (A₃.ts), car $25 < I_p \leq 40$ ou $6 < VB \leq 8$ et $I_c > 1,3$. [16]

(Argile verte) se classe (A₂.ts) , car $12 < I_p \leq 25$ ou $2,5 < VB \leq 6$ et $I_c > 1,4$. [16]

II.4.2. Classification du sol selon le LCPC (Laboratoire Centrale des Ponts et chaussées)

On est en présence d'un sol fin car plus de 50% des éléments ont un diamètre $< 0,080$ mm. Selon le diagramme de plasticité de sols, on a une **Argile très plastique** (Argile rouge) et une **Argile limoneuse très plastique** (Argile verte) ; voir figure II.4.

II.5. Caractéristiques chimiques :

II.5.1. Teneur en carbonate de calcium CaCO₃ :

II.5.1.1. Introduction :

L'essai consiste à mesurer le volume de gaz carbonique dégagé après attaque par l'acide chlorhydrique d'une certaine quantité de matériau sec. Il a pour but de détermination du pourcentage de CaCO₃.

II.5.1.2. Définition :

La teneur de calcium d'un échantillon de sol est le rapport exprimé en % du volume de gaz carbonique (CO₂) dégagé par 0,5g d'échantillon au volume de gaz carbonique (CO₂) dégagé par 0,5g de CaCO₃. La photo II.6 montre le principe de l'appareillage pour déterminer la teneur en CaCO₃.

$CaCO_3 = \frac{\text{Volume de gaz carbonique (CO}_2\text{) dégagé par 0,5g d'échantillon}}{\text{Volume de gaz carbonique (CO}_2\text{) dégagé par 0,5g de CaCO}_3}$

La réaction qui se produit est de la forme suivante :

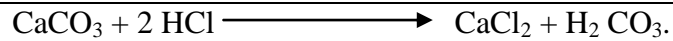


Photo II.8 : Appareillage de l'essai de la teneur en CaCO_3 (calcimètre de Bernard)

II.5.1.3. Classification :

Le tableau II.19 ci-dessous, nous permet de classer le sol selon la teneur en CaCO_3 trouvé.

Tableau II.19 : Teneur en CaCO_3 de quelques sols caractéristiques

Ca CO ₃ %	Nature du sol
0-10	Argile ou limon
10-30	Argile calcaire
30-70	Marne
70-90	Calcaire marneux
90-100	Calcaire

II.5.1.4.Expression des résultats :

Le tableau II.20 exprime les résultats des essais de l'argile rouge réalisés au niveau de l'USTO, IGCMO (Oran).

Tableaux II.20 : Laboratoire USTOMB (IGCM Oran).

Echantillon	Numéro de l'essai	Lecture initiale	Lecture finale	Différence	T°C	Teneur en CaCO ₃ %	Moyenne %
Argile rouge	1	/	6	/	14.5	5.88	5.39
	2	/	5.5	/	14.5	5.39	
	3	/	5	/	14.5	4.90	

D'après les résultats obtenus lors des essais, la teneur en carbonate de calcium moyenne est de 5.39 %. Aussi d'après le tableau II.18, nous confirmons que notre argile rouge appartient à la classe d'argile ou limon.

II.6.Etude du phénomène de gonflement des argiles :

On sait que les argiles ont un pouvoir de gonflement qui se répercute sur la stabilité des constructions.

Dans ce qui suit, et d'après plusieurs travaux antérieurs on peut estimer le potentiel de gonflement d'après les caractéristiques physiques trouvées.

Le potentiel de gonflement de notre sol peut être estimé par références aux tableaux des classifications suivantes selon les travaux antérieurs (Tableaux II.21, II.22 et II.23).

Tableau II.21 : Estimation du potentiel de gonflement, SNETHEN et al. 1977 in BENHAMOU, 2015 [1].

W _L (%)	I _p (%)	Potentiel de gonflement	Classification
< 50	< 25	< 0.5	Faible
50-60	25-35	0.5-1.5	Moyen
> 60	> 35	> 1.5	Elevé

Tableau II.22 : Estimation du potentiel de gonflement, O'NELL et POORMOAYED (1980) in BENHAMOU, 2015 in BENHAMOU, 2015 [1].

W _L (%)	I _p (%)	Classification
20-49	15-24	Faible à moyen
50-70	24-46	Elevé
> 70	> 46	Très élevé

Tableau II.23: Estimation du potentiel de gonflement selon HOLTZ et al. 1973 in BENHAMOU, 2015 [1].

I_p (%)	W_R (%)	W_L (%)	Classification
< 18	< 15	20-35	Faible
15-28	10-15	35-50	Moyen
25-41	7-12	50-70	Elevé
> 45	> 11	> 70	Très élevé

On résume dans les tableaux suivants II.24 et II.25, les valeurs trouvées des paramètres physiques afin d'estimer le caractère de gonflement de nos deux argiles.

Tableau II.24: Synthèse des paramètres physiques (Argile rouge)

I_p (%)	W_R (%)	W_L (%)	Classification du gonflement
41.36	12.87	77.8	Tableau II.21 : Elevé
			Tableau II.22 : Elevé à très élevé
			Tableau II.23 : Moyen à élevé

Tableau II.25: Synthèse des paramètres physiques (Argile verte)

I_p (%)	W_R (%)	W_L (%)	Classification du gonflement
20.48	13.12	55.2	Tableau II.21 : Faible à moyen
			Tableau II.22 : Faible à moyen
			Tableau II.23 : Moyen à élevé

Nous pouvons dire d'après les tableaux II.24 et II.25, que nos deux argiles ont un pouvoir de gonflement qu'il faut étudier.

En résumé, l'argile rouge a un potentiel de gonflement élevé ; par contre l'argile verte a un potentiel de gonflement moyen.

Il est nécessaire d'étudier les paramètres de gonflement de ces deux argiles ; à savoir :

- le gonflement libre ;
- le potentiel de gonflement ;
- les méthodes de stabilisation et de renforcement de ces deux argiles.

II.7. Conclusions :

Beaucoup de gisements d'argile se trouvent en abondance au niveau de la région d'Adrar comme dans d'autres contées éloignées du désert saharien. La proximité des gisements d'argiles proches de la région d'Adrar se trouvent à Timimoun et Régane.

Nous avons caractérisés deux argiles se trouvant à Adrar, à savoir une argile rouge (Adrar Nord) et une argile verte (TILILANE). Ces deux argiles présentent des particularités différentes sur leurs natures et sur leurs caractéristiques physiques.

Ces deux argiles sont à caractère évolutifs, c'est-à-dire capable de modifier leurs comportements pour toute modification chimique et hydrique du milieu.

L'argile rouge est très plastique avec un pouvoir de gonflement élevé, par contre l'argile verte est classée comme limoneuse argileuse très plastique avec un pouvoir de gonflement élevé.

Nous allons expliquer dans le chapitre III suivant la relation entre la nature géologique des argiles avec le contexte géologique.

Chapitre III

Contexte géologique des argiles

III.1.Introduction

A travers les contées du sud et principalement au niveau des régions d'Adrar et Timimoune, il existe des gisements d'argile qu'il faut répertorier et surtout connaître leurs caractéristiques physico-chimiques. Ces renseignements sont précieux et peuvent être la source de l'exploitation de ces gisements en vue de leurs applications dans des projets de constructions en génie civil. Nous allons prendre connaissance du contexte géologique de ces terrains et du climat en fonction de la nature des argiles.

III.2. Les gisements d'argile au niveau de la wilaya d'Adrar :

Beaucoup de gisements d'argile se trouvent en abondance au niveau de la région d'Adrar comme dans d'autres contées éloignées du désert saharien, les gisements sont :

- Adrar (la zone d'El Hamel, Adrar nord) ;
- Zaouiet kounta ;
- Reggan ;
- Tsabit ;
- Tamantit ;
- Mragen.
- Bouda ;
- Sbaa ;
- Tidmayan ;
- Timimoun.

La proximité des gisements d'argiles proches de la région d'Adrar se trouvent à Timimoune et Reggan.

Dans nos travaux de recherche, nous avons caractérisés deux types d'argile se trouvant à Adrar, à savoir une argile rouge (Adrar Nord) et une argile verte (TILILANE).

III.3.1. Argile d'Adrar Nord:

Un exemple d'exploitation d'un gisement d'argile d'Adrar Nord sert à l'approvisionnement en matière première pour une briqueterie. Le site de la briqueterie de l'Hamel est situé à 5 km au nord de la ville d'Adrar. Le site d'argile conçu pour une exploitation se localise géologiquement dans le crétacé inférieur communément appelé continental intercalaire. Les sédiments du crétacé inférieur sont recouverts par une épaisse couche de dépôts récents (sable, limon, débris de grés, galets de quartz et localement anhydrite). [5]

La figure III.1 montre une vue aérienne du gisement d'argile rouge d'Adrar Nord, par contre la figure III.2 nous indique le plan de situation.



Figure III.1: Localisation du site Adrar nord (image satellite 15/10/2013).

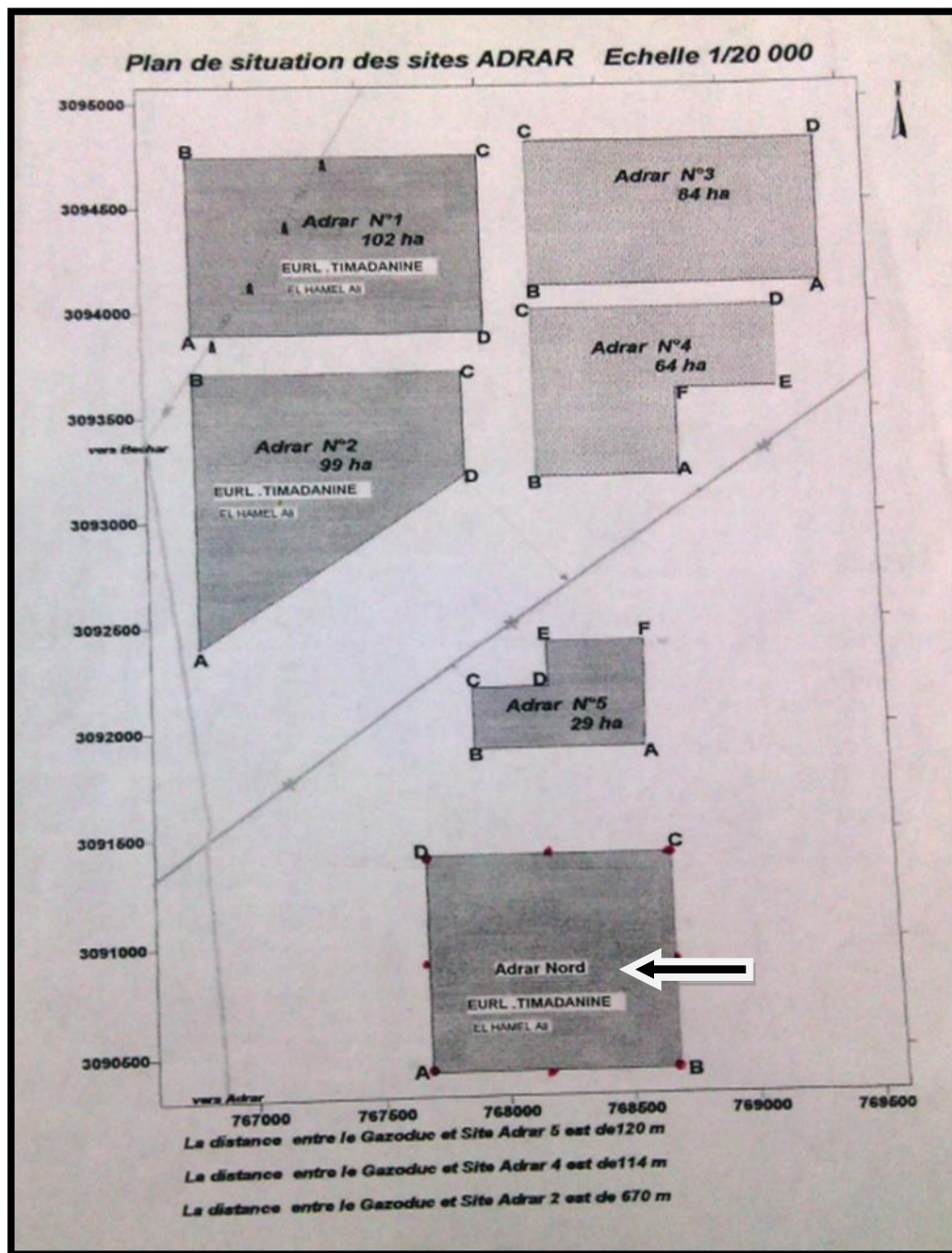


Figure III.2: Plan de situation de gisement d'Adrar nord. [5]

III.3.2. Argile de Tililane :

Le site d'argile verte à Tililane est situé à 4 km à Nord de la ville d'Adrar (Est de la RN6). Cet endroit n'est pas exploré, mais la particularité de ce site c'est qu'on est en présence d'une argile de couleur verte. On s'est intéressé à ce type d'argile pour prendre connaissance de ces propriétés.

La figure III.3 nous montre aussi une vue aérienne de localisation de ce site.



Figure III.3: Localisation du site Tililane (image satellite 15/10/2013).

III.4. Le contexte géologique de la région :

L'état des connaissances géologiques de la wilaya d'Adrar est très restreint étant donné les conditions géographiques défavorables (éloignement des régions, région désertique et le manque d'eau).

La région d'Adrar à climat de type continental désertique, est caractérisée par un régime pluviométrique très faible avec des précipitations rares et irrégulières d'une année à une autre et par un régime thermique qui présente lui aussi de grandes variations avec des hivers rigoureusement froids et de étés très chaud.[12]

Le tableau III.1 présente les données climatiques de la région et justifie les changements brusques de la température dans le mois ainsi que la vitesse du vent qui est importante en certaines périodes.

Tableau III.1 : Les données climatiques de la région d'Adrar.[12]

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet
Température Maximale (C°)	20.5	23.2	27.7	33.2	37.2	43.2	46.0
Température Minimale (C°)	3.8	6.6	10.5	15.5	25.5	27.7	26.6
Humidité (%)	46	40	32	25	23	20	23
Vent (m/s)	5.6	5.3	7.1	7.8	6	7.3	8.1

	Août	Septem	Octobre	Novembre	Décembre	Janv	Février	Mars
Température Maximale (C°)	44.3	40.5	33.2	25.5	15.5	20.5	23.2	27.7
Température Minimale (C°)	23.8	17.1	10.5	5.5	5.5	3.8	6.6	10.5
Humidité (%)	29	39	48	50	50	46	40	32
Vent (m/s)	6.5	4.5	4.6	5.8	5.8	5.6	5.3	7.1

III.5. La relation entre la nature des argiles étudiées et le contexte géologique de la région :

Le caractère gonflant de certaines argiles est lié en premier lieu à leur composition minéralogique.

D'autres facteurs tels que la structure du sol, sa densité, sa teneur en eau initiale peuvent affecter de manière significative la pression de gonflement ou la déformation de ces argiles. Ces phénomènes sont plus marqués lorsqu'ils ont lieu dans les régions où d'importantes variations climatiques existent, en particulier du fort gradient d'évaporation et de déficits saisonniers d'humidité. Les problèmes de gonflement se manifestent spécialement dans les régions arides et semi-arides.

On peut conclure que le contexte géologique de la région d'Adrar (variations climatiques, déficits saisonniers d'humidité, régime pluviométrique et des précipitations très faibleetc.) a une influence considérable sur la nature des argiles.

III.6. Domaine d'utilisation des argiles:

L'argile joue également un grand rôle dans différents secteurs de l'industrie à savoir :

- l'industrie du briques ;
- l'industrie de la céramique ;
- l'industrie du bâtiment ;
- travaux routiers (remblai et les couches de forme).

III.6.1. L'utilisation des argiles étudiées au remblai et couche de forme:

Selon GTR 92 (Guide des Travaux routiers) on a :

Tableau III.2: Paramètres des argiles en remblai et en couche de forme. [16]

	Argile rouge	Argile verte
Classement	(A ₃ .ts)	(A ₂ .ts)
Utilisation en remblai	Sols normalement inutilisable en l'état	Sols normalement inutilisable en l'état
Utilisation en couche de forme	Sols normalement inutilisable en couche de forme	Utilisable à des conditions : - W: humification pour changer l'état hydrique. - T: traitement avec liants hydrauliques éventuellement associé à la chaux.

III.7. Conclusions

La nature des argiles dans certaines régions est en étroite corrélation avec la nature géologique du sol et la particularité du climat aride. C'est le cas en particulier de la région d'Adrar et les contées lointaines du désert.

Les processus sédimentaires dans le cycle géologique des milieux de dépôt, l'étude de leur évolution au cours du temps, la reconstitution de l'architecture des différents environnements au sein d'un bassin de sédimentation et aussi l'étude de l'évolution des sédiments au cours du temps, peut expliquer la variation de la nature des argiles en fonction de leurs propriétés physico-chimiques.

Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce mémoire ont pour objectif de caractériser les matériaux locaux argileux dans le domaine géotechnique.

Les caractérisations physico-chimiques des deux argiles rouge et verte se trouvant dans la région d'Adrar, ont permis de s'apercevoir que ces argiles sont à caractère évolutifs, c'est-à-dire capable de modifier leurs comportements pour toute modification chimique et hydrique du milieu. L'argile rouge est très plastique avec un pouvoir de gonflement élevé, par contre l'argile verte est classée comme limoneuse argileuse très plastique avec un pouvoir de gonflement élevé.

Par contre, la nature des argiles dans certaines régions est en étroite corrélation avec la nature géologique du sol et la particularité de l'aridité du climat.

Comme perspectives des travaux de recherche, il reste à recenser les différents gisements se trouvant dans la région d'Adrar, de les répertorier et d'étudier leurs valorisations dans les projets de constructions en génie civil ou d'autres disciplines.

Références Bibliographique

- [1].**Benhamou**, Réhabilitation des ouvrages de fondation vis-à-vis des argiles gonflantes de Saida, étude d'un cas réel. Soutenance de magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, 2015 136 pages.
- [2]. **Bengraa, L. (2004)**. " Contribution à l'étude de la stabilisation du gonflement par ajout de sable, application aux sols d'Oran " . Mémoire de magistère .U.S.T.Oran, soutenue le 21.06.2004, 102p.
- [3].**Djedid A, Bekkouche A et Aissa Mamoune (2001)**. Identification et prévision du gonflement de quelques sols de la région de Tlemcen (Algérie). Bulletin LCPC, N° 233.
- [4].**Djaani Mabrouka et Benmansour Samah Farah**. Stabilisation des sols gonflants de la région d'In-Aménas par ajouts des liants hydrauliques (Chaux et Ciment), 2011.
- [5].**EURL Briqueterie Timadanine Groupe EI-Hamel** , Mémoire sur les travaux d'exploration ;Mars 2005.
- [6]. **Fagel N. (2005)**. Cours Géologie des argiles. Département de Géologie, Université de Liège. Belgique.
- [7]. **J.M. Thouani Nana.1999 et M. Callaud.2004** : Cours de mécanique des sols Tome I : Propriétés des sols.
- [8]. **Harrat Mouhamed** , Contribution à l'amélioration du procédé de fabrication de la céramique, Etude sur site , unité Maghreb céramique de Touggourt. Université de KASDI Marbah, Ouagla ; 31/01/2007 .
- [9]. **Holz,W.G et Gibs,H,J.** (1991). Introduction à la géotechnique. Traduit Lafleur J, Edition de l'Ecole Polytechnique de Montréal, Canada.
- [10]. Technique de l'ingénieur (1996). Edition Construction C2. [C301 (1-20), C 208 (1-15)].
- [11]. **Gueddouda M. K. (2004)**. Stabilisation des argiles gonflants par ajout du sable de dune, cas : région de Laghouat. Mémoire de magistère .U.S.T.Oran, soutenue juin 2004, 136p.
- [12].**K.Messaitfa T.Chergui** .l'eau, l'énergie et le vent travers la région d'adra,ALGERIE
- [13].**Moulay Omar Hassen**, Etude de la stabilisation des sols gonflants par liants hydrauliques-Application aux sol de la région d'oran . Mai 2008.

- [14]. **Nowamooz H., (2007).** Retrait/gonflement des sols argileux compactés et naturels. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine.
- [15].**Bourabah M.A, 2012.**comportement mécanique des sols, application à la valorisation des sédiments de barrages en technique routière. Thèse de Doctorat Es Sciences, Université Abou-BekrBelkaid, pages301.
- [16]. **Guide technique,** Réalisation des remblai et des couches de forme, Septembre 1992.

Calcule les résultats des essais

Argile rouge

1) Les poids spécifique des grains solide:

Calcules les poids spécifique des grains solides:

Les formule:

$$\gamma_s = \frac{(W_3 - W_1) \cdot \gamma_w(20^\circ)}{W_2 - W_1 - W_4 + W_3}$$

W1: Pycnomètre vide .

W2: Pycnomètre + l'eau désilé jusqu'a le repère .

W3: Pycnomètre + échantillon.

W4: Pycnomètre +échantillon + l'eau.

Les donné:

Prise 01:

W1= 68 g , W2 = 169.8 g , W3 = 78 g , W4 = 176 g , $\rho_w = 0.9982 \text{ g/cm}^3$

$$\gamma_{s1} = \frac{(78 - 68) \cdot 0.9982(20^\circ)}{169.8 - 68 - 176 + 78}$$

$2.626 \text{ g/cm}^3 = \gamma_{s1}$

Prise 02:

W1= 68 g , W2 = 169.8 g , W3 = 78 g , W4 = 176.1 g , $\rho_w = 0.9982$

$$\gamma_{s2} = \frac{(78 - 68) \cdot 0.9982(20^\circ)}{169.8 - 68 - 176.1 + 78}$$

$2.697 \text{ g/cm}^3 = \gamma_{s2}$

Prise 03:

W1= 68 g , W2 = 169.8 g , W3 = 78 g , W4 = 176.05 g , $\rho_w = 0.9982 \text{ g/cm}^3$

$$\gamma_{s3} = \frac{(78 - 68) \cdot 0.9982(20^\circ)}{169.8 - 68 - 176.05 + 78}$$

$2.661 \text{ g/cm}^3 = \gamma_{s3}$

Calculus les moyenne les trios prise:

$\gamma_s = 2.626 + 2.697 + 2.661 = 2.66 \text{ g/cm}$

2) Analyse par sédimentométrie :**Calcul du diamètre des particules non décantée****Les donné suivante:**

$$H_0=13\text{cm} , h_1=11\text{cm} , H_1=2.9\text{cm} , h_2=17.3\text{ cm} , h_1=11\text{cm}$$

Les formule:

$$H_t = H - 100X H_1 X (R_t - R_B) - H_C.$$

$$H = H_0 + 0.5X h_1 = 13 + 0.5X 11 = 18.5\text{cm.}$$

$$H_t(30'') = 18.5 - 100X 2.9X (1.0220 - 0.9972) - 0 = 11.308\text{ cm}$$

$$H_t(1') = 18.5 - 100X 2.9X (1.0200 - 0.9972) - 0 = 11.888\text{ cm}$$

$$H_t(2') = 18.5 - 100X 2.9X (1.0188 - 0.9972) - 0 = 12.236\text{ cm.}$$

$$H_t(5') = 18.5 - 100X 2.9X (1.0178 - 0.9972) - 1.4 = 13.926\text{ cm.}$$

$$H_t(10') = 18.5 - 100X 2.9X (1.0167 - 0.9972) - 1.4 = 14.245\text{ cm.}$$

$$H_t(30') = 18.5 - 100X 2.9X (1.014 - 0.9972) - 1.4 = 15.028\text{ cm.}$$

$$H_t(60') = 18.5 - 100X 2.9X (1.012 - 0.9972) - 1.4 = 15.608\text{ cm.}$$

$$H_t(24^H) = 18.5 - 100X 2.9X (1.008 - 0.9972) - 1.4 = 16.768\text{ cm.}$$

$$D = F \sqrt{H_t / t}$$

$$D(30'') = 0.01268 \sqrt{11.308 / 0.5} = 0.0603\text{ mm}$$

$$D(1') = 0.01268 \sqrt{11.888 / 1} = 0.04371\text{ mm}$$

$$D(2') = 0.01268 \sqrt{12.236 / 2} = 0.03133\text{ mm}$$

$$D(5') = 0.01268 \sqrt{13.926 / 5} = 0.02114\text{ mm}$$

$$D(10') = 0.01268 \sqrt{14.245 / 10} = 0.0151\text{ mm}$$

$$D(30') = 0.01268 \sqrt{15.028 / 30} = 0.0089\text{ mm}$$

$$D(60') = 0.01268 \sqrt{15.608 / 60} = 0.00646\text{ mm}$$

$$D(24^H) = 0.01268 \sqrt{16.768 / 1440} = 0.00136\text{ mm}$$

Calcul du pourcentage des particules non décantées:**Les donné:**

$$V_s = 1000 \text{ ml} \quad , \quad m = 40 \text{ g} \quad , \quad \rho_s = 2.66 \quad , \quad \rho_w = 0.9982$$

$$p = \left[100 \times \frac{V_s}{m} \times \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_w} \times \rho_w \right] (R\tau - R\beta)$$

$$p = \left[100 \times \frac{1000}{40} \times \frac{2.66}{2.66 - 0.9982} \times 0.9982 \right] (R\tau - R\beta)$$

$$P(30'') = (3994.48) \times (1.0220 - 0.9972) = 99.06 \%$$

$$P(1') = (3994.48) \times (1.0200 - 0.9972) = 91.07 \%$$

$$P(2') = (3994.48) \times (1.0188 - 0.9972) = 86.28 \%$$

$$P(5') = (3994.48) \times (1.0178 - 0.9972) = 82.29\%$$

$$P(10') = (3994.48) \times (1.0167 - 0.9972) = 77.89\%$$

$$P(30') = (3994.48) \times (1.014 - 0.9972) = 67.10\%$$

$$P(60') = (3994.48) \times (1.012 - 0.9972) = 59.12\%$$

$$P(24^H) = (3994.48) \times (1.008 - 0.9972) = 43.14\%$$

3).Limites de retrait :**L'argile Rouge**

	Prise N°01	Prise N°02
P ₀	10.1	9.5
P ₁	234.1	230.6
P ₂	36.2	35.3
P ₃	117.4	156.6
P ₄	15.1	15.1
P _C	25.2	24.6

Prise N°01

$$P_A = P_1 - P_0$$

$$= 234.1 - 10.1$$

$$= 224$$

$$V_A = P_A - P_C / 13.6$$

$$= 224 - 15.1 / 13.6$$

$$= 15.36$$

$$V_C = P_2 / 13.6$$

$$= 36.2 / 13.6$$

$$= 2.66$$

$$P_C = P_4 - P_0$$

$$= 25.2 - 10.1$$

$$= 15.1$$

$$V_A - V_C = 15.36 - 2.66$$

$$= 12.7$$

$$(P_A - P_C) - (V_A - V_C) = (224 - 15.1) - (15.36 - 2.66)$$

$$= 196.2$$

$$W_R = (P_A - P_C) - (V_A - V_C) / P_C$$

$$W_R = 196.2 / 15.1$$

$$W_{R(1)} = 12.99\%$$

Prise N°02

$$P_A = P_1 - P_0$$

$$= 230.6 - 9.5$$

$$= 221.1$$

$$V_A = P_A - P_C / 13.6$$

$$= 221.1 - 15.1 / 13.6$$

$$= 15.14$$

$$V_C = P_2 / 13.6$$

$$= 35.3 / 13.6$$

$$= 2.60$$

$$P_C = P_4 - P_0$$

$$= 24.6 - 9.5$$

$$= 15.1$$

$$V_A - V_C = 15.14 - 2.60$$

$$= 12.55$$

$$(P_A - P_C) - (V_A - V_C) = (221.1 - 15.1) - (15.14 - 2.60)$$

$$= 193.45$$

$$W_R = (P_A - P_C) - (V_A - V_C) / P_C$$

$$W_R = 193.45 / 15.1$$

$$W_{R(2)} = 12.81\%$$

$$W_{R(\text{Moyenne})} = W_{R(1)} + W_{R(2)} / 2$$

$$= 12.99 + 12.81 / 2$$

$$= 12.9\%$$

$$W_R = 12.9\%$$

(L'Argile vert)

1) Les poids spécifique des grains solide:

Calcules les poids spécifique des grains solides:

La formule:

$$Y_s = \frac{(W_3 - W_1) \cdot \gamma_w (20^\circ)}{W_2 - W_1 - W_4 + W_3}$$

W1: Pycnomètre vide .

W2: Pycnomètre + l'eau désilé jusqu'a le repère .

W3: Pycnomètre + échantillon.

W4: Pycnomètre +échantillon + l'eau.

Les donné:

Prise 01:

$$W_1 = 68 \text{ g} , W_2 = 170.1 \text{ g} , W_3 = 78.3 \text{ g} , W_4 = 176.4 \text{ g} , \rho_w = 0.9982 \text{ g/cm}^3$$

$$Y_s = \frac{(78.3 - 68) \times 0.9982 (20^\circ)}{170.1 - 68 - 176.4 + 78.3}$$

$$\text{g/cm}^3 \cdot 2.57 = Y_s$$

2) Analyse par sédimentométrie :

Calcul du diamètre des particules non décantée

Les donné suivante:

$$H_0 = 13 \text{ cm} , h_1 = 11 \text{ cm} , H_1 = 2.9 \text{ cm} , h_2 = 17.3 \text{ cm} , h_1 = 11 \text{ cm}$$

Les formule:

$$H_t = H - 100 X H_1 X (R_t - R_B) - H_C$$

$$H = H_0 + 0.5 X h_1 = 13 + 0.5 X 11 = 18.5 \text{ cm}$$

$$H_t(30'') = 18.5 - 100 X 2.9 X (1.015 - 0.996) - 0 = 12.99 \text{ cm}$$

$$H_t(1') = 18.5 - 100 X 2.9 X (1.014 - 0.996) - 0 = 13.28 \text{ cm}$$

$$H_t(2') = 18.5 - 100 X 2.9 X (1.0138 - 0.996) - 0 = 13.34 \text{ cm}$$

$$H_t(5') = 18.5 - 100 X 2.9 X (1.0132 - 0.996) - 1.4 = 14.91 \text{ cm}$$

$$H_t(10') = 18.5 - 100 X 2.9 X (1.0125 - 0.996) - 1.4 = 15.12 \text{ cm}$$

$$H_t(30') = 18.5 - 100 X 2.9 X (1.0112 - 0.996) - 1.4 = 15.49 \text{ cm}$$

$$H_t(60') = 18.5 - 100 X 2.9 X (1.010 - 0.996) - 1.4 = 15.84 \text{ cm}$$

$$H_t(24^H) = 18.5 - 100 X 2.9 X (0.9965 - 0.996) - 1.4 = 19.76 \text{ cm}$$

$$D = F \sqrt{H_t / t}$$

$$D(30'') = 0.01268 \sqrt{12.99 / 0.5} = 0.0642 \text{ mm}$$

$$D(1') = 0.01268 \sqrt{13.28 / 1} = 0.0459 \text{ mm}$$

$$D(2') = 0.01268 \sqrt{13.34 / 2} = 0.0325 \text{ mm}$$

$$D(5') = 0.01268 \sqrt{14.91 / 5} = 0.0217 \text{ mm}$$

$$D(10') = 0.01268 \sqrt{15.12 / 10} = 0.0154 \text{ mm}$$

$$D(30') = 0.01268 \sqrt{15.49 / 30} = 0.0090 \text{ mm}$$

$$D(60') = 0.01268 \sqrt{15.84 / 60} = 0.0065 \text{ mm}$$

$$D(24^H) = 0.01268 \sqrt{19.76 / 1440} = 0.0014 \text{ mm}$$

Calcul du pourcentage des particules non décantées:**Les donné:**

$$V_s = 2000 \text{ ml} , \quad m = 80 \text{ g} , \quad \rho_s = 2.57 , \quad \rho_w = 0.9982$$

$$p = \left[100 \times \frac{V_s}{m} \times \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_w} \times \rho_w \right] (R\tau - R\beta)$$

$$p = \left[100 \times \frac{2000}{80} \times \frac{2.57}{2.57 - 0.9982} \times 0.9982 \right] (R\tau - R\beta)$$

$$P(30'') = (4080.31) \times (1.015 - 0.996) = 77.53 \%$$

$$P(1') = (4080.31) \times (1.014 - 0.996) = 73.45\%$$

$$P(2') = (4080.31) \times (1.0138 - 0.996) = 72.63\%$$

$$P(5') = (4080.31) \times (1.0132 - 0.996) = 70.18\%$$

$$P(10') = (4080.31) \times (1.0125 - 0.996) = 67.33\%$$

$$P(30') = (4080.31) \times (1.0112 - 0.996) = 62.02\%$$

$$P(60') = (4080.31) \times (1.010 - 0.996) = 57.12\%$$

$$P(24^H) = (4080.31) \times (0.9965 - 0.996) = 2.04\%$$

3): Limites de retrait :**L'argile verte**

P_0 : poids de la tare.

P_1 : poids de la tare + mercure.

P_2 : poids humide.

P_c : poids de l'échantillon sec.

P_3 : poids de mercure sortant.

	Prise N°01	Prise N°02
P_0	9.9	9.7
P_1	234.4	230.6
P_2	36.7	34.8
P_3	151.4	134.1
P_c	15.6	14.2
P_4	25.5	23.9

$$P_A = P_1 - P_0$$

$$V_A = (P_A - P_C) / 13.6$$

$$V_C = P_2 / 13.6$$

$$W_R = (P_A - P_C) - (V_A - V_C) / P_C$$

Prise N°01

$$P_A = 234.9$$

$$P_A = 224.5$$

$$V_A = (P_A - P_C) / 13.6$$

$$= (224.5 - 15.6) / 13.6$$

$$= 15.36$$

$$V_C = 36.7 / 13.6$$

$$= 2.70$$

$$W_R = (224.5 - 15.6) - (15.36 - 2.70) / 15.6$$

$$= 12.58\%$$

Prise N°02

$$P_A = 230.6 - 9.7$$

$$P_A = 220.9$$

$$V_A = (220.9 - 14.2) / 13.6$$

$$= 15.20$$

$$V_C = 34.8 / 13.6$$

$$= 2.56$$

$$W_R = (220.9 - 14.2) - (15.2 - 2.56) / 14.2$$

$$= 13.66\%$$

$$W_R = 13.12\%$$

4) Calcules la teneur en eau naturel.

La formule:

$$W\% = (W_h - W_s) / (W_s - W_t) * 100$$

	(Argile rouge)	(Argile verte)
Poids total humide (g)	242	150.6
Poids total sec (g)	239.8	149.2
Poids de la tare (g)	35	34.4
Poids de l'eau (g)	2.2	1.4
Poids sec de l'échantillon (g)	204.8	114.8
Teneur en eau W%	1.07	1.22

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME

A₁, A₂

Classe de sol	Observations générales	Situation météorologique		Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Epaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plateforme support de chaussée					
						PST n° 1	PST n° 2	PST n° 3		PST n° 4	
						AR 1	AR 1	AR 1	AR 2	AR 2	
A _{1h}	La grande sensibilité à l'eau des sols de cette classe implique de les traiter avec des liants hydrauliques associés éventuellement à de la chaux	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON						
				=	pas de pluie					T : Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux	0 0 2 2
										S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	
A _{1m}	La maîtrise de l'état hydrique de ces sols traités est souvent délicate en raison de la variation brutale de leur comportement (portance) pour de faibles écarts de teneur en eau Ces sols se traitent généralement en place	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON						
				=	pas de pluie					W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique	0 1 2 2
										T : Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	
A _{1s}		+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON	e=0,35	e=0,35	e=0,35	e=0,35		
				=	pas de pluie					W : Humidification pour changer l'état hydrique	0 2 1 2
										T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	
A _{2h}	La sensibilité à l'eau des sols de cette classe implique de les traiter le plus souvent en associant chaux + liant hydraulique étant donné l'importance de la fraction argileuse qu'ils peuvent contenir L'association avec de la chaux peut par ailleurs s'imposer pour ajuster leur état hydrique lorsqu'ils sont trop humides	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON		PF2	PF2	PF3		
				=	ni pluie ni évaporation					T : Traitement mixte : chaux + liant hydraulique	0 0 3 2
										S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	
A _{2m}	Lorsqu'ils sont dans un état sec il est nécessaire de les humidifier pour les ramener à l'état moyen et dans ce cas la chaux peut avantageusement être introduite sous forme de lait de chaux dont la concentration doit être adaptée au cas de chantier considéré	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON						
				=	pas de pluie					W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique	0 1 2 2
										T : Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	
A _{2s}	Ces sols se traitent presque toujours en place pour la phase de prétraitement à la chaux et éventuellement en centrale pour la phase traitement au ciment	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON						
				=	pas de pluie					W : Humidification pour changer l'état hydrique	0 2 2 2
										T : Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	

(1) Sur cette PST, la mise en oeuvre d'un matériau traité répondant à une qualité "couche de forme" n'est pas réalisable. Procéder d'abord à un traitement selon une technique "remblai" et se reporter alors au cas de PST n°4 si l'effet du traitement est durable et aux cas PST n°2 ou 3 s'il ne l'est pas.

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN REMBLAI

A₃, A₄

Sol	Observations générales	Situation météorologique	Conditions d'utilisation en remblai	Code								
				E	G	W	T	R	C	H		
A₃th	Soils normalement inutilisables en l'état			NON								
A₃h	<p>Sols difficiles à mettre en œuvre en raison :</p> <ul style="list-style-type: none"> - de leur caractère collant ou glissant dû à leur grande plasticité et à leur faible perméabilité - de leur portance faible <p>La mise en dépôt provisoire n'est pas une solution dans le climat français moyen</p> <p>Le drainage préalable ne permet pas de réduire utilement la teneur en eau W</p>	++	pluie forte	Situation ne permettant pas la mise en remblai avec des garanties de qualité suffisantes	NON							
		+	pluie faible	C : compactage faible H : remblai de hauteur faible (≤ 5 m)	0	0	0	0	0	3	1	
		=	ni pluie, ni évaporation importante	Solution 1 : traitement T : traitement à la chaux C : compactage moyen	0	0	0	2	0	2	0	
				Solution 2 : utilisation en l'état C : compactage faible H : remblai de hauteur faible (≤ 5 m)	0	0	0	0	0	3	1	
		-	évaporation importante	Solution 1 : traitement T : traitement à la chaux C : compactage moyen	0	0	0	2	0	2	0	
				Solution 2 : aération E : extraction en couches W : réduction de la teneur en eau par aération R : couches minces C : compactage moyen H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	1	0	1	0	1	2	2	
A₃m	<p>La plasticité de ces sols entraîne pour les remblais des risques de glissement d'autant plus grands que les remblais sont élevés, même dans les meilleures conditions (w, météo) de mise en œuvre</p>	++	pluie forte	Situation ne permettant pas la mise en remblai avec des garanties de qualité suffisantes	NON							
		+	pluie faible	C : compactage moyen H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	0	0	0	0	0	2	2	
		=	ni pluie, ni évaporation importante	C : compactage moyen H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	0	0	0	0	0	2	2	
				-	évaporation importante	Solution 1 : arrosage superficiel W : arrosage superficiel pour maintien de l'état R : couches minces C : compactage moyen H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	0	0	3	0	1	2
				Solution 2 : utilisation en l'état C : compactage intense H : remblai de hauteur faible (≤ 5 m)	0	0	0	0	0	1	1	
A₃s	<p>Comme ci-dessus la plasticité de ces sols, entraîne pour les remblais des risques de glissement d'autant plus grands que les remblais sont élevés. La forte cohésion de ces sols exige un fractionnement et un compactage énergique en couches minces. La portance élevée ne doit pas faire illusion vis-à-vis des tassements ultérieurs possibles</p> <p>Le changement d'état pour humidification dans la masse ne constitue pas une modalité réaliste</p>	++	pluie forte	Situation ne permettant pas la mise en remblai avec des garanties de qualité suffisantes	NON							
		+	pluie faible	E : extraction en couches R : couches minces C : compactage intense H : remblai de faible hauteur (≤ 5 m)	1	0	0	0	1	1	1	
		=	ni pluie, ni évaporation importante	W : arrosage superficiel pour maintien de l'état R : couches minces C : compactage intense H : remblai de hauteur faible (≤ 5 m)	0	0	3	0	1	1	1	
				-	évaporation importante	E : extraction frontale W : arrosage superficiel pour maintien de l'état R : couches minces C : compactage intense H : remblai de hauteur faible (≤ 5 m)	2	0	3	0	1	1
A₃ts	Soils normalement inutilisables en l'état			NON								
A₄	Sols à la fois très difficiles à travailler et dont l'utilisation comporterait de grands risques de retrait gonflement et de stabilité	L'emploi de ces sols en remblai ne peut être envisagé qu'à l'appui d'une étude spécifique ayant défini les conditions d'état et de compactage à leur appliquer		NON								

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME

A₄

Classe de sol	Observations générales	Situation météo- rologique	Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Epaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plate- forme support de chaussée				
					PST n° 1	PST n° 2	PST n° 3		PST n° 4
					AR 1	AR 1	AR 1	AR 2	AR 2
h	La sensibilité à l'eau et la plasticité élevée des sols de cette classe implique un traitement associant chaux et liant hydraulique pour pouvoir les utiliser en couche de forme. Pour les plus plastiques d'entre eux un traitement à la chaux seule peut être envisagé notamment s'il n'y a pas de risques d'apparition de gel peu après la réalisation. Ces sols se traitent exclusivement en place.	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON				
		=	pas de pluie	Solution 1 : T : Traitement mixte : chaux + liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 0 3 2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF3	e = 0,35 PF3
		-		Solution 2 : T : Traitement à la chaux seule S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 0 4 2	(2) e = 0,5 PF2	(2) e = 0,5 PF2	(3)	(3)
		m	Lorsqu'ils sont dans un état sec leur emploi en couche de forme est à déconseiller en raison de la difficulté qu'il y a à les humidifier de manière homogène.	++	pluie forte	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON	(1)	
+	faible pluie ou faible évaporation			Solution 1 : W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement mixte : chaux + liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 1 3 2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF3	e = 0,35 PF3
=				Solution 2 : W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement à la chaux seule S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 1 4 2	(2) e = 0,5 PF2	(2) e = 0,5 PF2	(3)	(3)
-	évaporation importante			Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON				
s	Sols normalement inutilisables en couche de forme								
A ₄	Sols normalement inutilisables en couche de forme								

Sur cette PST, la mise en œuvre d'un matériau traité répondant à une qualité "couche de forme" n'est pas réalisable. Procéder d'abord à un traitement en une technique "remblai" et se rapporter alors au cas de PST n°4 si l'effet du traitement est durable et aux cas de PST n°2 ou 3 s'il ne l'est pas. La mise en œuvre en 2 couches est une solution de couche de forme peu appropriée, sauf à vouloir rechercher un surclassement en PF3 ou PF4, auquel cas on appliquera les règles de classement définies au § 3 4 2 du fascicule I "Principes généraux".

Classe A

SOLS FINS

Classement selon la nature					Classement selon l'état hydrique	
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Caractères principaux	Paramètres et valeurs de seuils retenus	Sous-classe
D _{max} ≤ 50mm et tamisat à 80µm > 35 %	A sols fins	VBS ≤ 2,5 ou I _p ≤ 12	A ₁ Limos peu plastiques, loess, silt alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...	Ces sols changent brutalement de consistance pour de faibles variations de teneur en eau, en particulier lorsque leur w _n est proche de w _{OPH} . Le temps de réaction aux variations de l'environnement hydrique et climatique est relativement court, mais la perméabilité pouvant varier dans de larges limites selon la granulométrie, la plasticité et la compacité, le temps de réaction peut tout de même varier assez largement. Dans le cas de ces sols fins peu plastiques, il est souvent préférable de les identifier par la valeur de bleu de méthylène VBS, compte tenu de l'imprécision attachée à la mesure de l'Ip.	IPI ≤ 3 ou w _n ≥ 1,25 w _{OPH}	A ₁ th
					3 < IPI ≤ 8 ou 1,10 w _{OPH} ≤ w _n < 1,25 w _{OPH}	A ₁ h
					8 < IPI ≤ 25 ou 0,9 w _{OPH} ≤ w _n < 1,10 w _{OPH}	A ₁ m
					0,7 w _{OPH} ≤ w _n < 0,9 w _{OPH}	A ₁ s
					w _n < 0,7 w _{OPH}	A ₁ ts
		12 < I _p ≤ 25 ou 2,5 < VBS ≤ 6	A ₂ Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques, arènes...	Le caractère moyen des sols de cette sous-classe fait qu'ils se prêtent à l'emploi de la plus large gamme d'outils de terrassement (si la teneur en eau n'est pas trop élevée). Dès que l'Ip atteint des valeurs ≥ 12, il constitue le critère d'identification le mieux adapté.	IPI ≤ 2 ou Ic ≤ 0,9 ou w _r ≥ 1,3 w _{OPH}	A ₂ th
					2 < IPI ≤ 5 ou 0,9 < Ic ≤ 1,05 ou 1,1 w _{OPH} ≤ w _n < 1,3 w _{OPH}	A ₂ h
					5 < IPI ≤ 15 ou 1,05 < Ic ≤ 1,2 ou 0,9 w _{OPH} ≤ w _n < 1,1 w _{OPH}	A ₂ m
					1,2 < Ic ≤ 1,4 ou 0,7 w _{OPH} ≤ w _n < 0,9 w _{OPH}	A ₂ s
					Ic > 1,4 ou w _n < 0,7 w _{OPH}	A ₂ ts
		25 < I _p ≤ 40 ou 6 < VBS ≤ 8	A ₃ Argiles et argiles marneuses, limons très plastiques...	Ces sols sont très cohérents à teneur en eau moyenne et faible, et collants ou glissants à l'état humide, d'où difficulté de mise en œuvre sur chantier (et de manipulation en laboratoire). Leur perméabilité très réduite rend leurs variations de teneur en eau très lentes, en place. Une augmentation de teneur en eau assez importante est nécessaire pour changer notablement leur consistance.	IPI ≤ 10 ou Ic ≤ 0,8 ou w _r ≥ 1,4 w _{OPH}	A ₃ th
					1 < IPI ≤ 3 ou 0,8 < Ic ≤ 1 ou 1,2 w _{OPH} ≤ w _n < 1,4 w _{OPH}	A ₃ h
3 < IPI ≤ 10 ou 1 < Ic ≤ 1,15 ou 0,9 w _{OPH} ≤ w _n < 1,2 w _{OPH}	A ₃ m					
1,15 < Ic ≤ 1,3 ou 0,7 w _{OPH} ≤ w _n < 0,9 w _{OPH}	A ₃ s					
Ic > 1,3 ou w _n < 0,7 w _{OPH}	A ₃ ts					
I _p > 40 ou VBS > 8	A ₄ Argiles et argiles marneuses, très plastiques...	Ces sols sont très cohérents et presque imperméables : s'ils changent de teneur en eau, c'est extrêmement lentement et avec d'importants retraits ou gonflements. Leur emploi en remblai ou en couche de forme n'est normalement pas envisagé mais il peut éventuellement être décidé à l'appui d'une étude spécifique s'appuyant notamment sur des essais en vraie grandeur.	Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique.			
			A ₄ th			
			A ₄ h A ₄ m			

Les paramètres inscrits en caractères gras sont ceux dont le choix est privilégié.